ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3 (31) 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Осинин И. П., Князьков В. С. Организация параллельно-конвейерного СБИС-процессора для прямого модулярного преобразования чисел на основе арифметики разрядных срезов 5

Руднев К. К. Параметрическая идентификация многомерной нелинейной стационарной динамической системы при наличии автокоррелированных помех в выходных сигналах 14

Авакян А. А., Юрков Н. К., Соломин А. В. Мониторинг интерфейсно-вычислительных трактов систем авионики 24

Федотов Н. Г., Семов А. А., Моисеев А. В. 3D-трейс-преобразование: режимы сканирования, особенности стохастической реализации, способы ускорения вычислений 41

Волчихин В. И., Зинкин С. А. Самомодификация топологии и развертывания объектов в виртуализированных сетях хранения и обработки даннных (I. Темпоральные и пространственные ситуации) 54

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Авдеева О. В., Артамонов Д. В., Никулин С. В., Семенов А. Д. Экстремальное управление инерционным объектом с запаздыванием в условиях сильных помех 70

Ненадович Д. М. Разработка обобщенного подхода к формированию прогнозных оценок состояний нестационарного процесса изменения значений экспертных показателей качества, проектируемых инфокоммуникационных систем 81

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Игнатьев А. А., Коновалов В. В. Выбор режима точения на основе идентификации динамической системы станка по виброакустическим колебаниям 92

Добровинский И. Р., Медведик Ю. Т., Медведик М. Ю. К вопросу контроля состояния режущей кромки резца виброакустическим методом 102

Лось И. С., Розен А. Е., Первухин Л. Б., Перелыгин Ю. П., Усатый С. Г., Крюков Д. Б., Розен А. А. Опыт разработки и сертификации многослойных коррозионно-стойких материалов с «протекторной питтинг-защитой» 117

Дудченко А. Н., Колоколов Е. И., Кравченко П. Д. Конструктивно-технологическая оптимизация оправки для изготовления высокоточных цилиндрических оболочек 131

Тарасенко Ю. П., Кривина Л. А., Фель Я. А. Использование наноструктурированного ионно-плазменного покрытия нитрида титана для повышения износостойкости плунжерных пар топливных насосов..... 142

Павлов В. Ф., Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Иванов В. Б., Микушев Н. Н. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных сплошных цилиндрических образцов из стали 45 по остаточным напряжениям образца-свидетеля 149

UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION

ENGINEERING SCIENCES

№ 3 (31) 2014

CONTENT

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Osinin I. P., Knyaz'kov V. S. Organization of a parallel-pipeline VLSI-processor for forward modular conversion of numbers based on bit slice arithmetic 5

Rudnev K. K. Parametrical identification of a multidimensional nonlinear stationary dynamic system in presence of autocorrelated hindrances in output signals 14

Avakyan A. A., Yurkov N. K., Solomin A. V. Monitoring of interface-computing tracts of the avionics systems 24

Fedotov N. G., Semov A. A., Moiseev A. V. 3D-trace-conversion: scanning modes, stochastic implementation features, methods of computational speedup 41

Volchikhin V. I., Zinkin S. A. Topology self-modification and object deployment in virtualized storage and data processing networks (I. Temporal and spatial situations) 54

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

Avdeeva O. V., Artamonov D. V., Nikulin S. V., Semenov A. D. Extreme control of an inertial object with delay in conditions of a strong noise 70

Nenadovich D. M. Development of a generalized approach to formation of predictive estimates of conditions of the unsteady process of expert Q-factor values change, the projectible information-communication system 81

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

Ignat'ev A. A., Konovalov V. V. Choice of a turning mode based on identification of a machine tool's dynamic system by vibroacoustic oscillations 92

Dobrovinskiy I. R., Medvedik Yu. T., Medvedik M. Yu. On the issue of control of the blade's cutting edge condition by the vibroacoustic method 102

Los' I. S., Rozen A. E., Pervukhin L. B., Perelygin Yu. P., Usatyy S. G., Kryukov D. B., Rozen A. A. Experience of development and certification of multilayer corrosion-resistant materials with “sacrificial pitting protection” 117

Dudchenko A. N., Kolokolov E. I., Kravchenko P. D. Constructive-technological optimization of a mandrel for manufacturing high-precision cylindrical shells 131

Tarasenko Yu. P., Krivina L. A., Fel' Ya. A. Usage of a nanostructured ion-plasmous titanium nitride coating for improving wear resistance of fuel pumps’ plunger pairs 142

Pavlov V. F., Vakulyuk V. S., Sazanov V. P., Ivanov V. B., Mikushev N. N. Endurance limit forecasting for surface hardened solid cylindrical specimens made of steel 45 using residual stress of reference specimen 149

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3.01

И. П. Осинин, В. С. Князьков

ОРГАНИЗАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОГО СБИС-ПРОЦЕССОРА ДЛЯ ПРЯМОГО МОДУЛЯРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧИСЕЛ НА ОСНОВЕ АРИФМЕТИКИ РАЗРЯДНЫХ СРЕЗОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является способ организации преобразователя кодов из позиционной системы счисления в систему счисления остаточных классов на базе однородной вычислительной среды. Предметом исследования является способ организации параллельно-конвейерного СБИС-процессора для прямого модулярного преобразования чисел. Целью работы является разработка и исследование параллельно-конвейерного СБИС-процессора для прямого модулярного преобразования чисел на основе арифметики разрядных срезов.

Материалы и методы. Исследования выполнены с использованием теории чисел, теории проектирования ЭВМ и систем, методов и средств экспериментального моделирования СБИС-структур и систем.

Результаты. Предложена организация конвейерного преобразователя кодов чисел, представленных в системе остаточных классов в позиционную систему счисления. В отличие от известных аналогов, вычислительная среда после заполнения $]\log 2n[+ n$ ступеней конвейера за время $T = (]\log 2n[+ n) \cdot t$ обеспечивает выдачу результата преобразования за $n \cdot t$, где t – время срабатывания вычислительной ячейки; n – разрядность основания системы остаточных классов.

Выводы. В результате оценки эффективности предложенного преобразователя кодов на базе модифицированного метода понижения разрядности числа установлено, что применение однородных вычислительных сред для преобразования кодов из позиционной системы счисления в систему остаточных классов обеспечивает повышение скорости вычислений.

Ключевые слова: однородная вычислительная среда, система остаточных классов, преобразователи кодов, параллельно-конвейерная операция.

I. P. Osinin, V. S. Knyaz'kov

ORGANIZATION OF A PARALLEL-PIPELINE VLSI-PROCESSOR FOR FORWARD MODULAR CONVERSION OF NUMBERS BASED ON BIT SLICE ARITHMETIC

Abstract.

Background. The research object is a method of organization of a code converter from the positional notation into the residue number system on the basis of a homo-

geneous comuting environment. The research subject is a method of organization of a parallel-pipeline VLSI-processor for forward modular conversion of numbers. The aim of the work is to develop and research the parallel-pipeline VLSI-processor for forward modular conversion of numbers based on bit slice arithmetic.

Materials and methods. The research was carried out using the number theory, the theory of design of computers and systems, methods and means of experimental design of VLSI-structures and systems.

Results. The authors suggested an organization of a pipeline converter of number codes, represented in the system of residual classes into the positional notation. As opposed to the known analogs, the computing environment after filling]log2n[+ n of pipeline stages for a time $T = (]\log 2n[+ n) \cdot t$ provides conversion results return in $n \cdot t$, where t is a time of a computing cell response; n is a radix capacity of the system of residual classes.

Conclusions. As a result of effectiveness assessment of the suggested code convereter on the basis of the modified method of number length reduction it is established that application of homogeneous computing environments for code conversion from the positional notation into the system of residual classes increases the computing speed.

Key words: homogeneous computing environment, system of residual classes, code converters, parallel-pipelined operation.

Введение

Развитие средств вычислительной техники сопровождается ростом производительности машин, усложнением их конструкций и расширением областей применения. Физический предел стимулирует поиск принципиально новых подходов для решения этой задачи. Параллельные системы обработки информации являются эволюционным шагом в повышении быстродействия устройств вычислительной техники. Однако отсутствие «параллельной» математики, сложность программной и аппаратной реализации таких систем существенно ограничивают их применение. Одним из подходов к преодолению этих трудностей является использование модулярной арифметики (МА) и непозиционной системы счисления – системы остаточных классов (СОК).

Главным преимуществом СОК является разложение динамического диапазона на параллельные каналы с меньшими динамическими диапазонами, определяемыми выбором оснований СОК, которые приводят к операциям без переноса между каналами с различными основаниями и сокращению задержек сигналов.

Основным препятствием для широкого применения системы остаточных классов в вычислительной технике является сложность выполнения немодульных операций, т.е. таких операций, для которых требуется знание о величине числа в целом. Например, известные методы преобразования чисел из позиционной системы счисления (ПСС) в СОК, т.е. прямого модульного преобразования, обладают такими существенными недостатками, как высокая вычислительная сложность и большие аппаратурные затраты на их реализацию [1]. Для преодоления этих недостатков предлагается использовать концепцию однородных вычислительных сред с параллельно-конвейерным выполнением операций по разрядным срезам операндов [2] в случае мультиоперандного суммирования.

1. Классический способ прямого модульного преобразования

Одним из методов преобразования позиционного кода в СОК является метод понижения разрядности исходного числа [3]. Для этого используется выражение

$$A = \sum_{i=0}^{m} a_i \cdot 2^i \equiv B = \left| \sum_{i=0}^{m} a_i \cdot k_i \right|_p ,$$

где A – позиционное представление числа в двоичной системе счисления; B – число, тождественное числу A по основанию p; m – разрядность позиционного числа; a_i – i-й разряд позиционного числа, $a_i \in \{0;1\}$; $k_i = \left|2^i\right|_p$ – константа, соответствующая i-му разряду позиционного числа для преобразования по основанию p, где $i \in [0; m]$.

Исходное позиционное число преобразуется в тождественное ему по основанию p число B_1, но уже меньшей разрядности. В том случае, если B_1 выходит за пределы основания, необходимо итерационно повторять данное преобразование, пока $B_j \geq p$, $i \in [1; h]$, h – количество итераций преобразования. Недостаток устройства (далее ИПС), реализующего данный метод, состоит в большой временной сложности $Q_{\text{ИПС}}$, которая определяется количеством итераций преобразования h и скоростью межразрядных переносов:

$$Q_{\text{ИПС}} = m \cdot n \cdot h,$$

где m – разрядность позиционного числа; n – разрядность константы k_i, $i \in [1; m]$.

Аппаратная сложность $R_{\text{ИПС}}$ определяется суммой аппаратной сложности постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) констант k_i ($n \cdot m$ ячеек памяти, каждая состоит из четырех элементов И-НЕ), n-разрядного двухоперандного сумматора ($15 \cdot n$ элементов И-НЕ), регистра для накопления результата суммирования ($4 \cdot n$ элементов И-НЕ) и двухплечевого n-разрядного мультиплексора, реализующего в связке с сумматором компаратор, т.е.

$$R_{\text{ИПС}} = 4 \cdot n \cdot m + 15 \cdot n + 4 \cdot n + 8 \cdot n = 4 \cdot n \cdot m + 27 \cdot n.$$

2. Организация устройства коррекции числа по заданному модулю

Предлагается модификация метода понижения разрядности, которая состоит в том, что после вычисления числа B_1 вместо следующей итерации метода выполняется коррекция B_1 по модулю p, что позволяет избавиться от итерационного процесса вычислений, тем самым значительно повысив скорость преобразования из ПСС в СОК.

Традиционно коррекция результата применяется в ходе вычислений в СОК, когда результат вычисления X выходит за пределы диапазона модуля p. Например, для операции сложения результат может превысить модуль лишь в 2 раза, а для операции умножения превышение достигает в худшем случае $(p - 2)$ раз.

В рассмотренном далее устройстве коррекции (УК) итерационное вычитание модуля заменено параллельным вычитанием констант, кратных ему [4]. Это позволяет произвести коррекцию числа X за время одной операции вычитания, избавившись от последовательных итераций. На рис. 1 представлена организация УК b-разрядного числа X по заданному модулю p, которое состоит из двумерного постоянного запоминающего устройства, a ячеек однородной среды (ЯОС), a-входового элемента ИЛИ, входа синхронизации c и входа сброса r, которые соединены с соответствующими входами c и r каждой ячейки (для компактности представления на рисунке не изображены), где

$$a = \left\lceil \frac{X}{p} \right\rceil .$$

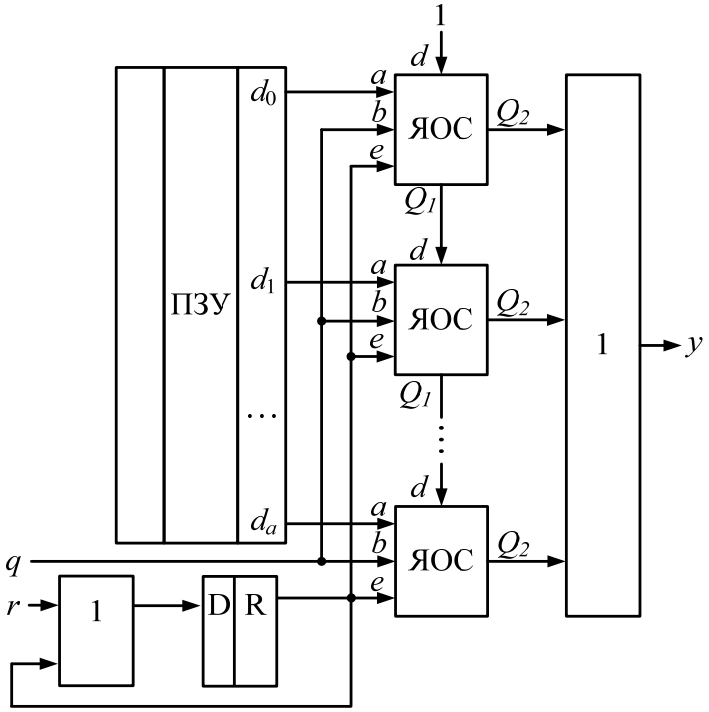


Рис. 1. Организация УК

Константы, необходимые для коррекции, целесообразно вычислять заранее и хранить в ПЗУ. При использовании операций над разрядными срезами операндов [5] удобно использовать следующую организацию ПЗУ. В строках хранятся константы, при этом на одноразрядные информационные выходы выдается содержимое столбца ПЗУ – разрядного среза констант, причем с приходом синхроимпульса на вход c происходит коммутация со следующим столбцом.

Размерность ПЗУ составляет a строк и b столбцов, в i-ю строку записана b-разрядная двоичная константа $w_i = -i \cdot p$, представленная в дополнительном коде, где $i \in [0;a]$. Сдвиговые в сторону младших разрядов b-разряд-

ные регистры являются последовательно соединенными информационными D-триггерами, вход регистра соединен с первым триггером, выход регистра – с выходом последнего триггера. Вход синхронизации регистра соединен с входами синхронизации всех триггеров.

В состав ЯОС (рис. 2) входят: a, b, d, e – четыре одноразрядных информационных входа, c – вход синхронизации, r – инверсный вход сброса, Q_1, Q_2 – два одноразрядных информационных выхода, полный одноразрядный сумматор (ОСМ) [2], информационный D-триггер, сдвиговый регистр R, элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, элемент И.

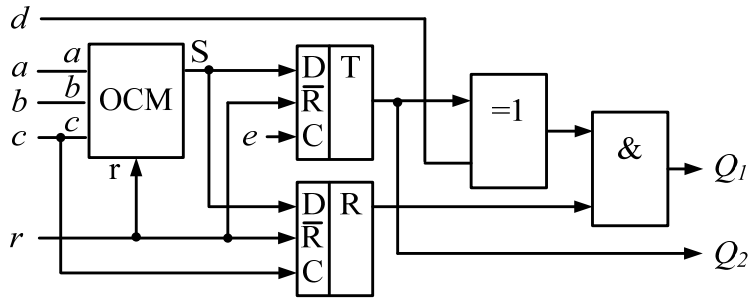


Рис. 2. Организация ЯОС

ОСМ реализует следующую систему логических функций в базисе И-НЕ:

$$\begin{cases} d^+ = \overline{\overline{cabr} \cdot \overline{cadr} \cdot \overline{cbdr} \cdot \overline{d\bar{c}} \cdot \overline{dabr} \cdot \overline{adr} \cdot \overline{bdr}} \\ S^+ = \overline{\overline{\bar{c}\bar{a}\bar{b}d} \cdot \overline{\bar{c}\bar{a}b\bar{d}} \cdot \overline{\bar{c}a\bar{b}\bar{d}} \cdot \overline{cab\bar{d}} \cdot \overline{S\bar{c}} \cdot \overline{S\bar{a}\bar{b}d} \cdot \overline{S\bar{a}b\bar{d}} \cdot \overline{Sa\bar{b}\bar{d}} \cdot \overline{Sabd}} \end{cases},$$

где d^+ и S^+ – состояния в следующий момент времени на выходах ОСМ d и S соответственно.

Преобразуемое число, поступающее на вход q, поразрядно алгебраически суммируется в ячейках ЯОС3 с константами w_i, извлекаемыми из ПЗУ. Разряды вычисленных сумм накапливаются в сдвиговых регистрах. С помощью элементов ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ происходит поиск комбинации положительного и отрицательного знаков чисел, которая определяет, с выходом какого из сдвиговых регистров коммутируется выход устройства y. Анализируемые знаки хранятся в информационных триггерах, причем первая запись в них осуществляется с помощью подачи высокого уровня сигнала на вход устройства r через b тактов работы устройства, когда знак доступен на выходе ячейки ЯОС, где b – разрядность числа исходного числа X.

3. Организация спецпроцессора для выполнения операции прямого модулярного преобразования

Предлагаемый преобразователь кодов из ПСС в СОК по заданному модулю p (далее УПС) состоит из двумерного ПЗУ, m двухвходовых элементов И, m-входового мультиоперандного сумматора (МС) и устройства для коррекции числа по модулю p, где m – разрядность преобразуемого числа (рис. 3). Способ и устройство быстродействующего параллельно-разрядного МС подробно описаны в [2, 5].

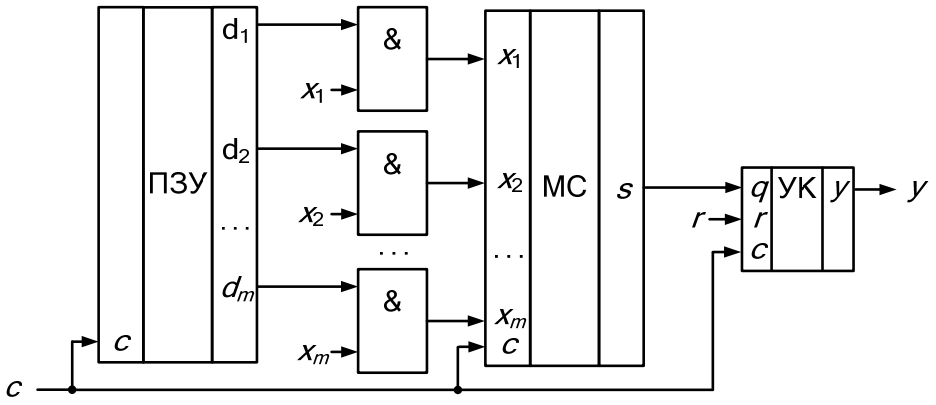


Рис. 3. Организация спецпроцессора для прямого модулярного преобразования

Размерность ПЗУ составляет m строк и n столбцов, в i-ю строку записана двоичная n-разрядная константа $k_i = \left|2^i\right|_p$, где $i \in [0; m]$, $n = \log_2 p$.

На входы $x_1, \ldots, x_m$ поступают соответствующие разряды m-разрядного преобразуемого числа, каждому из которых соответствует константа в ПЗУ. В том случае, если разряд x_i равен единице, константа k_i выдается поразрядно на i-й вход МС, в противном случае выдается нуль.

Результат мультиоперандного суммирования, тождественный по модулю p исходному числу, поступает в устройство коррекции, где вводится в диапазон модуля p. Выход устройства коррекции y является выходом устройства преобразования кодов.

Пример. Требуется преобразовать число x = 1101 в СОК по модулю p = 0101. Передача данных в устройстве приведена на рис. 4, где результаты промежуточных вычислений отмечены векторами, разряды которых (начиная с младшего) доступны на выходах соответствующих блоков по мере заполнения конвейера.

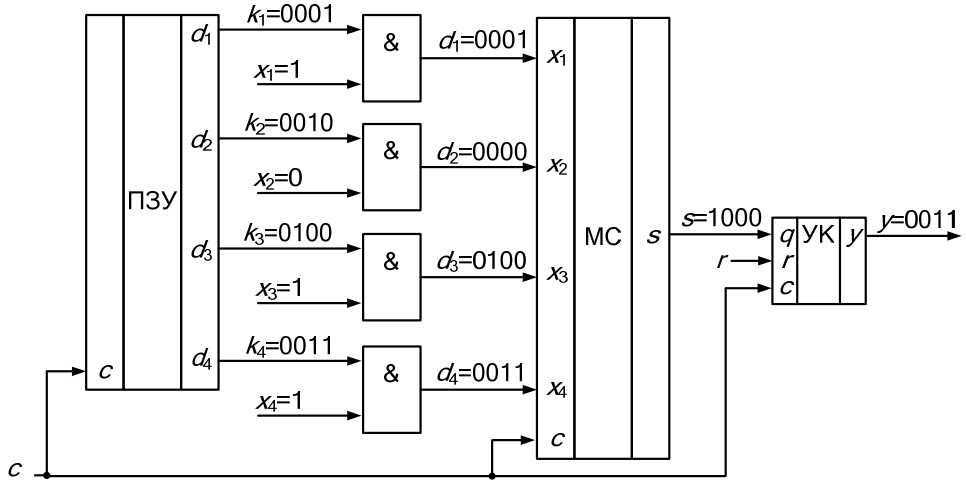


Рис. 4. Пример операции преобразования кодов

Константы k_i, логически умноженные на соответствующие разряды исходного числа, мультиоперандно суммируются в параллельно-конвейерном режиме, после чего сумма $s = 1000$ вводится в диапазон модуля p с помощью устройства коррекции. Первый разряд искомого результата y доступен на выходе устройства через шесть тактов работы (два такта – мультиоперандное суммирование и четыре такта – коррекция результата), после чего конвейер является заполненным и каждый следующий разряд результата доступен каждый следующий такт. Таким образом, искомый результат $y = 0011$.

4. Сопоставление оценок эффективности способов прямого модульного преобразования

Временная сложность $Q_{\text{УПС}}$ данного спецпроцессора после заполнения конвейера определяется произведением времени такта работы устройства $T_{\text{УПС}}$ (время срабатывания ОМС) на количество разрядов n константы k_i

$$Q_{\text{УПС}} = T_{\text{УПС}} \cdot n = 3 \cdot t \cdot n.$$

Аппаратная сложность $R_{\text{УПС}}$ данного устройства определяется суммой аппаратной сложности ПЗУ ($n \cdot m$ ячеек памяти, сложность каждого четвертого элемента И-НЕ), m двухвходовых элементов И, мультиоперандного сумматора и устройства коррекции по заданному модулю:

$$R_{\text{УПС}} = 4 \cdot n \cdot m + 2 \cdot m + 22 \cdot (m-1) + 4 \cdot a \cdot (9+b).$$

В табл. 1 приведены результаты расчета временной сложности устройств при изменении разрядности операндов на базе итерационного способа, где m – разрядность позиционного числа, n – разрядность модулей СОК.

Таблица 1

Характеристики устройств прямого модулярного преобразования

m, шт.	n, бит	Временная сложность		Аппаратная сложность	
		ИПС, нс	УПС, нс	ИПС, нс	УПС, нс
32	6	1536	108	858	2730
64	7	3584	117	1897	5758
128	8	8192	126	4216	12254
256	9	18432	135	9351	25958
512	10	40960	144	20630	54790

Временная сложность устройств для выполнения немодульных операций на базе итерационных способов квадратично зависит от разрядности операндов, а для устройств на базе предложенных способов эта зависимость пропорциональна. Например, при разрядности позиционных операндов $n = 256$ бит временные затраты предложенного в 136 раз меньше, чем для устройства на базе итерационных способов.

Аппаратная сложность устройств для выполнения немодульных операций на базе итерационных способов квадратично зависит от разрядности операндов, а для устройств на базе предложенных способов эта зависимость пропорциональна. Например, при разрядности позиционных операндов

n = 256 бит аппаратные затраты предложенного преобразователя кодов в 2,77 раза выше, чем для устройств на базе итерационного способа.

Заключение

Предложена организация конвейерного преобразователя кодов чисел, представленных в системе остаточных классов в позиционную систему счисления. В отличие от известных аналогов, вычислительная среда после заполнения $]\log_2 n[+ n$ ступеней конвейера за время $T = (]\log_2 n[+ n) \cdot t$ обеспечивает выдачу результата преобразования за $n \cdot t$, где t – время срабатывания вычислительной ячейки, n – разрядность основания системы остаточных классов.

В результате оценки эффективности предложенного преобразователя кодов на базе модифицированного метода понижения разрядности числа установлено, что применение однородных вычислительных сред для преобразования кодов из ПСС в СОК обеспечивает повышение скорости вычислений. Например, при преобразовании 64-разрядных чисел из ПСС в СОК вычисления будет выполняться в $64 \cdot h$ раз быстрее, чем в устройстве на базе известного итерационного метода понижения разрядности позиционного числа, где h – количество итераций преобразования.

Список литературы

1. **Каляев, И. А.** Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / И. А. Каляев, И. И. Левин, Е. А. Семерников. – Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2008. – 393 с.
2. **Осинин, И. П.** Организация арифметического разрядно-параллельного СБИС-процессора для массовых вычислений / И. П. Осинин, В. С. Князьков, Т. В. Волченская // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах : сб. материалов XII Всерос. конф. – Н. Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012. – С. 194–198.
3. **Червяков, Н. И.** Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Н. И. Червяков. – М. : Физматлит, 2003. – 288 с.
4. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2011617433. Преобразователи кодов позиционной системы счисления в систему остаточных классов и обратно / Осинин И. П., Князьков В. С. – 23.09.2011.
5. **Осинин, И. П.** Способ и устройство для конвейерных вычислений суммы m-n-разрядных чисел / И. П. Осинин, В. С. Князьков // Математика и математическое моделирование : сб. материалов VI Всерос. молодежная науч.-инновац. школы. – Саров : СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 89–97.

References

1. Kalyaev I. A., Levin I. I., Semernikov E. A. *Rekonfiguriruemye mul'tikonveyernye vychislitel'nye struktury* [Reconfigurable multi-pipeline computing structures]. Rostov-on-Don: YuNTs RAN, 2008, 393 p.
2. Osinin I. P., Knyaz'kov V. S., Volchenskaya T. V. *Vysokoproizvoditel'nye parallel'nye vychisleniya na klasternykh sistemakh: sb. materialov XII Vseros. konf.* [High-perfomance parallel computing on cluster systems: proceedings of XII All-Russian conference]. Nizhny Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo gosuniversiteta, 2012, pp. 194–198.
3. Chervyakov N. I. *Modulyarnye parallel'nye vychislitel'nye struktury neyroprotsessornykh sistem* [Modular parallel computing structures of neuroprocessor systems]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 288 p.

4. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programm dlya EVM № 2011617433. Preobrazovateli kodov pozitsionnoy sistemy schisleniya v sistemu ostatochnykh klassov i obratno* [Certificate of software program official registration № 2011617433. Converter of codes of the positional notation into the system of residual classes and back]. Osinin I. P., Knyaz'kov V. S. 23 September 2011.
5. Osinin I. P., Knyaz'kov V. S. *Matematika i matematicheskoe modelirovanie: sb. materialov VI Vseros. molodezhnaya nauch.-innovats. shkoly* [Mathematics and mathematical modeling: proceedings of VI All-Russian youth scientific-innovative school]. Sarov: SarFTI NIYaU MIFI, 2012, pp. 89–97.

Осинин Илья Петрович
аспирант, Вятский государственный университет (Россия, г. Киров, ул. Московская, 36)

E-mail: stalker-lord@mail.ru

Osinin Il'ya Petrovich
Postgraduate student, Vyatka State University (36 Moscovskaya street, Kirov, Russia)

Князьков Владимир Сергеевич
доктор технических наук, профессор, кафедра электронных вычислительных машин, Вятский государственный университет (Россия, г. Киров, ул. Московская, 36)

E-mail: kniazkov@list.ru

Knyaz'kov Vladimir Sergeevich
Doctor of engineering science, professor, sub-department of electronic computers, Vyatka State University (36 Moscovskaya street, Kirov, Russia)

УДК 681.3.01
Осинин, И. П.
Организация параллельно-конвейерного СБИС-процессора для прямого модулярного преобразования чисел на основе арифметики разрядных срезов / И. П. Осинин, В. С. Князьков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 5–13.

УДК 519.254

К. К. Руднев

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МНОГОМЕРНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ АВТОКОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ В ВЫХОДНЫХ СИГНАЛАХ

Аннотация.

Актуальность и цели. Для оценивания параметров нелинейных динамических систем с помехами в выходных сигналах разработано большое число методов, учитывающих особенности объектов, условия их функционирования, способ тестирования и математическую основу получаемых экспериментальных данных. В зависимости от априорной информации об объекте управления различают задачи идентификации в узком и широком смысле. Задача идентификации в узком смысле состоит в оценивании параметров и состояния системы по результатам наблюдений над входными и выходными переменными, полученными в условиях функционирования объекта. Рассматривается проблема параметрической идентификации многомерных по входу и выходу нелинейных разностных уравнений с помехами в выходных сигналах.

Материалы и методы. Приведен алгоритм, который является модификацией стандартного метода наименьших квадратов для восстановления неизвестных параметров без существенного увеличения априорной информации.

Результаты и выводы. На основе модифицированного нелинейного метода наименьших квадратов доказана состоятельность матриц параметров нелинейного разностного уравнения. Реализация разработанного метода параметрической идентификации в программный продукт позволит повысить эффективность автоматизированных систем управления технологических процессов, а также математического моделирования в технических областях науки.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, нелинейная динамическая система, состоятельная оценка, автокоррелированные помехи, помехи в выходных сигналах.

K. K. Rudnev

PARAMETRICAL IDENTIFICATION OF A MULTIDIMENSIONAL NONLINEAR STATIONARY DYNAMIC SYSTEM IN PRESENCE OF AUTOCORRELATED HINDRANCES IN OUTPUT SIGNALS

Abstract.

Background. A large number of methods considering features of objects, conditions of their functioning, ways of testing and the mathematical basis of the obtained experimental data have been developed for estimation of parameters of nonlinear dynamic systems with hindrances in output signals. Depending on the aprioristic information on theobject of management one can distinguish problems of identification in narrow and broad senses. The problem of identification in a narrow sense consists in estimation of parameters and conditions of a system by results of supervision over the entrance and output variables received in operating conditions of the object. The author considered a problem of parametrical identification of nonlinear differential equations, multidimensional in the input and output, with hindrances in output signals.

Matherials and methods. The author adduced an algorithm that is a modification of a standard MNK for restoration of unknown parameters without essential increase of aprioristic information at application of the said method.

Results and conclusions. On the basis of the modified nonlinear method of the smallest squares the solvency of matrixes of parameters of the nonlinear differential equation is proved. Realization of the developed method of parametrical identification in a software product will permit to increase efficiency of automated control systems of technological processes, and also of mathematical modeling in technical areas of science.

Key words: parametrical identification, nonlinear dynamic system, consistent estimate, autocorrelated hindrances**,** presences in output signals.

Введение

Для решения многих задач на железнодорожном транспорте, таких как прогнозирование расхода электроэнергии, контроль функционального состояния машинистов, прогнозирование геометрических параметров рельсовой колеи, прогнозирование расхода топлива и т.д., применяются модели на основе разностных уравнений. Многие из этих задач нелинейные, в связи с чем возникает задача построения математических моделей на основе нелинейных разностных уравнений.

1. Постановка задачи

Рассмотрим многомерную стационарную нелинейную динамическую систему с дискретным временем $(i = \ldots -1,0,1\ldots)$, описываемую следующим уравнением:

$$Z_{i+1} = G_1^{(0)} Z_i + G_1^{(1)} Z_{i-1} + \ldots + G_1^{(r)} Z_{i-r} +$$

$$+ G_2^{(0)} \eta_0 (x_i) + G_2^{(1)} \eta_1 (x_{i-1}) + \ldots + G_2^{(r_1)} \eta_{r_1} (x_{i-r_1}), \qquad (1)$$

где $\eta_0 (x_i) = \begin{vmatrix} \eta_0^{(1)} \left(x_i^{(1)} \right) \\ . \\ . \\ . \\ \eta_0^{(m)} \left(x_i^{(m)} \right) \end{vmatrix}; \begin{vmatrix} \eta_{r_1}^{(1)} \left(x_{i-r_1}^{(1)} \right) \\ . \\ . \\ . \\ \eta_{r_1}^{(m)} \left(x_{i-r_1}^{(m)} \right) \end{vmatrix} = \eta_{(r_1)} \left(x_{i-r_1} \right),$

$$Y_i = Z_i + \Xi (i),$$

здесь Y_i, Z_i – наблюдаемые и ненаблюдаемые векторы выходных сигналов $\left(Z_i, Y_i \in R^n \right)$; X_i – наблюдаемые векторы входных сигналов $\left(x_i \in R^m \right)$.

Идентификация объекта сводится к процедуре определения матриц неизвестных параметров $G_1^{(1)}; \ldots G_2^{(r_1)}$ по $\{Y_i, X_i\}$ при известных порядках r и r_1 и является задачей параметрического оценивания.

2. Условия состоятельности оценок

В общем случае последовательность $\{\Xi(i)\}$ не является последовательностью независимых случайных векторов, поэтому представляет интерес случай аддитивных локальных автокоррелированных шумов в качестве наблюдений.

Пусть выполняются следующие условия:

1^0. Множество, которому априорно принадлежат истинные значения параметров устойчивой нелинейной многомерной системы, является компактом.

2^0. $\eta_k(x_{i-k})$, $k=\overline{0,r_1}$ не зависят от $\{\Xi(i)\}$.

3^0. Случайные последовательности $\{\Xi(i)\}$ удовлетворяют условиям:

$$E\left(\Xi(i)/F_{i-1}\right)=0 \text{ п.н.};$$

$$E\left(\Xi(0)\Xi^T(0)\right)=D>0;$$

$$N^{-1}\sum_{i=i_0}^{N}\Xi(i)\Xi^T(i+p)\underset{i\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}} h_\Xi(p)<\infty,\quad p=\overline{0,n},$$

$$F_{i-1}=\{(\Xi(i-1),\dots E(0)\};\ E\left(\Xi(i)\Xi^T(i)/F_{i-1}\right)\le W,$$

где W – случайная матрица; h_Ξ – матрица локальных автокоррелированных функций;

$$E(W)\le\pi.$$

4^0. Вектор входных сигналов X_i, векторы $\eta_0(x_i)\dots\eta_{r_1}(x_{i-r_1})$ и истинные параметры удовлетворяют следующему условию:

$$N^{-1}\begin{vmatrix} Z_i \\ \hline \vdots \\ \hline Z_{i-r} \\ \hline \eta_0(x_i) \\ \hline \vdots \\ \hline \eta_{r_1}(x_{i-r_1}) \end{vmatrix}\left|Z_i^T\vdots\cdots Z_{i-r}^T\vdots\eta_0^T(x_i)\vdots\cdots\eta_{r1}^T(x_{i-r_1})\right|_{i\to\infty}\underset{}{\to} H=\begin{vmatrix} H_{zz} & H_{z\eta} \\ \hline H^T{}_{z\eta} & H_{\eta n} \end{vmatrix},$$

где H – положительно определенная матрица.

5^0. Пусть $\Xi_r = \left(\Xi^T(i+1)\Xi^T(i),\ldots\Xi^T(i-r)\right)^T \in R_{n(r+2)\times 1}$,

$$N^{-1}\sum_{i=i_0}^{N}\Xi_r\Xi_r^T \overset{\text{п.н.}}{\underset{i\to\infty}{\to}} \left|\begin{array}{c|c} D & h_\Xi \\ -- & \\ h_\Xi^T & H_\Xi \end{array}\right|,$$

где h_Ξ имеет размерность $n\times n(r+1)$; H_Ξ: $n(r+1)\times n(r+1)$, H_Ξ – положительно определенные матрицы, элементы которых $n(r+1)$ являются значениями локальной автокоррелированной функции в различные моменты времени.

3. Доказательство состоятельности оценок

Уравнение (1) можно записать в виде

$$Y_{i+1} - \Xi(i+1) = G_1^{(0)}\left(Y_i - \Xi(i)\right) + \ldots + G_1^{(r)}\left(Y_{i-r} - \Xi(i-r)\right) +$$

$$+G_2^{(0)}\eta_0(x_i) + \ldots + G_2^{(r_1)}\eta_{r_1}\left(x_{i-r_1}\right), \qquad (2)$$

или

$$Y_{i+1} = G_1^{(0)}Y_i + \ldots + G_1^{(r)}Y_{i-r} + G_2^{(0)}\eta_0(x_i) + \ldots + G_2^{(r_1)}\eta_{r_1}\left(x_{i-r_1}\right) +$$

$$+\Xi(i+1) - G_1^{(0)}\Xi(i) - \ldots - G_1^{(r)}\Xi(i-r).$$

Представляем уравнение (2) в виде системы уравнений (2) $\left(j=\overline{1,n}\right)$:

$$y_{i+1}^{(j)} = b_{j\bullet}^{(0)}Y_i + \ldots + b_{j\bullet}^{(r)}Y_{i-r} + a_{j\bullet}^{(0)}\eta_0(x_i) + \ldots + a_{j\bullet}^{(0)}\eta_{r_1}\left(x_{i-r_1}\right) +$$

$$+\xi^{(j)}(i+1) - b_{j\bullet}^{(0)}\Xi(i) - \ldots - b_{j\bullet}^{(r)}\Xi(i-r), \qquad (3)$$

где $b_{j\bullet}^{(0)}$ – j-я строка матриц $G_1^{(0)}$; $a_{j\bullet}^{(r_1)}$ – j-я строка матриц $G_2^{(r_1)}$.

Уравнение (3) запишем следующим образом:

$$y_{i+1}^{(j)} = \left|\overline{b}_{j.}^{(0)} \vdots \overline{a}_{j.}^{(0)}\right| \left|\begin{array}{c} Y_r(i) \\ ---- \\ \overline{\eta}^{(r1)}(i) \end{array}\right| + \xi^j(i+1) - \overline{a}_{j.}^{(0)}\Xi_r;$$

где $\overline{b}_{j.}^{(0)} = \left|b_{j.}^{(0)} \vdots \cdots \vdots b_{j.}^{(r)}\right|$, $\overline{a}_{j.}^{(0)} = \left|a_{j.}^{(0)} \vdots \cdots \vdots a_{j.}^{(r)}\right|$,

$$Y_r(i) = \left|Y_i^T \vdots \cdots \vdots Y_{i-r}^T\right|^T,\ \overline{\eta}^{(r1)} = \left|\eta_0^T(x_i) \vdots \cdots \vdots \eta_{r_1}^T(x_{i-r_1})\right|^T.$$

Введем следующую обобщенную ошибку для *j*-уравнения:

$$e^{(j)}\left(\overline{b}_{j\cdot},\overline{a}_{j\cdot},i\right)=\xi^{(j)}\left(i+1\right)-\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\Xi_r(i)\,.$$

Из условий 3^0 и 5^0 следует, что обобщенная ошибка имеет нулевое среднее, а ее локальная дисперсия с вероятностью 1 равна

$$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}\left(e^{(j)}\left(\overline{b}_{j\cdot}^{(0)},\overline{a}_{j\cdot}^{(0)},i\right)\right)^2=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\xi^{(j)}\left(i+1\right)-\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\Xi_r(i)\right)^2=$$

$$=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\left(\xi^{(j)}\left(i+1\right)\right)^2+\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\Xi_r\left(i\right)\Xi_r^T\left(i\right)\left(\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\right)^T-2\xi^{(j)}\left(i+1\right)\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\Xi_r\left(i\right)\right)=$$

$$=\sigma_j^2+\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}H_{\Xi}\left(\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\right)^T-2h_{\Xi j\cdot}\left(\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\right)^T=\omega\left(\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\right)\text{ п.н.}$$

Определим оценки $\left|\hat{\overline{b}}_{j\cdot}\vdots\hat{\overline{a}}_{j\cdot}\right|$ неизвестных истинных значений параметров $\left|\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\vdots\overline{a}_{j\cdot}^{(0)}\right|$ из условия минимума суммы взвешенных квадратичных отклонений $e^{(j)}\left(\overline{b}_{j\cdot},\overline{a}_{j\cdot},i\right)$ с весом $\omega\left(\overline{b}_{j\cdot}\right)$ [1]:

$$\min_{\left|\begin{matrix}b_{j\bullet}\\---\\a_{j\bullet}\end{matrix}\right|\in\tilde{B}}\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\mathrm{y}_{i+1}^{(j)}-\left|b_{j\bullet}\vdots a_{j\bullet}\right|\left|\begin{matrix}Y_{\mathrm{r}}(i)\\---\\\eta_{\mathrm{r_1}}(i)\end{matrix}\right|\right)^2}{\sigma_j^2+b_{j\bullet}D\left(b_{j\bullet}\right)^T}b_{j\bullet}^{(r)}Y_{i-r}+a_{j\bullet}^{(0)}\,.\qquad(4)$$

Справедливо следующее утверждение.

Пусть стационарная нелинейная динамическая система с нулевыми начальными условиями описывается уравнением (1) и помехи удовлетворяют условиям $2^0,3^0,5^0$. Кроме того, истинные значения параметров $\left|\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\vdots\overline{a}_{j\cdot}^{(0)}\right|$ и входные сигналы удовлетворяют условиям 1^0, 4^0. Тогда оценка $\left|\hat{\overline{b}}_{j\cdot}\vdots\hat{\overline{a}}_{j\cdot}\right|$, определяемая выражением (4), при $N\to\infty$ существует и является сильно состоятельной оценкой, т.е. $\left|\hat{\overline{b}}_{j\cdot}\vdots\hat{\overline{a}}_{j\cdot}\right|\underset{N\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}}\left|\overline{b}_{j\cdot}^{(0)}\vdots\overline{a}_{j\cdot}^{(0)}\right|$.

Доказательство утверждения. Рассмотрим функцию

$$\frac{1}{N}U_N\left(\overline{b}_{j\bullet}\vdots\overline{a}_{j\bullet}\right)=\frac{1}{N}\left(y_{i+1}^{(j)}-\left|\overline{b}_{j\bullet}\vdots\overline{a}_{j\bullet}\right|\left|\begin{matrix}Y_r(i)\\---\\\overline{\eta}^{(r_1)}(i)\end{matrix}\right|\right)^2=$$

$$= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Z_{i+1}^{(j)} + \xi^{(j)}(i+1) - \left(Z_r^T(i) + \Xi_r^T(i)\right)\left(\bar{b}_{j\bullet}\right)^{\mathrm{T}} - \left(\bar{\eta}^{(r_1)}\right)^T(i)\left(\bar{a}_{j\bullet}\right)^{\mathrm{T}}\right)^2 =$$

$$= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\xi^{(j)}(i+1) + Z_r^T(i)\left(\bar{b}_{j\bullet}^{(0)}\right)^{\mathrm{T}} + \left(\bar{\eta}^{(r_1)}\right)^T(i)\left(\bar{a}_{j\bullet}^{(0)}\right)^{\mathrm{T}} - \right.$$

$$\left. - \left(Z_r^T(i) + \Xi_r^T(i)\right)\left(\bar{b}_{j\bullet}\right)^{\mathrm{T}} - \left(\bar{\eta}^{(r_1)}\right)^T(i)\left(\bar{a}_{j\bullet}\right)^{\mathrm{T}}\right)^2 =$$

$$= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\xi_1^{(j)}(i+1) - Z_r^T(i)\left(\tilde{b}_{j\bullet}\right)^{\mathrm{T}} - \left(\bar{\eta}^{(r_1)}\right)^T(i)\left(\tilde{a}_{j\bullet}\right)^{\mathrm{T}} - \Xi_r^T(i)\left(\bar{b}_{j\bullet}\right)^{\mathrm{T}}\right)^2 =$$

$$= \nu_1 + \nu_2 + \nu_3;$$

где

$$\Xi_r = \left|\Xi^T(i) \vdots \cdots \vdots \Xi^T(i-r)\right|^T,\ \tilde{b}_{j\bullet} = \tilde{b}_{j\bullet} - \tilde{b}_{j\bullet}^{(0)},\ \tilde{a}_{j\bullet} = \tilde{a}_{j\bullet} - \tilde{a}_{j\bullet}^{(0)};$$

$$\nu_1 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\xi_1^{(j)}(i+1)\right)^2 + \bar{b}_{j\cdot}\Xi_r\Xi_r^T\bar{b}_{j\cdot}^T - 2\xi^{(j)}(i+1)\Xi_r^T\bar{b}_{j\cdot}^T;$$

$$\nu_2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\tilde{b}_{j\cdot} \vdots \tilde{a}_{j\cdot}\right|\left|Z_r^T(i) \vdots \bar{\eta}^{(r_1)T}(i)\right|^T\left|Z_r^T(i) \vdots \bar{\eta}^{(r_1)T}(i)\right|\left|\tilde{b}_{j\cdot} \vdots \tilde{a}_{j\cdot}\right|^T;$$

$$\nu_3 = 2\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(-\xi_1^{(j)}(i+1)Z_r^T(i)\tilde{b}_{j\cdot}^T - \xi^{(j)}(i+1)\bar{\eta}^{(r_1)T}(i)\tilde{a}_{j\cdot}^T + \right.$$

$$\left. + \bar{b}_{j\cdot}\Xi_r(i)Z_r^T(i)\tilde{b}_{j\cdot}^T + \bar{b}_{j\cdot}\Xi_r(i)\bar{\eta}^{(r_1)T}\tilde{a}_{j\cdot}^T\right).$$

Тогда из условий 3^0 и 5^0 получим, что

$$\nu_1 \underset{N\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}} \sigma_j^2 + \bar{b}_{j\cdot}H_\Xi\bar{b}_{j\cdot}^T - 2h_{\Xi j\cdot}\bar{b}_{j\cdot}^T,\ \forall\left|\bar{b}_{j\cdot} \vdots \bar{a}_{j\cdot}\right| \in \tilde{B}.$$

Из условия 4^0 следует, что

$$\nu_2 \underset{N\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}} \left|\tilde{b}_{j\cdot} \vdots \tilde{a}_{j\cdot}\right| H \left|\tilde{b}_{j\cdot} \vdots \tilde{a}_{j\cdot}\right|^T,\ \forall\left|\bar{b}_{j\cdot} \vdots \bar{a}_{j\cdot}\right| \in \tilde{B}.$$

Первые два слагаемых в ν_3. в силу условий $2^0, 3^0, 4^0$ удовлетворяют условиям леммы [2] и, следовательно:

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(-\xi^{(j)}(i+1)Z_r^T(i)\tilde{b}_{j.}^T\right)\underset{N\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}}0,\ \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(-\xi_1^{(j)}(i+1)\overline{\eta}^{(r_1)T}\tilde{a}_{j.}^T\right)\underset{N\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}}0.$$

Заметим, что

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overline{b}_{j.}\Xi_r(i)Z_r^T\tilde{b}_{j.}^T=N^{-1}\sum_{i=1}^{N}\overline{b}_{j.}\begin{vmatrix}\Xi(i)Z_i^T & \cdots & \Xi(i)Z^T(i-r)\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \Xi(i-r)Z_i^T & \cdots & \Xi(i-r)Z^T(i-r)\end{vmatrix}\tilde{b}_{j.}^T. \quad (5)$$

Таким образом, (5) можно представить в виде $(r+1)^2$ слагаемых, каждое из которых в силу предположений $2^0,3^0,4^0$ по лемме [2] сходится к нулю.

Аналогично доказывается сходимость к нулю остальных слагаемых ν_3, т.е.

$$\nu_3\underset{N\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}}0,\ \forall\left|\overline{b}_{j.}\vdots\overline{a}_{j.}\right|\in\tilde{B},$$

и, следовательно,

$$\frac{1}{N}U_N\left(\overline{b}_{j.},\overline{a}_{j.}\right)\underset{N\to\infty}{\overset{\text{п.н.}}{\to}}\sigma_j^2+\overline{b}_{j.}H_\Xi\overline{b}_{j.}^T-$$

$$-2h_{\Xi j.}\overline{b}_{j.}^T+\left|\tilde{b}_{j.}\vdots\tilde{a}_{j.}\right|H\left|\tilde{b}_{j.}\vdots\tilde{a}_{j.}\right|^T=\overline{U}\left(\overline{b}_{j.},\overline{a}_{j.}\right),$$

или

$$\overline{U}\left(\overline{b}_{j.},\overline{a}_{j.}\right)=\sigma_j^2+\left|\overline{b}_{j.}\vdots\overline{a}_{j.}\right|\begin{vmatrix}H_{zz}+H_\Xi & H_{z\eta}\\ H^T{}_{z\eta} & H_{\eta n}\end{vmatrix}\left|\overline{b}_{j.}\vdots\overline{a}_{j.}\right|^T+$$

$$+\left|\overline{b}_{j.}^{(0)}\vdots\overline{a}_{j.}^{(0)}\right|H\left|\overline{b}_{j.}\vdots\overline{a}_{j.}\right|-2\begin{vmatrix}H_{zz}\left(\overline{b}_{j.}^{(0)}\right)^T+H_{z\eta}\left(\overline{a}_{j.}^{(0)}\right)^T+h_{\Xi j.}^T\\ H_{z\eta}\left(\overline{b}_{j.}^{(0)}\right)^T+H_{\eta\eta}\left(\overline{a}_{j.}^{(0)}\right)^T\end{vmatrix}^T\left|\overline{b}_{j.}\vdots\overline{a}_{j.}\right|^T.$$

Покажем, что решение задачи

$$\min\omega^{-1}\left(\overline{b}_{j.},\overline{a}_{j.}\right)\overline{U}\left(\overline{b}_{j.},\overline{a}_{j.}\right) \quad (6)$$

существует и достигается в единственной точке. Для этого вместе с задачей (6) рассмотрим функцию

$$V\left(\bar{b}_{j.},\bar{a}_{j.},\theta^{(j)}\right)=\bar{U}\left(\bar{b}_{j.},\bar{a}_{j.}\right)-\theta^{(j)}\omega\left(\bar{b}_{j.},\bar{a}_{j.}\right),\ \theta^{(j)}\in R_1,$$

$$V\left(\theta^{(j)}\right)=\min_{\left|\bar{b}_{j.}\vdots\bar{a}_{j.}\right|\epsilon\tilde{B}}V\left(\bar{b}_{j.},\bar{a}_{j.},\theta^{(j)}\right),$$

тогда

$$V\left(\bar{b}_{j.},\bar{a}_{j.},\theta^{(j)}\right)=\sigma_j^2\left(1-\theta^{(j)}\right)+\left|\bar{b}_{j.}^{(0)}\vdots\bar{a}_{j.}^{(0)}\right|H\left|\bar{b}_{j.}^{(0)}\vdots\bar{a}_{j.}^{(0)}\right|^T+$$

$$+\left|\bar{b}_{j.}\vdots\bar{a}_{j.}\right|\begin{vmatrix}H_{zz}+H_{\Xi}-\theta^{(j)}H_{\Xi} & \vdots H_{z\eta}\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & \cdots\cdots\\ H^T{}_{z\eta} & \vdots H_{\eta\eta}\end{vmatrix}\left|\bar{b}_{j.}\vdots\bar{a}_{j.}\right|^T-$$

$$-2\begin{vmatrix}H_{zz}\left(\bar{b}_{j.}^{(0)}\right)^T+H_{z\eta}\left(\bar{a}_{j.}^{(0)}\right)^T+\left(1-\theta^{(j)}\right)h_{\Xi j.}^T\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ H_{z\eta}{}^T\left(\bar{b}_{j.}^{(0)}\right)^T+H_{\eta\eta}\left(\bar{a}_{j.}^{(0)}\right)^T\end{vmatrix}^T\left|\bar{b}_{j.}\vdots\bar{a}_{j.}\right|^T.$$

Дифференцируя $V\left(\bar{b}_{j.},\bar{a}_{j.},\theta^{(j)}\right)$ по $\left|\bar{b}_{j.}\vdots\bar{a}_{j.}\right|$ и приравнивая производную к нулю, получим

$$\left|\bar{b}_{j.}\left(\theta^{(j)}\right)\vdots\bar{a}_{j.}\left(\theta^{(j)}\right)\right|^T=\left|H+H_{\Xi}-\theta^{(j)}H_{\Xi}\right|^{-1}\times$$

$$\times\begin{vmatrix}H_{zz}\bar{b}_{j.}^{(0)T}+H_{z\eta}\bar{a}_{j.}^{(0)T}+\left(1-\Theta^{(j)}\right)h_{\Xi j.}^T\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ H_{z\eta}{}^T\bar{b}_{j.}^{(0)T}+H_{\eta\eta}\bar{a}_{j.}^{(0)T}\end{vmatrix},$$

тогда

$$V\left(\theta^{(j)}\right)=\sigma_j^2\left(1-\theta^{(j)}\right)+\left|\bar{b}_{j.}^{(0)}\vdots\bar{a}_{j.}^{(0)}\right|H\left|\bar{b}_{j.}^{(0)}\vdots\bar{a}_{j.}^{(0)}\right|^T-$$

$$-\begin{vmatrix}H_{zz}\left(\bar{b}_{j.}^{(0)}\right)^T+H_{z\eta}\left(\bar{a}_{j.}^{(0)}\right)^T+\left(1-\theta^{(j)}\right)h_{\Xi j.}^T\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ H_{z\eta}{}^T\left(\bar{b}_{j.}^{(0)}\right)^T+H_{\eta\eta}\left(\bar{a}_{j.}^{(0)}\right)^T\end{vmatrix}^T\begin{vmatrix}H_{zz}+H_{\Xi}-\theta^{(j)}H_{\Xi} & \vdots H_{z\eta}\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & \cdots\cdots\\ H^T{}_{z\eta} & \vdots H_{\eta\eta}\end{vmatrix}^{-1}\times$$

$$\times \begin{vmatrix} H_{zz}\left(\bar{b}_{j.}^{(0)}\right)^T + H_{z\eta}\left(\bar{a}_{j.}^{(0)}\right)^T + \left(1-\theta^{(j)}\right)h_{\Xi j.}^T \\ ---------- \\ H_{z\eta}{}^T\left(\bar{b}_{j.}^{(0)}\right)^T + H_{\eta\eta}\left(\bar{a}_{j.}^{(0)}\right)^T \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что уравнение $V\left(\theta^{(j)}\right)=0$ на интервале $\left(-\infty,\ \lambda_{\min}+1\right)$ имеет корень $\tilde{\theta}^{(j)}=1$, если $\lambda_{\min}$ – наименьшее собственное число, определяемое положительно определенными матрицами H, H_{Ξ}, то $\lambda_{\min}>0$ [3]. Этот корень единственный, что вытекает из непрерывности функции $V\left(\theta^{(j)}\right)$ и на $\left(-\infty,\ \lambda_{\min}\right)$, $\dot{V}\left(\theta^{(j)}\right)<0$, тогда из (7) непосредственно следует (6).

В дальнейшем ход доказательства практически полностью аналогичен доказательству при условии, что $n = m = 1$.

Заключение

На основе данной статьи было создано прикладное программное обеспечение, которое позволит получать состоятельные оценки математических моделей прогноза потребления ресурсов на железной дороге.

Список литературы

1. **Кацюба, О. А.** Идентификация по методу наименьших квадратов параметров уравнений авторегрессии при аддитивных ошибках измерений / О. А. Кацюба, А. И. Жданов // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 2. – С. 29–38.
2. **Кацюба, О. А.** Особенности применения МНК для оценивания линейных разностных операторов в задачах идентификации объектов управления / О. А. Кацюба, А. И. Жданов // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 8. – С. 86–95.
3. **Гантмахер, Ф. Р.** Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Физматлит, 2010. – 576 с.

References

1. Katsyuba O. A., Zhdanov A. I. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and remote control]. 1982, no. 2, pp. 29–38.
2. Katsyuba O. A., Zhdanov A. I. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and remote control]. 1979, no. 8, pp. 86–95.
3. Gantmakher F. R. *Teoriya matrits* [The matrix theory]. Moscow: Fizmatlit, 2010. – 576 p.

Руднев Кирилл Константинович
аспирант, Самарский государственный университет путей сообщения (Россия, г. Самара, 1-й Безымянный переулок, 18)

Rudnev Kirill Konstantinovich
Postgraduate student, Samara State University of Communication Lines (18, 1-y Bezymyanniy lane, Samara, Russia)

E-mail: KiRudnev@gmail.com

УДК 519.254

Руднев, К. К.

Параметрическая идентификация многомерной нелинейной стационарной динамической системы при наличии автокоррелированных помех в выходных сигналах / К. К. Руднев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 14–23.

УДК 519.672

А. А. Авакян, Н. К. Юрков, А. В. Соломин

МОНИТОРИНГ ИНТЕРФЕЙСНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ СИСТЕМ АВИОНИКИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Важным элементом отказоустойчивых систем с управляемой избыточностью является мониторинг рабочего состояния. Рассматриваются такие проблемы мониторинга, как методы контроля, обеспечивающие необходимую полноту и достоверность контроля, глубину контроля, достаточную для проведения реконфигурации системы при парировании обнаруженных отказов и сбоев, а также ограничения продолжительности контроля устройств, на которых реализованы критические функции.

Материалы и методы. Задачей мониторинга рабочего состояния является контроль исправного функционирования системы с локализацией отказавшей области, для которой существует избыточный элемент. Определяется коэффициент полноты контроля, обеспечивающий заданную вероятность неконтролируемого отказа устройства, связывающего вероятность неконтролируемого отказа с величиной коэффициента полноты контроля устройства. В качестве критерия контроля выбирается совпадение всех бит в сравниваемых сообщениях со значением параметра, при этом возникает множество ошибок первого и второго рода из-за неизбежных шумовых флюктуаций в трактах.

Результаты и выводы. Данный метод контроля требует строгой синхронизации последовательности сообщений в сравниваемых трактах. В качестве избыточного элемента в данном случае будут пониматься не только избыточные элементы автоматического восстановления, но и запасные элементы для восстановления системы посредством ее ремонта.

Ключевые слова: мониторинг, контроль, избыточность, отказ, сбой, реконфигурация системы.

A. A. Avakyan, N. K. Yurkov, A. V. Solomin

MONITORING OF INTERFACE-COMPUTING TRACTS OF THE AVIONICS SYSTEMS

Abstract.

Background. An important element of fault-tolerant systems with controlled redundancy is the operating status monitorung. The article considers the issues such as monitoring control methods that provide the necessary completeness and accuracy of control, depth control, sufficient for system reconfiguration when parrying detected failures and crashes, as well as limiting the duration of control devices, at which the critical functions are implemented.

Materials and methods. The objective of the operating status monitoring is to control correct system operation with localization of the failed areas for which there is an abundant element. The authors determined the coefficient of control completeness, ensuring the given probability of uncontrolled device failures, uncontrolled failure probability of binding to the magnitude of the coefficient of device control fullness. As a criterion of control the authors choose the concurrence of all selected bits in the compared messagess with the parameter values, at the same time there is a lot of errors of the first and second kind of noise due to the inevitable fluctuations in the tracts.

Results and conclusions. The given control method requires strict synchronization of the message sequence in the compared tracts. As a redundant element in this case one shal understand not just redundant elements of automatic recovery, but also spare elements for system's restoration through its repair.

Key words: monitoring, control, redundancy, failure, malfunction, system reconfiguration.

Введение

Задачей мониторинга рабочего состояния является контроль исправного функционирования системы с локализацией отказавшей области, для которой существует избыточный элемент. Под избыточным элементом в данном случае будем понимать не только избыточные элементы автоматического восстановления, но и запасные элементы для восстановления системы посредством ее ремонта.

Определим необходимые характеристики элемента контроля состояния системы: глубину, достоверность и полноту контроля:

– глубина контроля должна быть такой, чтобы отказ был локализован областью, для которой существует избыточный элемент (встроенный или находящийся в ремонтном запасном имуществе);

– достоверность контроля;

– полнота контроля должна быть такой, чтобы вероятность неконтролируемого отказа не превышала норму на вероятность неконтролируемого отказа, заданную в нормах летной годности и в нормах регулярности полетов.

Для определения коэффициента полноты контроля, обеспечивающего заданную вероятность неконтролируемого отказа устройства, выведем формулу, связывающую вероятность неконтролируемого отказа с величиной коэффициента полноты контроля устройства. При этом будем предполагать наличие двух следующих видов контроля:

– тестовый;

– контроль дополнительными методами, обеспечивающими заданную в нормах летной годности [1] вероятность неконтролируемого отказа.

1. Постановка задачи

Введем обозначения.

1. Коэффициент полноты тестового контроля η_T, равный отношению количества отказов n_T, выявляемых при тестовом контроле к общему количеству отказов N:

$$\eta_T = \frac{n_T}{N} \quad 0 \le \eta_T \le 1. \tag{1}$$

Коэффициент полноты контроля дополнительными методами η_d, равный отношению количества отказов n_d, выявляемых дополнительными методами контроля к общему количеству отказов N:

$$\eta_d = \frac{n_d}{N} \quad 0 \le \eta_d \le 1. \tag{2}$$

Коэффициент ложного тестового контроля η_{LT}, равный отношению количества ложно определенных отказов при тестовом контроле n_{LT} к общему количеству отказов N:

$$\eta_{LT} = \frac{n_{LT}}{N} \quad 0 \le \eta_{LT} \le 1. \tag{3}$$

2. Коэффициент ложного допускового контроля η_{Ld}, равный отношению количества ложно определенных отказов при допусковом контроле n_{LT} к общему количеству отказов N:

$$\eta_{Ld} = \frac{n_{Ld}}{N} \quad 0 \le \eta_{Ld} \le 1. \tag{4}$$

Поскольку поток отказов изделий электроники является пуассоновским, то вероятность возникновения отказа изделия за период t будет равна

$$P = 1 - e^{-\lambda t}, \tag{5}$$

где λ – интенсивность отказов.

При малых значениях величины λ (менее 10^{-2} отказа в час) формула (3) может быть преобразована следующим образом:

$$P = \lambda t. \tag{6}$$

При t, равном одному часу, вероятность отказа (6) численно равна количеству отказов изделия за час, поскольку интенсивность отказов есть количество отказов изделия за единицу времени.

На основании выражения (6) выражение (1) можно преобразовать к следующему виду:

$$\eta_T = \frac{PT}{P_N} = \frac{PT}{PT + P_{nT}}, \tag{7}$$

где P_T – вероятность контролируемого тестовым контролем отказа устройства; P_N – вероятность контролируемого и неконтролируемого отказов устройства; P_{nm} – вероятность неконтролируемого тестовым контролем отказа устройства.

Преобразуем выражение (7) относительно вероятности неконтролируемого тестовым контролем отказа P_{nm}:

$$P_{nT}\eta_T = P_T - P_T\eta_T = P_T(1 - \eta_T),$$

откуда

$$P_{nT} = \frac{P_T(1 - \eta_T)}{\eta_T}.$$

Поскольку $\eta_T = \frac{P_T}{P_N}$, то P_{nT} будет равно

$$P_{nT} = P_N(1 - \eta_T). \tag{8}$$

На основании выражения (7) выражение (4) можно преобразовать к следующему виду:

$$\eta_{LT} = \frac{P_{LT}}{P_N} = \frac{P_{LT}}{P_{NLT} - P_{LT}}, \quad (9)$$

где P_{LT} – вероятность ложного при тестовом контроле отказа устройства; P_{NLT} – вероятность контролируемого, неконтролируемого и ложного при тестовом контроле отказов устройства; P_{NT} – вероятность неконтролируемого тестовым контролем отказа устройства.

Преобразуем выражение (9) относительно вероятности ложного отказа при тестовом контроле P_{LT}:

$$P_{NLT}\eta_{LT} = P_{LT} + P_{LT}\eta_{LT} = P_{LT}(1+\eta_{LT}),$$

откуда получим

$$P_{NLT} = P_N(1+\eta_{LT}),\ P_N = \frac{P_{NLT}}{(1+\eta_{LT})}. \quad (10)$$

Подставив P_N из (10) в (8), получим выражение для неконтролируемого отказа при тестовом контроле с учетом ложных отказов:

$$P_{nT} = P_{NLT}\frac{(1-\eta_T)}{(1+\eta_{LT})} = P_N\frac{(1-\eta_T)}{(1+\eta_{LT})} + P_{LT}\frac{(1-\eta_T)}{(1+\eta_{LT})}. \quad (11)$$

Формула (11) позволяет оценить возможности тестового контроля. В частности, ответить на вопрос: можно ли методами тестового контроля достигнуть величины вероятности неконтролируемого отказа 10^{-9} и удовлетворить требованиям норм летной годности [1, с. 14]. С этой целью найдем пессимистическую, максимально возможную нижнюю оценку вероятности неконтролируемого отказа при проведении только тестового контроля. Практика показывает:

– максимальный коэффициент тестового контроля может достигать величин $\eta_T < 0{,}98$;

– вероятность контролируемого и неконтролируемого отказов достаточно сложного электронного устройства $P_N < 10^{-4}$;

– коэффициент полноты ложного тестового контроля $\eta_{LT} < 0{,}2$;

– вероятность ложного отказа при самой низкой достоверности контроля не может превышать величины $P_{LT} = P_N\eta_{LT} < 2\cdot 10^{-5}$.

Подставив эти величины в формулу (11), получим вероятность неконтролируемого отказа, равную $P_{nm} = 2\cdot 10^{-6}$. Как видно из этой оценки, тестовый контроль не позволяет получить вероятность неконтролируемого отказа с величиной, удовлетворяющей нормы летной годности. Следовательно, необходимы методы дополнительного контроля, позволяющие довести полноту контроля до величин, необходимых для получения вероятности неконтролируемого отказа менее 10^{-9}.

Обозначим коэффициент полноты дополнительного контроля через η_d. Оценим необходимую величину полноты η_d для получения вероятности неконтролируемого отказа менее $P_{nd} < 10^{-9}$.

Аналогично (8) коэффициент полноты дополнительного контроля η_d будет равен отношению вероятности контролируемого дополнительным методом контроля к вероятности неконтролируемого тестовым методом контроля [2]:

$$\eta_d = \frac{P_d}{P_N} = \frac{P_d}{P_d + P_{nd}}, \tag{12}$$

где P_d – вероятность контролируемого дополнительным контролем отказа устройства; P_{nd} – вероятность неконтролируемого дополнительным контролем отказа устройства.

Производя вывод, аналогичный выводу вероятности неконтролируемого тестовым контролем отказа, относительно вероятности неконтролируемого дополнительным методом контроля получим следующее выражение для P_{nd}:

$$P_{nd} = P_{NLd}\frac{(1-\eta_d)}{(1+\eta_{Ld})} = P_N\frac{(1-\eta_d)}{(1+\eta_{Ld})} + P_{Ld}\frac{(1-\eta_d)}{(1+\eta_{Ld})}, \tag{13}$$

где P_{NLd} – вероятность контролируемого, неконтролируемого и ложного контроля отказа при дополнительном методе контроля устройства; P_{Ld} – вероятность ложного отказа устройства при дополнительном методе контроля устройства; η_d – коэффициент полноты контроля дополнительным методом; η_{Ld} – коэффициент полноты ложного контроля дополнительным методом.

Из выражения (13) найдем выражение для коэффициента полноты контроля дополнительным методом η_d:

$$\eta_d = 1 - \frac{P_{nd}}{P_{NLd}}(1-\eta_{Ld}) = 1 - \frac{P_{nd}}{P_N + P_{Ld}}(1-\eta_{Ld}). \tag{14}$$

Аналогично (9) η_{Ld} равен:

$$\eta_{Ld} = \frac{P_{Ld}}{P_N} = \frac{P_{Ld}}{P_{NLd} - P_{Ld}},$$

откуда

$$P_{Ld} = \eta_{Ld} P_N. \tag{15}$$

Подставив (7) в (6), получим

$$\eta_d = 1 - \frac{P_{nd}}{P_N}\frac{(1-\eta_{Ld})}{(1+\eta_{Ld})}. \tag{16}$$

Подставим в формулу (16) следующие величины:

– вероятность неконтролируемого дополнительным контролем отказа устройства $P_{nd} < 10^{-9}$ (норма летной годности для катастрофической ситуации [3]);

– вероятность контролируемого и неконтролируемого отказов достаточно сложного электронного устройства $P_N < 10^{-4}$;

– коэффициент полноты ложного контроля при дополнительном методе контроля $\eta_{LT} < 0,2$.

В результате вычисления получим следующую величину коэффициента полноты контроля дополнительными методами, которая обеспечит вероятности неконтролируемого отказа 10^{-9}; равную $\eta_d = 0,9999975$. Такая величина контроля, близкая к единице, означает, что для выполнения норм летной годности у устройств, в которых реализованы критические функции, должны контролироваться практически все элементы.

Выше было показано, что с помощью тестового контроля можно достичь полноты контроля с коэффициентом не более $\eta_T < 0,98$. При этом вероятность неконтролируемого отказа будет более $P_{nm} > 2 \cdot 10^{-6}$. Поскольку такая вероятность неконтролируемого отказа не удовлетворяет нормам летной годности, предъявляемым к устройствам, на которых реализованы функции, отказы которых могут привести к катастрофической ситуации, то необходимо применять методы контроля, обеспечивающие контроль с коэффициентом, близким к единице.

Рассмотрим один из методов такого контроля применительно к наиболее сложному типовому устройству интерфейсно-вычислительного тракта. Метод мажоритарного контроля сигналов, несущих информацию о параметрах, прошедших через весь интерфейсно вычислительный тракт (эхосигнал), путем сравнения значения критического параметра, например параметра, определяющего пространственное положение летательного аппарата. Проведя контроль посредством сравнения эхосигналов двух трактов по всем интерфейсам, реализованным в данном устройстве, можно гарантировать полноту контроля, близкую к единице. Осуществив такой контроль мажоритарно, т.е. путем попарного сравнения трех и более интерфейсно вычислительных трактов, можно определить неисправный тракт.

Основной проблемой при таком методе контроля является выбор критерия сравнения сигналов. Не претендуя на полноту, рассмотрим ряд наиболее часто применяемых критериев сравнения информации.

Побитное сравнение

При этом методе производится сравнение слов по каждому биту на выходе двух интерфейсно-вычислительных трактов.

Преимущества побитного сравнения:

– процедура сравнения производится непрерывно по каждому слову, практически мгновенно, и не требует прерывания вычислительного процесса;

– процедура более чувствительна к любым искажениям информации в одном из сравниваемых трактов;

– поскольку информация каждого бита может иметь только два численных значения 0 или 1, то попарное сравнение информации на выходах трех интерфейсно-вычислительных трактов будет иметь однозначный результат с информацией об отказавшем тракте.

Недостатки побитного сравнения:

– высокая чувствительность к малым информационным искажениям, не влияющим на точность информации;

– побитный мажоритарный контроль возможен только при сравнении бит одинаковых слов, т.е. информация на выходе сравниваемых трактов должна быть синхронизирована.

Допусковое сравнение

При этом методе критерием сравнения является допуск на точность значения параметра.

Преимущества допускового сравнения:

– процедура сравнения производится непрерывно по каждому слову, практически мгновенно, и не требует прерывания вычислительного процесса;

– процедура не чувствительна к несущественным искажениям информации в пределах допуска.

Недостатком допускового сравнения является зависимость эффективности контроля от величины допуска. Если этот допуск является большим, то некоторые отказы могут не выявляться из-за ошибок первого рода, если же допуск небольшой, то могут возникать ложные отказы (ошибки второго рода).

Кроме того, этот метод контроля нечувствителен к отказам вида «замораживание параметра», когда после возникновения отказа значение параметра в тракте не изменяется. Если при этом фактическое значение параметра изменяется в рамках допуска, то отказ не будет выявлен.

Если в качестве критерия контроля выбирается совпадение всех бит в сравниваемых сообщениях со значением параметра, то возникает множество ошибок первого и второго рода из-за неизбежных шумовых флюктуаций в трактах. Кроме того, этот метод контроля требует строгой синхронизации последовательности сообщений в сравниваемых трактах.

От недостатков перечисленных выше методов свободны методы, при которых сравниваются значения параметров не отдельных сообщений, а характеристики параметров статистики сообщений, т.е. интегральный параметр.

Наиболее эффективным, как будет показано ниже, из этих методов является метод сравнения доверительных интервалов на остаточную дисперсию регрессии [3] случайного процесса изменения сравниваемых параметров. Остаточная дисперсия регрессии не зависит от изменения значений параметров, а доверительный интервал на нее не зависит от случайных флюктуаций и чувствителен только к отказам.

Контроль с помощью регрессионного фильтра

Опишем математику построения регрессионного фильтра, с помощью которого можно получить доверительный интервал на остаточную дисперсию случайного процесса изменения значений параметра.

На рассматриваемый случайный процесс наложим дополнительно следующие ограничения, которые имеют место в реальных процессах:

А) Значения случайного процесса известны только для моментов измерения параметров $t(i)$ (где $i = 1, 2, 3\ldots$), т.е. имеет место не случайный непрерывный процесс, а дискретный.

Б) В областях, где отсутствуют переходные процессы, случайные процессы обладают свойством эргодичности [1].

Обозначим случайный процесс изменения параметра через $W(t)$. Введем понятие интервала эргодичности $T_Э$, как интервала, который может находиться в любой временной области и содержит характеристики о процессе, равные характеристикам, определенным на любом другом интервале, большем $T_Э$. Тогда условия эргодичности случайного процесса $W(t)$ можно записать следующим образом:

$$W_i(t) = \lim_{T_Э \to \infty} \frac{1}{T_Э} \int_0^{T_Э} [w(t) - w_i][w(t+i) - w_i]dt,$$

$W(t)$ – процесс является эргодическим на интервалах:

$$t(i + N) - t(i) \geq T_Э, \tag{17}$$

где N – число точек интервала эргодичности.

Воспользуемся условием (17) для создания ансамбля реализаций синтезированного случайного процесса (назовем его условным), адекватного реальному процессу, состоящему из одной реализации. В качестве первой реализации нового процесса возьмем любой интервал реального процесса, больший, чем $T_Э$, который в реальном процессе ограничен следующими текущими моментами:

$$(t_1(n) - t_1(1))C \geq T_Э(2), \tag{18}$$

где $t_1(1)$ – момент начала формирования первой реализации и всего ансамбля; $t_1(n)$ – момент конца формирования первой реализации ансамбля реализаций; n – число точек (измерений в одной реализации); c – число реализаций.

Если ансамбль состоит из C реализаций, то интервалы всего ансамбля могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} &t_1(n) - t_1(1), \\ &t_2(n) - t_2(1), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &t_c(n) - t_c(1). \end{aligned} \tag{19}$$

Для определенного нами условного случайного процесса сформируем матрицу значений случайного процесса в описанных выше точках:

$$W(t) = \begin{vmatrix} W_1(t_1) & W_1(t_2) & \ldots & W_1(t_j) & \ldots & W_1(t_n) \\ W_2(t_1) & W_2(t_2) & \ldots & W_2(t_j) & \ldots & W_2(t_n) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ W_j(t_1) & W_j(t_2) & \ldots & W_j(t_j) & \ldots & W_j(t_n) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ W_c(t_1) & W_c(t_2) & \ldots & W_c(t_j) & \ldots & W_c(t_n) \end{vmatrix}. \tag{20}$$

Из этого ансамбля интервалов видно, что последняя точка условного процесса $t_c(n)$ соответствует точке (моменту измерения) $t(N = cn)$ реального процесса. Введем понятие периода интегрирования случайного процесса T_{in}, равного периоду от момента первой точки матрицы (20) $t_1(1)$ до момента последней точки этой матрицы $t_c(n)$. Поскольку оценка доверительного интервала на остаточную дисперсию будет вычисляться по матрице (20), то протяженность этого интервала должна быть такой, чтобы оценка была достоверной. Для того чтобы получить достоверную оценку, этот интервал должен быть больше интервала эргодичности $T_Э$ (условие (18)).

Кроме того, чтобы парировать отказ, который может иметь катастрофические последствия, интервал интегрирования не должен превышать одной секунды (катастрофическая ситуация развивается, как минимум, в течение одной секунды). Следовательно, для получения эффективных оценок по ансамблю реализаций, в частности доверительного интервала на остаточную дисперсию, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$1 \text{ с} \geq T_{\text{in}} \geq (t_1(n) - t_1(1))C \geq T_Э(5). \qquad (21)$$

Введем следующее дополнительное ограничение на условный случайный процесс. Случайные числа (значения измеренного параметра), входящие в матрицу (20), подчиняются любому многомерному распределению, у которого все моменты, выше второго, равны нулю. Наиболее типичным распределением такого типа является многомерное нормальное распределение [3].

Рассмотрим операции над значениями матрицы (20) для получения оценок промежуточных величин, являющихся аргументами функций регрессии случайного процесса, остаточной дисперсии и доверительного интервала на нее.

По этой матрице (20) определим ковариационную (22) и корреляционную матрицы (23):

$$K = \begin{vmatrix} k_1,1 & k_1,2 & \dots & k_1,j & \dots & k_1,n \\ k_2,1 & k_2,2 & \dots & k_2,j & \dots & k_1,n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_j,1 & k_j,2 & \dots & k_j,j & \dots & k_j,n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_n,1 & k_n,2 & \dots & k_n,j & \dots & k_n,n \end{vmatrix}, \qquad (22)$$

$$R = \begin{vmatrix} r_1,1 & r_1,2 & \dots & r_1,j & \dots & r_1,n \\ r_2,1 & r_2,2 & \dots & r_2,j & \dots & r_1,n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_j,1 & r_j,2 & \dots & r_j,j & \dots & r_j,n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_n,1 & r_n,2 & \dots & r_n,j & \dots & r_n,n \end{vmatrix}, \qquad (23)$$

где k_i, j ; r_i, j – соответственно ковариационный и корреляционный моменты между случайными числами временных сечений i и j.

С учетом введенных ограничений на закон распределения случайных чисел определим:

– оценку математического ожидания случайных величин условного процесса в сечении t_j, которая будет равна [3]:

$$MW(t_J) = \frac{1}{C}\sum_{i=1}^{C} W_i(t_j) = a_C(t_j); \quad (24)$$

– оценку стандартного (среднеквадратического) отклонения процесса случайных величин условного процесса в сечении t_j, которая будет равна [3]:

$$GW(t_J) = \sqrt{\frac{1}{C-1}\sum_{i=1}^{C}\left(W_i(t_j) - a_c(t_j)\right)^2} = G_C(t_j); \quad (25)$$

– оценки элементов соответственно ковариационной и корреляционной матриц между сечениями j и l, определяются посредством следующих формул [3]:

$$k_{Jl} = \sum_{i=1}^{C}\frac{\left(W_i(t_j) - a_C(t_j)\right)\left(W_i(t_l) - a_C(t_l)\right)}{C-1}. \quad (26)$$

– нормируя оценки ковариаций оценками среднеквадратичных отклонений сечений j и l, получим оценку коэффициента корреляции:

$$r_{jl} = \frac{k_{jl}}{G_C(t_j)G_C(t_l)}. \quad (27)$$

Операция по оценке коэффициента линейной регрессии β_j по каждому j-му столбцу матрицы (22) определяется по следующей формуле [3]:

$$\beta_i(t_j) = \frac{1}{\left|k_{i,j}\right|}\sum_{l=1}^{n-1} k_{0,l}K_{i,l}, \quad (28)$$

где $\beta_i(t_j)$ – оценка i-го коэффициента линейной регрессии в сечении t_j матрицы (4); $k_{i,j}$ – детерминант ковариационной матрицы (24); $k_{0,l}$ – оценка элемента ковариации между сечениями 0 и l матрицы (20); $K_{i,l}$ – алгебраическое дополнение элемента $k_{i,l}$ (l = 1, 2,…, n – 1) ковариационной матрицы (22).

Операция по оценке остаточной дисперсии $(\sigma_{од}(c, n))^2$ регрессии параметра $П_1$ по данным матрицы (22) определяется по следующей формуле [3]:

$$\left(\sigma_{од}(c,n)\right)^2 = \frac{1}{C}\sum_{i=1}^{C}\left(W_i(t_0) - a_C(t_0) - \beta_1(t_1)\left(W_i(t_1) - a_C(t_1)\right) - \ldots\right.$$

$$\left. \ldots - \beta_k(t_j)\left(W_i(t_j) - a_C(t_j)\right) - \ldots - \beta_{n-1}(t_j)\left(W_i(t_n) - a_C(t_n)\right)\right)^2, \quad (29)$$

где $\left(\sigma_{од}(c,n)\right)^2$ – оценка остаточной дисперсии регрессии параметра $П_1$; j = 1, 2, …, n – 1.

Гарольд Крамер [3] доказал, что статистика Ψ отношения квадратов остаточной дисперсии к ее оценке, помноженная на число реализаций ансамбля *C*, распределена по закону χ^2 с $V = C - n - 1$ степенями свободы, т.е.

$$\psi = \frac{(\sigma_o)^2 C}{(\sigma_{од}(c,n))^2}, \tag{30}$$

где $(\sigma_o)^2$ – значение остаточной дисперсии параметра; $\left(\sigma_{од}(c,n)\right)^2$ – оценка остаточной дисперсии параметра.

Плотность вероятностей распределения χ^2 определяется формулой [2]:

$$K_V(x) = \begin{cases} P_V(\chi^2 \le t) \text{ при } t > 0, \\ 0 \text{ при } t \le 0. \end{cases} \tag{31}$$

Выражение для $P_v(\chi^2 \le x)$ имеет следующий вид:

$$P_v(\chi^2 \le t) = \frac{1}{2^{\frac{v}{2}}\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} t^{\frac{v}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}, \tag{32}$$

где $\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)$ – гамма-функция, интегральное представление (формула Эйлера), которой для непрерывных *z* имеет следующий вид [3]:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty x^{z-1} e^{-x} dx. \tag{33}$$

Для целочисленных $z > 0$ имеют место следующие соотношения:

$$\Gamma(z+1) = z!,$$

$$0! = \Gamma(1) = 1.$$

Введем обозначение $\frac{V}{2} = z + 1$, тогда справедливо равенство

$$\Gamma\left(\frac{V}{2}\right) = \left(\frac{V}{2} - 1\right)!. \tag{34}$$

Подставив (34) в (32), получим следующую удобную для вычислений формулу:

$$PV(\chi^2 \le t) = \frac{1}{2^{\frac{V}{2}}\left(\frac{V}{2}-1\right)!} t^{\frac{V}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}. \tag{35}$$

На основании вышеизложенного можно записать следующее неравенство:

$$t_{\min}(V, P_{\min}) \le \frac{(\sigma_{\text{о}})^2 C}{(\sigma_{\text{од}}(c,n))^2} \prec t_{\max}(V, P_{\max}). \quad (36)$$

где $t_{\min}$ и $t_{\max}$ – соответственно квантили распределения (34) для вероятностей $P_{\min}$ и $P_{\max}$ при V степенях свободы.

Тогда доверительный интервал для оценки стандартного отклонения с вероятностью доверия, равной $P_{\text{Д}} = P_{\max} - P_{\min}$, будет иметь вид следующего неравенства:

$$\sigma_{\text{од}}(c,n)\sqrt{\frac{t_{\min}(V, P_{\min})}{C}} \le \sigma_{\text{о}} \prec \sigma_{\text{од}}(c,n)\sqrt{\frac{t_{\max}(V, P_{\max})}{C}}. \quad (37)$$

Поскольку мажоритарное сравнение остаточных дисперсий осуществляется для одного и того же параметра, прошедшего как минимум через три тракта, то в идентификатор оценки остаточной дисперсии введем индекс T, обозначающий номер тракта. С учетом этого индекса идентификатор оценки остаточной дисперсии будет иметь следующий вид: $\sigma_{\text{од}}(c,n)T$.

На основании (37) нижняя и верхняя оценки доверительного интервала стандартного отклонения остаточной дисперсии соответственно имеют значения:

$$\sigma_{\text{од}}(c,n)_H^T = \sigma_{\text{од}}(c,n)\sqrt{\frac{t_{\min}(V, P_{\min})}{C}},$$

$$\sigma_{\text{од}}(c,n)_B^T = \sigma_{\text{од}}(c,n)\sqrt{\frac{t_{\max}(V, P_{\max})}{C}}. \quad (38)$$

Доверительный интервал стандартного отклонения остаточной дисперсии определяется формулой

$$D_{\text{од}}T = \sigma_{\text{од}}(c,n)\left(\sqrt{\frac{t_{\max}(V, P_{\max})}{C}} - \sqrt{\frac{t_{\min}(V, P_{\min})}{C}}\right) = \sigma_{\text{од}}(c,n)\Delta, \quad (39)$$

где Δ – коэффициент, определяющий долю стандартного отклонения остаточной дисперсии, которая равна доверительному интервалу на стандартное отклонение остаточной дисперсии.

Тогда условия сопоставимости и несопоставимости доверительных интервалов стандартного отклонения остаточной дисперсии параметра, прошедшего через 1-й и 2-й тракты соответственно, запишутся в виде следующих неравенств:

$$\left|D_{\text{од}}1 - D_{\text{од}}2\right| \le A \text{ – сопоставимо}, \quad \left|D_{\text{од}}1 - D_{\text{од}}2\right| \ge A \text{ – несопоставимо}, \quad (40)$$

где A – параметр сопоставимости, который подбирается экспериментально.

Оценим необходимую частоту измерений параметра для получения достоверных оценок остаточной дисперсии и доверительного интервала на остаточную дисперсию. Из формул (29) и (39) видно, что достоверность оце-

нок остаточная дисперсия и доверительный интервал стандартного отклонения остаточной дисперсии зависят от количества статистики, по которой строится матрица (20). Поскольку соотношение между значением остаточной дисперсии и его оценкой определяется выражением (87), которая распределена по закону распределения Пирсона χ^2 (хи-квадрат) [3].

2. Результаты вычислений

Из выражений (36) и (39) видно, что доверительный интервал на остаточную дисперсию зависит от квантилей распределения χ^2, которые определяются количеством реализаций случайного процесса изменения параметров C, количеством точек в каждой реализации n и вероятностью доверия, с которой мы хотим получить доверительный интервал на оценку. Число реализаций C и число точек в реализации определяют число степеней свободы распределения V посредством следующего соотношения:

$$V = c - n - 1. \tag{41}$$

Из матрицы (20) видно, что количество измерений N, необходимое для формирования матрицы (20), равно $N = c \cdot n$. Практика показывает, что минимальное время развития катастрофической ситуации равно одной секунде. Следовательно, период формирования и обработки матрицы (20), обозначим его $T_{\text{фо}}$, должен быть менее одной секунды. Период формирования матрицы (20) $T_{\text{ф}}$ будет равен периоду одного измерения $T_{\text{п}}$, умноженному на число элементов матрицы (20), т.е. $T_{\text{ф}} = T_{\text{п}} N$. Обозначим период обработки матрицы (20) через $T_{\text{о}}$, тогда

$$T_{\text{фо}} = T_{\text{п}} N + T_{\text{о}}.$$

С другой стороны, величина N должна быть не менее той, которая достаточна для обеспечения достоверности характеристик матрицы (20). Обозначим эту величину через $N_{\text{д}}$. Из описанного выше вытекает следующее неравенство, определяющее требования к периоду измерения параметров $T_{\text{п}}$ [4, 5]:

$$T_{\text{п}} N_{\text{д}} + T_{\text{о}} \le 1\,\text{с}. \tag{42}$$

Неравенство (42) не всегда может выполняться. Для таких случаев может быть предложена следующая процедура:

– после завершения периода $T_{\text{ф}} = T_{\text{п}} N$ формирования матрицы (20) данные матрицы не обрабатываются, но запоминаются в памяти вычислительного узла. С этого момента начинается второй цикл формирования и обработки матрицы (20);

– третий и последующие циклы формирования матрицы (20) начинаются не в момент, когда завершается период формирования и обработки данных матрицы (20) предыдущего цикла, а через период, равный 1с – $T_{\text{о}}$.

При такой процедуре формирования и обработки матрицы (20) через каждый период, длительностью менее секунды, будет появляться результат

обработки матрицы (20), т.е. результат сравнения доверительных интервалов остаточных дисперсий по формуле (40). Реализация такой процедуры возможна, поскольку быстродействие современных вычислительных узлов превышает частоту измерения параметров на несколько порядков [6, 7].

Для определения величины $N_{\text{д}}$, т.е. количества реализаций случайного процесса C и числа измерений в каждой реализации n, были проведены расчеты характеристик распределения χ^2, которые приведены в табл. 1. Расчет производился для вероятности доверия

$$P_{\text{д}} = P_{\min} - P_{\max} = 0{,}996,$$

где $P_{\min}$ – нижняя граница вероятности доверия, равная интегралу от плотности распределения χ^2 (35), определяющая нижнюю границу доверительного интервала стандартного отклонения остаточной дисперсии; $P_{\max}$ – вероятность, равная интегралу от плотности распределения χ^2 (35), определяющая верхнюю границу доверительного интервала стандартного отклонения остаточной дисперсии.

Таблица 1

Характеристики распределения χ^2 при вероятности доверия $P_{\text{д}} = 0{,}996$

n	C	V	$P_{\min}$	$t_{\min}$	$P_{\max}$	$t_{\max}$	$\sqrt{\frac{t_{\min}(V, P_{\min})}{C}}$	$\sqrt{\frac{t_{\max}(V, P_{\max})}{C}}$	Δ	$m = v - 2$	$\sigma = \sqrt{2v}$
5	41	35	0,00162	14,5	0,9978	62,5	0,595	1,240	0,645	33	8,37
10	100	89	0,00143	55	0,9977	131	0,742	1,145	0,403	87	13,34
30	270	239	0,00153	179	0,9977	304	0,814	1,061	0,247	237	21,87

Выражение для определения $P_{\min}$ и $P_{\max}$ имеют следующий вид:

$$P_{\min} = \frac{1}{2^{\frac{V}{2}}\left(\frac{V}{2}-1\right)!}\int_{-\infty}^{t_{\min}} t^{\frac{V}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} dt; \qquad (43)$$

$$P_{\max} = \frac{1}{2^{\frac{V}{2}}\left(\frac{V}{2}-1\right)!}\int_{-\infty}^{t_{\max}} t^{\frac{V}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} dt, \qquad (44)$$

где $t_{\min}$ – квантиль нижней границы вероятности доверия, определяющий нижнюю границу доверительного интервала стандартного отклонения остаточной дисперсии определяемой по формуле (39); $t_{\max}$ – квантиль верхней оценки вероятности доверия, определяющий верхнюю границу доверительного интервала стандартного отклонения остаточной дисперсии, определяемой по формуле (39).

В табл. 1 приведены значения соответственно математического ожидания и стандартного отклонения дисперсии.

Табл. 1 составлена для трех количеств измерений $N = Cn$ = 205, 1000, 8100.

Из табл. 1 видно:

– при N = 205, числе реализаций c = 41 и числе точек в каждой реализации n = 5 доверительный интервал стандартного отклонения остаточной дисперсии составляет 0,645 от оценки стандартного отклонения остаточной дисперсии $D_{\text{од}}T = \sigma_{\text{од}}(c,n)0,645$;

– при N = 1000, числе реализаций c = 100 и числе точек в каждой реализации n = 10 доверительный интервал стандартного отклонения остаточной дисперсии составляет 0,403 от оценки стандартного отклонения остаточной дисперсии $D_{\text{од}}T = \sigma_{\text{од}}(c,n)0,403$;

– при N = 8100, числе реализаций c = 270 и числе точек в каждой реализации n = 30 доверительный интервал стандартного отклонения остаточной дисперсии составляет 0,247 от оценки стандартного отклонения остаточной дисперсии $D_{\text{од}}T = \sigma_{\text{од}}(c,n)0,247$.

Метод сравнения информации, прошедшей через различные интерфейсно-вычислительные тракты, имеет следующие преимущества:

– метод слабо коррелирован как с характеристиками сравниваемой информации, так и характеристиками устройств, формирующих и обрабатывающих информацию. В то же время он сильно коррелирован с характеристиками состояния устройства;

– метод не требует синхронизации информации.

Заключение

Таким образом, показано, что особо важным элементом отказоустойчивых систем является мониторинг их рабочего состояния. Проведен анализ и предложены методы контроля, обеспечивающие необходимую полноту и достоверность контроля, глубину контроля, достаточную для проведения реконфигурации системы при парировании обнаруженных отказов и сбоев. Показаны ограничения продолжительности контроля устройств, на которых реализованы критические функции. Определен коэффициент полноты контроля, обеспечивающий заданную вероятность неконтролируемого отказа устройства. В качестве критерия контроля выбрано совпадение всех бит в сравниваемых сообщениях со значением параметра, что позволяет избежать множества ошибок первого и второго рода. Представленный метод контроля требует строгой синхронизации последовательности сообщений в сравниваемых трактах.

Список литературы

1. Авиационные правила (часть 25) нормы летной годности самолетов транспортной категории. – М. : Изд-во Межгос. авиац. комитета, 2009. – 367 с.
2. **Гнеденко, Б. В.** Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – Изд-е третье, перераб. – М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1962. – 465 с.
3. **Крамер, Г.** Математические методы статистики / Г. Крамер ; под ред. А. Н. Колмогорова. – М. : Мир, 1973. – 284 с.

4. **Авакян, А. А.** Закон распределения отказов элементов и систем электроники / А. А. Авакян, А. Г. Дмитриенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 47–53.
5. **Авакян, А. А.** Поток отказов элементов и систем электроники / А. А. Авакян // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума. – 2012. – Т. 1. – С. 480–481.
6. **Горячев, Н. В.** Подсистема расчета средств охлаждения радиоэлементов в интегрированной среде проектирования электроники / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. А. Рыжов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 4 (16). – С. 24–29.
7. **Бростилов, С. А.** Распространение света в искривленном многомодовом оптическом волноводе / С. А. Бростилов, С. И. Торгашин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 141–150.

References

1. *Aviacionnye pravila (chast' 25) normy letnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii* [Aviation rules (part 25) norms of transport aircraft's airworthiness]. Moscow: Izd-vo Mezhgos. aviac. komiteta, 2009, 367 p.
2. Gnedenko B. V. *Kurs teorii verojatnostej* [The probability theory course]. Moscow: Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoj literatury, 1962, 465 p.
3. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods of statistics]. Moscow: Mir, 1973, 284 p.
4. Avakjan A. A., Dmitrienko A. G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Complex systems reliability and quality]. 2013, no. 1, pp. 47–53.
5. Avakjan A. A. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. 2012, vol. 1, pp. 480–481.
6. Gorjachev N. V., Grab I. D., Ryzhov A. A. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 4 (16), pp. 24–29.
7. Brostilov S. A., Torgashin S. I., Jurkov N. K. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 1 (21), pp. 141–150.

Авакян Александр Анушаванович
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт авиационного оборудования (Россия, Московская область, г. Жуковский, ул. Туполетова, 18)

E-mail: infa@niifi.ru

Avakyan Aleksandr Anushavanovich
Doctor of engineering sciences, professor, chief scientific officer, Research Institute of Aircraft Equipment (18 Tupoletova street, Zhukovsky, Moscow region, Russia)

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Yurkov Nikolay Kondrat'evich
Doctor of engineering science, professor, head of sub-department of radio equipment construction and production, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

E-mail: salom.in@mail.ru

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

УДК 519.672

Авакян, А. А.

Мониторинг интерфейсно-вычислительных трактов систем авионики / А. А. Авакян, Н. К. Юрков, А. В. Соломин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 24–40.

УДК 004.93:519.7

Н. Г. Федотов, А. А. Семов, А. В. Моисеев

3D-ТРЕЙС-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ: РЕЖИМЫ СКАНИРОВАНИЯ, ОСОБЕННОСТИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ, СПОСОБЫ УСКОРЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ[1]

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются цифровые модели 3D-объектов, которые заданы в виде полигональной сетки, описывающей поверхность тела (аналогично общепринятым форматам *obj*, *off* и др.). Предметом исследования являются процессы сканирования 3D-объектов сетками параллельных плоскостей и прямых. Подход к сканированию продолжает ранее разработанный одним из авторов подход с 2D-изображений на 3D. Целью работы является описание различных режимов сканирования с указанием их преимущества и недостатков, а также анализ специфики формирования гипертрейс матрицы (3D-трейс-образ объекта, формируемый по результатам сканирования) и исследование возможностей ускорения вычислений гипертриплетных признаков, связанных с техникой сканирования.

Материалы и методы. Исследования процессов сканирования 3D-объектов выполнены при помощи метода математического и компьютерного моделирований.

Результаты. Исследованы и разработаны три режима сканирования 3D-объектов в программной среде MathCAD 15. Описаны и представлены конкретные способы и примеры уменьшения времени работы данного метода. Данные результаты можно использовать в различных областях знания и практики, где необходим анализ пространственных объектов (компьютерное зрение и графика, искусственный интеллект, медицинская промышленность, медиаиндустрия, архитектура и строительство, аэрокосмические исследования, зрение роботов, нанотехнологии и др.).

Выводы. Сопоставление различных режимов сканирования 3D-объектов позволило сделать выводы о том, что стохастическая реализация сканирования со случайными параметрами улучшает соотношение «надежность – быстродействие» по сравнению с фиксированной разверткой. Представленные различные способы сокращения времени работы алгоритма позволяют увеличить скорость работы сканирующей системы от нескольких до десятков и сотен раз.

Ключевые слова: 3D-моделирование, 3D-трейс-преобразование, гипертриплетный признак, инвариантность, универсальность распознавания, режимы сканирования, стохастическая реализация, способы ускорения вычислений.

N. G. Fedotov, A. A. Semov, A. V. Moiseev

3D-TRACE-CONVERSION: SCANNING MODES, STOCHASTIC IMPLEMENTATION FEATURES, METHODS OF COMPUTATIONAL SPEEDUP

Abstract.

Background. The research object is the 3d digital models of objects, given in the form of a polygonal mesh outlining the body surface (similar to conventional for-

[1] Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект №12-07-00501).

mats *obj*, *off* etc.). The research subject is the processes of 3d-objects scanning by the meshes of parallel planes straight lines. The approach to scanning continues the previously established approach for 2d-images by one of the authors for 3d. The aim of the work is to describe various modes of scanning pointing out advantages and disadvantages thereof, as well as to analyze formation of hypertrace matrixes (3D-trace-onject image formed on the basis of scanning results) and to research possibilities of sppeding up calculation of hypertriplet characteristics associated the with scanning technique.

Materials and methods. The research of 3d-objects scanning processes was completed using the method of mathematical and computer modeling.

Results. The authors researched and developed three modes of 3d-object scanning in the MathCAD 15 software environment. The researchers described and presented concrete methods and examples of reduction of working hours of the given method. The given results could be applied in various fields of knowledge and practice, requiring dimensional analysis of objects (computer vision and graphics, artificial intelligence, medical industry, media industry, architecture and construction, aerospace investigation, robot vision, nanotechnologies etc.).

Conclusions. Comparison of various modes of ed-object scanning allowed to conclude that stochastic realization of scanning with random parameters improves the correlation "reliability – perfomance" in comparison with the fixed scan. The presented various methods of reduction of the algorithms working period allow to increase the speed of a scanning system from several to dozens and hundreds times.

Key words: 3D modeling, 3D trace-transform, hypertriple feature, invariance, recognition universality, scan regimes, stochastic implementation, ways of accelerating calculations.

Введение

Сегодня 3D-модели используются в самых различных отраслях промышленности [1]. Медицинская промышленность использует детальные модели органов при визуальном показе для обучения студентов, а также постановке более точного диагноза пациентам [2]. Индустрия медиа использует трехмерные модели персонажей, предметов и сцен при моделировании спецэффектов в кинофильмах, а также создании компьютерных игр и виртуальной реальности. Архитектура и строительство использует 3D-моделирование для демонстрации предлагаемых зданий и ландшафтов, а также при проектировании и расчете различных показателей нагрузок.

Тем не менее, несмотря на возрастающую потребность в развитии методов машинного зрения, их эффективность при распознавании 3D-объектов значительно уступает возможностям человека, что объясняется не слабой мощностью вычислительных средств, а недостаточно развитыми теоретическими методами и подходами [3].

Кроме того, в связи со стремительным развитием научно-технического прогресса, увеличением темпа роста и производства продукции важной становится задача повышения быстродействия сканирующей системы, особенно при получении высококачественных и точных моделей объектов окружающей действительности.

Таким образом, актуальность разработки нового подхода для анализа и распознавания 3D-изображений связана прежде всего с необходимостью разработки универсального метода, который мог бы эффективно использоваться

при сканировании различных типов объектов, обладая при этом приемлемой скоростью работы.

Настоящая статья построена следующим образом. Кратко рассматривается теория нового 3D-трейс-преобразования для анализа и распознавания пространственных изображений. Далее описываются особенности практической реализации данного алгоритма, связанные с различными режимами сканирования. Затем рассматриваются особенности стохастического типа сканирования и специфика формирования гипертрейс матрицы. После чего анализируются возможности ускорения вычислений 3D-трейс-метода. В заключении формируются выводы по работе, указываются дальнейшие пути развития и применения данного метода.

1. Теория 3D-трейс-преобразования

Пусть $B(\eta, r)$ – плоскость с нормалью

$$\eta = [\cos\varphi \cdot \sin\omega,\ \sin\varphi \cdot \sin\omega,\ \cos\omega],$$

r, ω и φ – сферические координаты плоскости.

Исходный объект F сканируется сеткой параллельных плоскостей под различными углами ω и φ с шагом $\Delta\omega$ и $\Delta\varphi$ до завершения оборота обхода вокруг него в 2π радиан по каждому углу с дискретным шагом Δ между сканирующими плоскостями (рис. 1). Результат G пересечения плоскости $B(\eta, r)$ и объекта F вычисляется при помощи гиперфункционала *HyperT*. Множество чисел G формируется гипертрейс матрица **3TM**, у которой ось 0ω направлена горизонтально, ось 0φ – вертикально, ось $0r$ – вглубь.

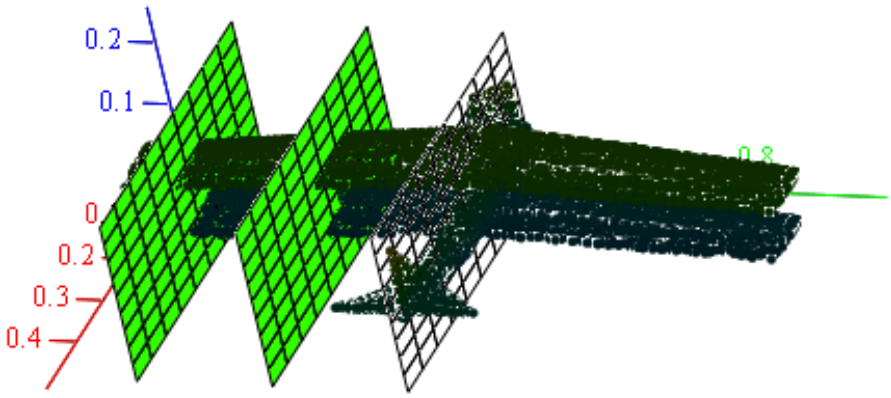


Рис. 1. Процесс сканирования сеткой параллельных плоскостей

Далее при помощи гиперфункционалов *Hyper*P, *Hyper*Ω и *Hyper*Θ вычисляется признак *Res*(*F*) исходного 3D-объекта [4]:

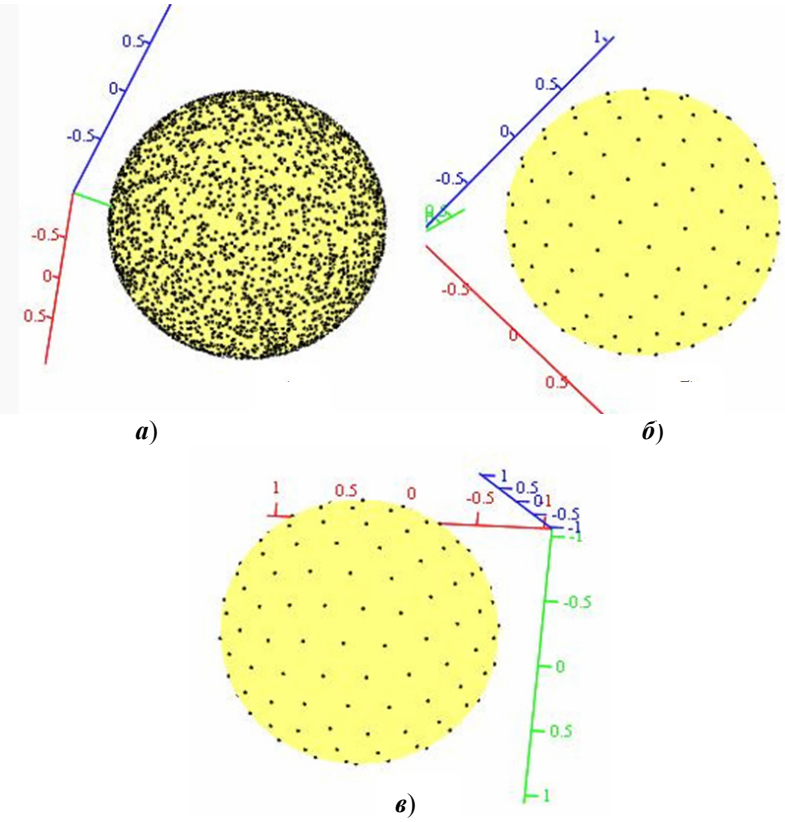
$$\mathrm{Res}(\mathrm{F}) = \mathit{Hyper}\Theta \circ \mathit{Hyper}\Omega \circ \mathit{Hyper}\mathrm{P} \circ \mathit{HyperT}\left(F_{\mathrm{sec}\,t}\right).$$

Признаки получившихся в сечении фигур $F_{\mathrm{sec}\,t}$ извлекаются при помощи 2D-трейс-преобразования, введенного в [5]. Признак 2D-изображения имеет структуру в виде композиции трех функционалов:

$$\Pi\left(F_{\sec t}\right) = HyperT\left(F_{\sec t}\right) = \Theta \circ \mathrm{P} \circ T\left(F_{\sec t} \cap l(\theta,\rho)\right),$$

где ρ и θ – полярные координаты прямых в плоскости сечения $F_{\sec t}$.

В топологическом смысле перебор всех углов ω и φ дает модель концентрических сфер с центром в начале координат. Точки касания данных плоскостей с единичной сферой образуют опорную сетку на сфере. Согласно [6] данная сетка должна иметь равномерное распределение точек на сфере (рис. 2). Методы построения равномерных сеток на сфере можно найти в [7, 8].



а) ***б***)

в)

Рис. 2. Различные способы построения равномерного распределения точек на сфере: ***а*** – с помощью случайного бросания 5000 точек на сферу; ***б*** – спираль (162 точки); ***в*** – рекурсивное деление граней икосаэдра (162 точки)

Как видно из кратко представленной теории, данный метод обладает определенной универсальностью, так как техника сканирования не связана с особенностями объектов. В связи с этим 3D-трейс-преобразование способно одинаково хорошо распознавать с высокой надежностью различные классы объектов вне зависимости от их геометрической структуры [9]. Кроме того, 3D-трейс-преобразование не только не требует предварительной обработки 3D-изображений, но и может осуществлять ее по мере необходимости в одной технике сканирования [10]. При надлежащем выборе функционалов, входящих в структуру признаков, можно получать признаки, инвариантные по отношению к движению 3D-объектов

2. Режимы сканирования 3D-трейс-преобразования

3D-трейс-преобразование поддерживает несколько различных режимов сканирования, которые имеют свои преимущества и недостатки в различных практических ситуациях.

1. Детерминированный режим сканирования.

В этом случае уравнения сканирующих прямых и плоскостей будут заранее определены и известны. Так как совокупности пространственных сеток плоскостей и прямых будут одинаковы для любого вида объекта, то целесообразно их будет хранить в отдельном файле, чтобы дополнительно не тратить время на их построение. Преимущество данного режима – сокращение времени сканирования, которое будет особенно заметно при большом количестве 3D-объектов в базе данных.

2. Стохастический режим.

При решении задач распознавания пространственных объектов и плоских фигур, получающихся в результате сечений 3D-модели сеткой параллельных плоскостей, стохастическое сканирование со случайными параметрами обладает заметными преимуществами. Так, при анализе и распознавании двумерных изображений сканирование со случайными параметрами улучшает соотношение «надежность – быстродействие» по сравнению с фиксированной разверткой [5]. Также, например, любой заранее предопределенный алгоритм построения равномерной сетки на сфере для выполнения условия инвариантности гипертриплетных признаков к повороту по скорости выполнения будет заметно уступать генерации случайных точек с равномерным распределением по поверхности сферы.

Однако по мере увеличения числа 3D-объектов в сканируемой базе данных используемый режим по скорости вычислений начнет постепенно уступать детерминированному способу сканирования, так как для каждого нового объекта необходимо будет строить уравнения прямых и плоскостей, которые требуют вычислительных затрат. Ввиду стохастической реализации хранить заранее получаемые коэффициенты уравнений прямых и плоскостей не представляется возможным. Недостатком является также то обстоятельство, что для достижения хорошей точности необходимо заметное увеличение количества итераций (что эквивалентно малому шагу сканирования или большому числу точек на сфере для достижения равномерного распределения).

Абсолютно полный стохастический режим достигается заменой сканирующей решетки параллельных плоскостей и прямых на одиночную случайную сканирующую плоскость и прямую. В этом случае строки и столбцы гипертрейс матрицы обозначают не номер, а диапазон варьирования каждой переменной. На основе гипертрейс матрицы далее строится трехмерное вероятностное распределение исходного объекта.

3. Смешанный режим сканирования.

3D-трейс-метод благодаря композиционной структуре триплетного и гипертриплетного признаков поддерживает также реализацию смешанного режима сканирования. Это касается как прямых, так и плоскостей, причем возможны их различные сочетания. Так, например, возможно применение детерминированной развертки сеток параллельных плоскостей для пространственных фигур при стохастическом сканирования сетками параллельных прямых плоских фигур в сечении.

Также возможна более фундаментальная модификация работы алгоритма путем изменения видов распределения переменных ω, φ, *r* и θ, ρ, заданных в сферических и полярных координатах соответственно.

Приведем пример такого типа сканирования: использование фиксированной совокупности сетки параллельных плоскостей и прямых при использовании случайного распределения для переменной *r*.

Указанный выше вариант будет сохранять преимущества обоих типов сканирования. Так, все коэффициенты при переменных в уравнениях прямых и плоскостей будут одинаковы для разных 3D-объектов, кроме свободного члена. Определить данный коэффициент можно путем оценки наиболее удаленной грани через координаты векторов нормалей по данному направлению градиента – нормали сканирующей плоскости. Построив граничную краевую плоскость, сканирование 3D-объекта начнет осуществляться в противоположном направлении. Как только пересечение какой-нибудь плоскости с исходным объектом окажется пустым, алгоритм перейдет к новой сетке параллельных плоскостей под другим углом обзора.

Кроме того, данный способ позволяет сократить время работы распознающей системы, так как не требуется производить лишние сканирования плоскостями, характерные для первых двух способов сканирования. Так, фиксированное сканирование объекта осуществляется с нулевой плоскости, проходящей через начало координат. Если объект будет удален от начала координат на большое расстояние, то необходимо будет произвести лишние сканирования, прежде чем получить непустое пересечение с 3D-объектом, или же необходимо будет осуществить дополнительную операцию переноса 3D-объекта в направление начала координат, что увеличит время работы алгоритма.

Стохастическое же сканирование начинается с нулевой плоскости, проходящей через случайную точку на поверхности объекта, и осуществляется в двух противоположных направлениях от этой плоскости. Как только получен пустой результат пересечения с 3D-объектом, сканирование заканчивается по этому направлению. После чего эти срезы сечений объединяются в одну, изменяя порядок следования признаков сечений в одном из них на противоположный. Последние действия требуют дополнительных вычислительных затрат.

Так как распределение по переменной *r* случайно, то это позволяет уменьшить ошибку, связанную с дискретным шагом сканирования (расстояния между параллельными плоскостями). Так, при перемещении объекта в направлении нормалей сканирующих плоскостей получаемые сечения будут несколько отличаться друг от друга. Для фиксированного распределения переменной *r* характерно либо полное совпадение в значениях признаков для всех сечений, либо частичные отклонения в значения признаков для всех сечений, тогда как для случайного распределения переменной *r* данные колебания будут варьироваться по-разному. Поэтому часть вычисленных гипертриплетных признаков, характеризующих те или иные сечения под разными углами обзора, в целом будут иметь более низкие значения искажений, связанных с дискретным шагом сканирования.

3. Особенности стохастической реализации 3D-трейс-преобразования

При проектировании распознающих систем используются дискретные представления переменных ω, φ и *r*. Соответственно параметры сканирующих плоскостей образуют три множества:

$$M_1 = \{r_1, r_2, \ldots, r_l\},\ M_2 = \{\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_m\},\ M_3 = \{\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_n\}.$$

Детерминированное сканирование позволяет однозначно определить каждый элемент матриц **3TM**. Так, тройке (ω_i, φ_j, r_k) соответствует элемент матрицы с номером (i, j, k) и значением $HyperT\left(F \cap B\left(\eta\left(\omega,\varphi\right),r\right)\right)$. При применении случайного сканирования на множествах M_1, M_2, M_3 задаются вероятностные распределения:

$$M_1 = \{s_1, s_2, \ldots, s_l\},\ M_2 = \{p_1, p_2, \ldots, p_m\},\ M_3 = \{q_1, q_2, \ldots, q_n\},$$

$$\sum_k s_k = 1,\ \sum_i p_i = 1,\ \sum_j q_j = 1.$$

Выбирая параметры сканирования случайным образом на основе заданных распределений, получаем матрицу случайных величин **3TM*r***, где $3\mathrm{TM}r_{i,j,k} = HyperT\left(F \cap B\left(\eta\left(\omega_i,\varphi_j\right),r_k\right)\right)$ с вероятностью $s_k \cdot p_i \cdot q_j$ и $3\mathrm{TM}r_{i,j,k} = 0$ с вероятностью $1 - s_k \cdot p_i \cdot q_j$. Аналогичное свойство имеет место и для трейс-матриц **TM** в плоскости сечения.

Как видно из рассуждений, приведенных выше, вероятности s, p и q независимы друг от друга (отсутствие совместных и попарных произведений вероятностей), что объясняется изначальным независимым заданием распределений на множествах M_1, M_2, M_3 и раздельной обработкой строк матрицы **3TM** гиперфункционалами *Hyper*P, *Hyper*Ω и *Hyper*Θ.

Однако тот факт, что инвариантность к повороту на сфере отличается от инвариантности к повороту на плоскости (например, равномерные сетки, построенные на этих двух поверхностях, неизометричны), влияет на свойства плотностей распределения переменных s, p и q. Рассмотрим следующий пример.

Пусть переменные на отрезках $-r \le s \le r$, $0 \le p \le 2\pi$ и $0 \le q \le 2\pi$ имеют равномерное распределение: $s = 2r/K$, $p = 2\pi/M$, $q = 2\pi/N$, где r – граница наименьшего куба, составленного параллельно декартовым осям координат и содержащего целиком исходный 3D-объект; K, M и N – количество сканирующих плоскостей по данным направлениям, т.е. всего $K \cdot M \cdot N$ сканирований плоскостями под $M \cdot N$ различными углами обзора.

Если каждой сканирующей плоскости сопоставить точку $\left(s_k; p_i; q_j\right)$ в координатной системе с тремя взаимно перпендикулярными осями 0s, 0p и 0q, то множество данных точек образуют почти равномерно заполненную 3D-фигуру – параллелепипед (в силу случайного бросания точки). Поворот объекта вокруг неподвижной сетки равнозначен повороту данных координатных осей 0s, 0p и 0q в противоположном направлении вокруг неподвижного объекта, так как каждая точка однозначно определяет сканирующую плоскость. Чтобы множество точек совпадало само с собой при вращении этой 3D-фигуры для выполнения свойства инвариантности к повороту, необходимо, чтобы эта фигура представляла собой равномерно заполненный шар.

Таким образом, переменные s, p и q не могут все иметь одновременно равномерное распределение. Из построенного параллелепипеда шар можно

получить следующим образом: если выполнено неравенство $s_k^2 + p_i^2 + q_j^2 > 1$, то точка $\left(s_k; p_i; q_j\right)$ генерируется заново, иначе строится сканирующая плоскость $B\left(\eta\left(\omega_i, \phi_j\right), r_k\right) = B\left(\eta\left(p_i, q_j\right), s_k\right)$.

4. Способы ускорения вычислений гипертриплетных признаков

Благодаря композиционной структуре формируемых гипертриплетных признаков сканирование, предобработка и постобработка, анализ и распознавание изображения осуществляются в одной технике, что позволяет заметно сократить время выполнения работы распознающей системы. Так, сканирование объекта осуществляется при помощи гипертрейс функционала *HyperT*, который вычисляет признак 2D-сечения и осуществляет предварительную обработку данных сканирования. Гиперфункционалы *Hyper*P, *Hyper*Θ и *Hyper*Ω выполняют последующую обработку полученной гипертрейс матрицы, получая окончательный признак *Res*(*F*) исходной пространственной модели *F*.

Аналогичная ситуация наблюдается и в плоскостях сечений исходного 3D-объекта, высекаемых сканирующей сеткой параллельных плоскостей. Трейс функционал *T* осуществляет сканирование объекта, а функционалы *P* и Θ обрабатывают строки и столбцы трейс-матрицы TM.

Ускорение времени работы алгоритма можно достигнуть за счет сокращения количества сканирования исходного объекта. Это касается неполного типа формирования гипертриплетных признаков. Так, объем тела можно вычислить уже при разовом сканировании объекта сеткой параллельных плоскостей (под одним углом обзора). Периметр контура какого-либо сечения можно вычислить, используя сканирование сеткой параллельных прямых под одним углом наклона в плоскости сечения. Например, гипертриплетный признак объема объекта неполного типа выглядит следующим образом:

$$\mathrm{Re}\, s\left(F\right) = HyperP \circ HyperT\left(P \circ T\right),$$

где

$$T\left(\theta = \theta_0, \rho\right) = \sum_t f\left(\theta_0, \rho, t\right),\ P\left(\theta = \theta_0\right) = \sum_\rho f\left(\theta_0, \rho\right) \cdot \Delta t,$$

$$HyperT\left(\omega = \omega_0, \varphi = \varphi_0, r\right) = \Pi\left(F_{\mathrm{sec}\, t}\right),$$

$$HyperP\left(\omega = \omega_0, \varphi = \varphi_0\right) = \sum_r \Pi\left(\omega_0, \varphi_0, r\right) \cdot \Delta h,$$

Δt – расстояние между параллельными прямыми в плоскости сечения; $f\left(\theta, \rho, i\right)$ – длина *i*-го отрезка, высекаемого ρ_j-й прямой в плоскости сечения F_{sect}; Δh – расстояние между параллельными плоскостями.

Сокращение времени работы сканирующей системы можно достигнуть также за счет модульного написания программы. Так, основное время распознающая система затрачивает на вычисление трейс- и гипертрейс-функционалов, выполняющих непосредственное сканирование прямыми и плоскостями

соответственно (до 90 % от общего времени распознавания объекта). В связи с этим осуществление генерации триплетных и гипертриплетных признаков в автоматическом режиме произойдет быстрее, если произвести сначала единожды сканирование исходного объекта, вычислив трейс- и гипертрейс-функционалы, и сформировать трейс и гипертрейс матрицы. А затем путем целенаправленного или случайного перебора остальных видов функционалов осуществлять обработку строк и столбцов трейс- и гипертрейс-матриц и формировать, таким образом, в большом количестве различные признаки *Res*(*F*) исходного пространственного объекта.

Также, 3D-трейс-преобразование, как и 2D-трейс-преобразование, поддерживает возможность распараллеливания представляемого алгоритма с использованием многоядерных процессоров и системы многопоточных вычислений.

Так, сканирование любой сеткой параллельных плоскостей осуществляется одинаково. Сначала требуется нахождение сечения 3D-объекта, потом это сечение сканируется решеткой параллельных прямых с последующим занесением данных пересечения в трейс-матрицу, затем вычисляется признак сечения и заполняется гипертрейс-матрица, после чего вычисляется сам гипертриплетный признак.

Так как сканирование и плоскостями, и прямыми происходит под множеством различных углов, то количество подзадач на несколько порядков превосходит количество используемых процессоров, что обеспечивает большую гибкость данному алгоритму и эффективность использования системы параллельных вычислений. Кроме того, ход выполнения задачи носит линейный последовательный характер, что говорит о хорошей коммуникации и отсутствии затрат на передачу данных между вычислительными узлами разных кластеров.

Композиционная структура функционалов обеспечивает хорошую сегментацию задачи. Подзадачи будут иметь приблизительно одинаковый размер, что позволит обеспечить сбалансированную загрузку. С повышением объема вычислений и уменьшением шага сетки увеличивается количество прямых или плоскостей, которые пересекают рассматриваемый 2D- или 3D-объект соответственно. Следовательно, количество подзадач начинает заметно возрастать с увеличением шага сканирования, при этом размер отдельной подзадачи остается постоянным. Данное обстоятельство свидетельствует о хорошей масштабируемости задачи распределенной обработки данных.

Достичь ускорения вычислений можно также за счет применения специальных вычислительных схем обработки данных сканирования (порядок подстановки различных видов функционалов *HyperP*, *Hyper*Ω и *Hyper*Θ). Так, организовать обработку строк и столбцов матрицы **3TM** можно в виде дерева, когда для одного типа функционала *HyperP* последовательно вычисляются все типы функционалов *Hyper*Ω, для каждого из которых последовательно вычисляются все типы функционалов *Hyper*Θ. Применение такой вычислительной схемы позволяет ускорить работы системы в несколько раз. Так, для тройки функционалов (*HyperP*; *Hyper*Ω; *Hyper*Θ) количеством (*a*; *b*; *c*) существует $a \cdot b \cdot c$ комбинаций. По методу деревьев необходимо произвести всего $a + a \cdot b + a \cdot b \cdot c$ вычислений функционалов, а для обычной схемы – $3a \cdot b \cdot c$ вычислений. Аналогичное свойство имеет место и для матрицы ТМ в плоскости сечения.

Аппаратные возможности ускорения работы метода (подключение специальных графических карт и т.п.) и применение специальных языков программирования в данной статье обсуждаться не будут.

Заключение

Актуальность создания нового метода анализа и распознавания 3D-объектов связана с разработкой такого метода сканирования, который обладал бы одновременно и универсальностью, и быстродействием [11].

Различные режимы сканирования обладают различными преимуществами в различных ситуациях, что дополнительно придает гибкость и универсальность использования 3D-трейс-преобразования. Так, при одиночном online запросе пользователя на нахождении 3D-моделей, подобных введенной в систему пользователем, лучше применять стохастический режим. При обработке больших баз данных при решении задачи классификации объектов лучше использовать детерминированный режим сканирования. Когда необходимо проанализировать одиночный объект, выявить его характеристики и/или подсчитать гипертриплетные признаки, чтобы, например, занести их в постоянно пополняющуюся базу просканированных эталонных объектов, лучше использовать смешанный тип сканирования.

3D-трейс-метод обладает множеством различных способов для ускорения времени работы распознающей системы. Так, неполный тип формирования гипертриплетных признаков позволяет заметно ускорить выполнение работы алгоритма. Как правило, неполный тип формирования признаков $Res(F)$ описывают геометрические признаки и свойства, связанные с формой 3D-объекта (например, площадь поверхности, объем тела и т.п.). Применение блочной структуры алгоритма позволяет использовать наиболее ресурсоемкие трейс и гипертрейс функционалы единожды, благодаря чему ускоряется реализация автоматической генерации различные гипертриплетных признаков.

Возможность использования в 3D-трейс-преобразовании параллельных вычислений и распределенной обработки данных позволяет также существенно ускорить вычисления гипертриплетных признаков.

Авторы планируют развить данный метод для анализа текстурных и цветных 3D-изображений, аналогично разработанной теории для анализа 2D-изображений [12–14]. Кроме того, планируется развить теорию 3D-трейс-преобразования для распознавания поврежденных трехмерных объектов, для анализа локальных областей и частей объектов. Рассматриваемое 3D-трейс-преобразование способно также производить сегментацию и нелинейную обработку 3D-изображений, аналогично свойствам 2D-трейс-преобразования [15].

Список литературы

1. **Юрков, Н. К.** Концепция синтеза сложных наукоемких изделий / Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 3–5.
2. **Алпатов, А. В.** Способ количественной визуализации формы правого желудочка сердца человека в целях эхокардиографических исследований / А. В. Алпатов, Р. Е. Калинин // Актуальные вопросы клинической морфологии : сб. науч. тр. – Рязань, 2000. – С. 80–84.
3. **Терехин, А. В.** Распознавание объектов методом вычисления оценок с использованием диагональных признаков формы / А. В. Терехин // Известия высших

учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 17–25.
4. **Федотов, Н. Г.** Основные преимущества и дополнительные возможности 3D-трейс-преобразования / Н. Г. Федотов, А. А. Семов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего – плюс. Сер. Технические науки. Информационные технологии. – 2014. – № 03(19). – С. 77–83.
5. **Fedotov, N. G.** The Theory of Image-Recognition Features Based on Stochastic Geometry / N. G. Fedotov // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. – 1998. – Vol. 8, № 2. – P. 264–266.
6. **Fedotov, N. G.** Trace transform of spatial images / N. G. Fedotov, S. V. Ryndina, A. A. Syemov // New Information technologies (PRIA-11-2013) : 11th International conference on Pattern Recognition and Image Analasis. Conference Proceedings (V. I-II). – Samara : IPSI RAS, 2013. – Vol. 1. – P. 186–189.
7. **Yershova, A.** Generating Uniform Incremental Grids on SO(3) Using the Hopf Fibration / A. Yershova, S. Jain, S. M. LaValle, J. C. Mitchell // Int. J. Robot. Res. – 2010. – Vol. 29 (7), № 1. – P. 801–812.
8. **Ashby, N.** Thomson's Problem / N. Ashby, and W. E. Brittin // American Journal of Physics. – 1986. – Vol. 54, № 9. – P. 776–777.
9. **Семов, А. А.** Повышение надежности распознавания 3D-объектов на основе методов стохастической геометрии / А. А. Семов // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – Т. 1. – С. 393–396.
10. **Федотов, Н. Г.** Предварительная обработка изображений на основе трейс-преобразований / Н. Г. Федотов, Е. А. Крючкова, А. В. Моисеев, А. А. Семов // Надежность и качество : тр. Междунар. симпозиума / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 2. – С. 315–316.
11. **Федотов, Н. Г.** Триплетные признаки цветных изображений (методы формирования и оптимизация вычисления) / Н. Г. Федотов, С. В. Романов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 29–36.
12. **Fedotov, N. G.** Recognition of halftone textures from the standpoint of stochastic geometry and functional analysis / N. G. Fedotov, D. A. Mokshanina // Pattern Recognition and Image Analysis, Advances in Mathematical Theory and Applications. – 2010. – Vol. 20, № 4. – P. 551–556.
13. **Fedotov, N. G.** Recognition of images with complex half-tone texture / N. G. Fedotov, D. A. Mokshanina // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 53, № 11. – P. 1226–1232.
14. **Федотов, Н. Г.** Формирование триплетных признаков цветных текстур / Н. Г. Федотов, Д. А. Голдуева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 32–42.
15. **Fedotov, N.** Application of triple features theory to the analysis of half-tone images and colored textures. Feature construction along stochastic geometry and functional analysis. Computer and Information Science / Nikolay Fedotov, Sergey Romanov, Daria Goldueva // Canadian Center of Science and Education. – 2013. – Vol. 6, № 4. – P. 17–24.

References

1. Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, vol. 1, pp. 3–5.
2. Alpatov A. V., Kalinin R. E. *Aktual'nye voprosy klinicheskoy morfologii: sb. nauch. tr.* [Topical problems of clinical morphology: collected papers]. Ryazan, 2000, pp. 80–84.

3. Terekhin A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 1 (29), pp. 17–25.
4. Fedotov N. G., Semov A. A. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego – plyus. Ser. Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii* [XXI century: results of the past and problems of the present – plus. Series: engineering sciences. Information technologies]. 2014, no. 03 (19), pp. 77–83.
5. Fedotov N. G. *Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications*. 1998, vol. 8, no. 2, pp. 264–266.
6. Fedotov N. G. *New Information technologies (PRIA-11-2013): 11th International conference on Pattern Recognition and Image Analasis. Conference Proceedings (V. I–II)*. Samara: IPSI RAS, 2013, vol. 1, pp. 186–189.
7. Yershova A., Jain S., LaValle S. M., Mitchell J. C. *Int. J. Robot. Res*. 2010, vol. 29 (7), no. 1, pp. 801–812.
8. Ashby N. and Brittin W. E. *American Journal of Physics*. 1986, vol. 54, no. 9, pp. 776–777.
9. Semov A. A. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, vol. 1, pp. 393–396.
10. Fedotov N. G., Kryuchkova E. A., Moiseev A. V., Semov A. A. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, vol. 2, pp. 315–316.
11. Fedotov N. G., Romanov S. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 1 (21), pp. 29–36.
12. Fedotov N. G., Mokshanina D. A. *Pattern Recognition and Image Analysis, Advances in Mathematical Theory and Applications*. 2010, vol. 20, no. 4, pp. 551–556.
13. Fedotov N. G., Mokshanina D. A. *Measurement Techniques*. 2011, vol. 53, no. 11, pp. 1226–1232.
14. Fedotov N. G., Goldueva D. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 4 (28), pp. 32–42.
15. Fedotov N., Sergey Romanov S., Goldueva D. Canadian Center of Science and Education. 2013, vol. 6, no. 4, pp. 17–24.

Федотов Николай Гаврилович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой экономической кибернетики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nikolayfedotov@mail.ru

Fedotov Nikolay Gavrilovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of economic cybernetics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

E-mail: Mathematik_Aleksey@mail.ru

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

Моисеев Александр Владимирович
кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и исследования операций в экономике, Пензенский государственный технический университет (Россия, г. Пенза, пр. Байдукова, 1А)

E-mail: moigus@mail.ru

Moiseev Aleksandr Vladimirovich
Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, head of sub-department of applied mathematics and economic operations investigation, Penza State Engineering University (1a Baydukova lane, Penza, Russia)

УДК 004.93: 519.7
Федотов, Н. Г.

3D-трейс-преобразование: режимы сканирования, особенности стохастической реализации, способы ускорения вычислений / Н. Г. Федотов, А. А. Семов, А. В. Моисеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 41–53.

УДК 681.324

В. И. Волчихин, С. А. Зинкин

САМОМОДИФИКАЦИЯ ТОПОЛОГИИ И РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ СЕТЯХ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ (I. ТЕМПОРАЛЬНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СИТУАЦИИ)[1]

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются сети хранения и обработки данных с распределенной архитектурой, в которых обработка перемещаемых данных осуществляется мобильными агентами. Предметом исследования являются процессы развертывания средств обработки данных (мобильных агентов) и самих перемещаемых данных на вычислительной сети. Целью работы является организация гибкого развертывания мобильных объектов (мобильных агентов и перемещаемых данных) в вычислительной сети в целях повышения эффективности последующей обработки данных.

Материалы и методы. Исследование процессов развертывания мобильных объектов в сетях базируется на логико-алгебраическом подходе к описанию темпоральных и пространственных отношений между объектами. Формально знания о структуре, логических связях и функционировании системы предлагается представлять предикатами, функциями и формулами, которые записываются в некоторой сигнатуре.

Результаты. Определена алгебра модулей абстрактных машин и на этой основе формализованы процессы модификации топологии систем хранения и обработки данных. Определена алгебра ситуаций (вариантов размещения мобильных объектов) и основные операции, обеспечивающие перемещение объектов. Предлагаемый подход применим к проектированию виртуализированных систем хранения и обработки данных, в частности облачных сред, грид-систем и самоорганизующихся беспроводных сетей, и позволяет осуществить простой переход от абстрактного проектирования к структурному проектированию данных систем.

Выводы. Предложенные представления временных и пространственных ситуаций обеспечивают недвусмысленное описание операционной и функциональной семантик распределенных сетей хранения и обработки данных. Получены выражения для модулей сетей абстрактных машин, которые аксиоматизируют свойства сети обработки данных в целом. Предложены операторы размещения и формализованы механизмы их выполнения, обеспечивающие создание гибкой и масштабируемой архитектуры сетей хранения и обработки данных.

Ключевые слова: хранение данных, обработка данных, формальное определение распределенных процессов, логико-алгебраический подход, сети абстрактных машин, темпоральные операции, операции развертывания.

V. I. Volchikhin, S. A. Zinkin

TOPOLOGY SELF-MODIFICATION AND OBJECT DEPLOYMENT IN VIRTUALIZED STORAGE AND DATA PROCESSING NETWORKS (I. TEMPORAL AND SPATIAL SITUATIONS)

[1] Статья подготовлена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития НТК России на 2014–2020 г.» (Соглашение № 14.574.21.0045 от 19.06.2014).

Abstract.

Background. The research object is the networks of data storage and processing with distributed architecture, in which the transported data are processed by mobile agents. The research subject is the processes data processing means deployment (mobile agents) and deployment of the transported data themselves on a computer network. The work is aimed at organization of flexible deployment of mobile agents (mobile agents and transported data) in a computer network in order to increase efficiency of further data processing.

Materials and methods. The research of processes of mobile objects deployment in networks is based on the logic-algebraic approach to description of temporal and spatial relations between objects. Nominally, the knowledge on structure, logical links and functioning of the system is suggested to be represented by predicates, functions and formulas that are recorded in some kind of a signature.

Results. The authors determined the algebra of the abstract machine modules and on the basis thereof formalized the modification processes of the data storage and processing systems' topology. The researchers determined the algebra of situations (variants of mobile objects' location) and main operations, providing objects' transportation. The suggested approach can be applied in designing of virtualized systems of data storage and processing, particularly cloud media, grid-systems and self-organizing wireless networks, and allows to implement a simple transition from abstract designing to structural designing of such systems.

Conclusions. The suggested representations of temporal and spatial situations provide unequivocal description of the operational and functional semantics of distributed networks of data storage and processing. The authors obtained expressions for module netwroks of abstract machines that axiomatize the data processing network features in general. The researchers suggested the operators of transportation and formalized the mechanisms of implementation thereof, providing creation of the flexible and scalable architecture of data storage and processing networks.

Key words: data storage, data processing, nominal representations of distributed processes, logic-algebraic approach, networks of abstract machines, temporal operations, deployment operations.

Введение

При работе распределенных систем хранения и обработки данных нередко возникает необходимость в изменении структуры логической сети в процессе работы распределенного приложения. Может потребоваться изменение месторасположения различных программных компонентов или информационных объектов, выполняемое с целью повышения уровня параллельности при работе системы. В сети могут создаваться новые логические узлы, а также новые виртуальные соединения между ними. К системам подобного класса относятся, например, самоорганизующиеся беспроводные сети, облачные среды и грид-системы.

Ранее в работах [1, 2] были определены понятия эволюционирующих семантических сетей с событиями и темпоральными связями (сценариев) и сетей абстрактных машин (СеАМ).

Рассмотрим с позиций данных работ эволюцию (или модификации в процессе работы) сетей хранения и обработки данных. Целью настоящей работы является формальное описание и разработка рекомендаций по реализации механизмов управления модификацией топологии и размещения объектов систем и сетей хранения и обработки данных, основанных на исполняемых спецификациях СеАМ.

1. Сети абстрактных машин и сценарии

Следуя работе [3], рассмотрим некоторую сигнатуру, или множество Σ, представлений с интерпретацией I в множестве S элементов; интерпретация I данному представлению $\sigma \in \Sigma$ ставит в соответствие некоторое абстрактное информационное содержание $I(\sigma)$, т.е. интерпретации соответствует отображение I: $\Sigma \to S$. Положим, что Σ – множество функциональных и предикатных символов различных арностей, а S – множество конкретных функций и предикатов. Предикаты и функции, реализуемые объектами некоторого информационного пространства, задают структурные связи между понятиями предметной области. Причинно-следственные связи между этими понятиями задаются модулями-процедурами, описанными логико-алгебраическими выражениями.

Формально знания о структуре, логических связях и функционировании системы предлагается представлять предикатами, функциями и формулами, которые записываются в некоторой сигнатуре. При помощи унарных предикатов и функций возможно характеризовать состояния объектов, а при помощи n-арных предикатов и функций ($n > 1$) возможно задавать структурные связи между объектами. Логические связи между объектами задаются формулами. При подобном традиционном представлении знаний о предметной области за пределами рассмотрения остаются процедурные знания о функционировании системы. Поэтому в модель представления знаний необходимо включить и процедурную (императивную) составляющую. В качестве процедурной модели представления знаний о функционировании системы в данной работе выбраны сети абстрактных машин. Таким образом задаются логические и структурные связи между понятиями предметной области, а также декларативные и процедурные (императивные) знания о ней.

В многоосновном (многосортном) исчислении предикатов первого порядка каждому терму однозначно приписывается сорт данного терма (сорта, например, могут быть определены для таких классов объектов, как агенты, сетевые узлы, наборы данных, передаваемые сообщения). Имеет место следующее правило вывода [4]:

$$\frac{t_1, t_2, ..., t_k}{f(t_1, t_2, ..., t_k)},$$

где t_1, t_2, …, t_i, …, t_k – термы сортов π_1, π_2, …, π_i, …, π_k соответственно, f – k-арный функциональный символ вида (π_1, π_2, …, π_i,…, $\pi_k \to \pi$), $f(t_1, t_2, …, t_i, …, t_k)$ – терм сорта π.

В основу организации информационного пространства положена реляционная модель данных. Как общеизвестно, в реляционной модели данных предполагается, что каждая база данных представляет собой множество истинных высказываний, структурированных в отношения, каждое из которых задается областью истинности некоторого предиката. Кортежи данных отношений представляют собой наборы значений функциональных выражений, или термов, которые при подстановке в предикат превращают его в истинное высказывание. Некоторые из отношений могут иметь функциональный характер.

Сети абстрактных машин содержат построенные с применением определенной в работах [2] алгебры абстрактных машин «модули-процедуры» (далее просто модули), которые модифицируют, или «обновляют», интерпретацию I, выполняя сгруппированные в блоки так называемые правила обновления вида $I(\sigma_i) \leftarrow s_j$; $\sigma_i \in \Sigma$, $s_j \in S$. В алгебре абстрактных машин мы включаем подобные правила обновления в систему образующих. Сеть абстрактных машин функционирует, переходя от одной интерпретации $I(\tau_i)$ к другой интерпретации $I(\tau_j)$, где τ_i и τ_j – последовательные моменты времени, $\tau_j > \tau_i$.

В модулях используются специальные операции – элементарные обновления функций и предикатов. Элементарное правило обновления функции или предиката записывается в виде правила вывода

$$\frac{t_1, t_2, ..., t_k, t_{k+1}}{s(t_1, t_2, ..., t_k) \leftarrow t_{k+1}},$$

где t_1, t_2, …, t_k – термы различных сортов; s – функциональный или предикатный символ. В случае, если s – функциональный символ, t_{k+1} – суть терм любого сорта, а если s – предикатный символ, то t_{k+1} – булев терм. Здесь «←» – символ операции обновления функции или предиката.

Определенные нами модули сетей СеАМ используют общее пространство структурированной памяти, в качестве элементов которой применяются информационные объекты, представляющие функции и предикаты. Между модулями организуются причинно-следственные связи по типу связей между процессами и объектами.

Императивная (процедурная) составляющая модели представления знаний сетями абстрактных машин задается сценариями, построение которых основано на использовании дейкстровских структурных конструкций (циклы, ветвления, композиции) и темпоральных операций. Последние рассматриваются как результаты причинно-следственных связей между фрагментами процессов и могут использоваться непосредственно в блоках модулей, а также в качестве межмодульных операций в расширенных вариантах сетей СеАМ. Заметим, что чаще удобнее использовать продукционный стиль построения сетей из модулей СеАМ, задавая межмодульные причинно-следственные связи.

2. Алгебра модулей сетей абстрактных машин и сценариев

В основу языка абстрактного описания модулей положены язык многосортного исчисления предикатов первого порядка, расширенный правилами выборки и обновления кортежей информационного пространства, а также язык систем алгоритмических алгебр Глушкова [5].

При определении СеАМ используется понятие блока совместимых (непротиворечивых) обновлений с последовательным выполнением правил обновлений предикатов и функций. В формальной записи блоки ограничиваются фигурными скобками. При построении сетей СеАМ на основе узлов, или модулей, нами будут использоваться обычные для параллельного и распределенного программирования бинарные операции последовательного и параллельного выполнения модулей.

Бинарные темпоральные операции «;», «,», «:», «||», «||•», «|^c» предписывают различные способы выполнения модулей.

Операция «;» предписывает последовательное выполнение модулей, из которых второй модуль может зависеть от первого (в сценариях данная операция может также обозначаться символом «↑»).

Операция «,» предписывает выполнение независимых модулей: последовательное в произвольном порядке или асинхронное параллельное в зависимости от числа доступных обрабатывающих узлов (в сценариях данная операция может также обозначаться символом «|»).

Операция «:» предписывает непараллельное выполнение модулей в произвольном порядке (в сценариях данная операция может обозначаться символом «↕»).

Операция «||» предписывает модулям причинно-следственную связь по крайней мере через единственный предикат либо функцию; при программной реализации применение данной операции требует дальнейшей детализации описания через другие операции, в том числе и операций передачи сообщений или состояний объектов в абстрактном пространстве распределенной памяти СеАМ.

Операция «||•» обозначает выполнение модулей, при котором интервал реализации первого модуля перекрывает интервал реализации второго. Данная операция, например, может указывать на управление одним процессом со стороны другого. Данная операция может быть реализована несколькими казуально связанными модулями СеАМ.

Операция «|^c» указывает на возможное конкурентное выполнение модулей, например, использующих разделяемый ресурс; непосредственно при программировании данная операция не используется – ее применение требует дальнейшей детализации описания, как и в случае операции «||».

Алгебраические свойства данных операций очевидны – например, операции «,», «:» коммутативны и ассоциативны, а операции «;» и «||•» некоммутативны и ассоциативны. Все перечисленные операции распространяются и на векторы модулей (здесь – подсценариев), что упрощает запись сложных сценариев.

В формульной записи имена модулей, сгруппированных в блоки, заключаются в фигурные скобки, а внутри блоков могут использоваться простые скобки для указания на последовательность выполнения операций, например:

$$\{m_1 , m_2 , m_3\},\ \{m_1 ; m_2\} ,\ \{(m_1 ; m_2) , m_3\},\ \{(m_1 : m_2) ; m_3\}.$$

В случае, когда блок содержит лишь один модуль, скобки можно опускать. В настоящей работе алгебра алгоритмов Глушкова используется в основном для записи обычных структурированных (дейкстровских) конструкций – «последовательность операторов», «ветвление», «цикл»; в принципе здесь могла бы использоваться любая другая нотация, также пригодная для записи структурированных программ. Все указанные выше операции мы включаем в состав операций алгебры модулей, что облегчит формирование новых модулей сетей СеАМ. Из алгебры операторов мы выбираем тернарную операцию α-дизъюнкцию и бинарную операцию α-итерацию как основы для формирования модулей СеАМ.

Следуя [5], напомним правила выполнения данных операций. При выполнении операции α-дизъюнкции $[\alpha](m_1 \vee m_2)$ при $\alpha = true$ выполняется модуль m_1, а при $\alpha = false$ выполняется модуль m_2. При реализации операции α-итерации $[\alpha]\{m\}$ модуль m выполняется циклически, пока $\alpha = false$, а при $\alpha = true$ происходит выход из цикла (следует отличать итерационные фигурные скобки от блочных).

Вместо имен модулей m_1, m_2 и m в указанные выше выражения могут подставляться формулы с символами любых из определенных выше операторов, например, возможно построение следующих выражений для модулей:

$$m_6 = [\alpha](\{m_1 , m_2 , m_3\} \vee \{(m_3 ; m_4) , m_5\}),$$

$$m_7 = [\alpha_1](([\alpha_2]\{[\alpha_3](m_1 \vee m_2)\}) \vee ([\alpha_4](m_3 \vee m_4))).$$

Элементарный модуль содержит единственное правило обновления предиката или функции. Пустое обновление R^E эквивалентно тождественному оператору E алгебры алгоритмов Глушкова, не выполняющему никаких действий по модификации информационного пространства. Неопределенное обновление R^N соответствует неопределенному оператору N, сигнализирующему, например, об ошибке или сбое. Продукционному программированию соответствует использование модулей (модулей-продукций) следующего вида:

$$m = [\alpha](L \vee R^E),$$

где L – непустая последовательность элементарных модулей. При определенных очевидных условиях данный модуль может выполняться так же, как и модуль, описываемый выражением $[\neg\alpha]\{L\}$.

3. Передача информационных объектов и сообщений в сетях абстрактных машин

Рассмотрим детальнее формализацию операций передачи копий информационных объектов и сообщений в сетях хранения и обработки данных. Передача истинного или ложного значения высказывания из одной области абстрактной памяти в другую осуществляется с помощью операции $p(x_i) \leftarrow q(y_j)$, после выполнения которой значение одной атомарной константной формулы $q(y_j)$ станет значением другой формулы $p(x_i)$. Здесь p и q – унарные предикатные символы, x_i и y_j – предметные константы. Таким образом, например, процессы или объекты могут обмениваться информацией о своих состояниях или о других свойствах. Предполагается, что предикаты p и q определены в различных областях абстрактной памяти, на которой определена распределенная сеть СеАМ.

Пусть теперь r и z – предикаты одинаковой арности. Путем выполнения операции $r \leftarrow z$ отношение, представленное областью истинности предиката z, станет областью истинности предиката r. Таким образом можно передавать отношения из одной области абстрактной памяти в другую. Принципы реализации данных операций в распределенных вычислительных системах очевидны.

Одним из способов повышения эффективности реализаций виртуализированных систем, базирующихся на формализмах СеАМ, может быть повышение уровня абстрактности на нижних уровнях иерархии СеАМ-машины.

Проиллюстрируем сказанное следующим примером из работ [6, 7] использования сетевого узла хранения информации, построенного на базе накопителя на магнитных дисках. Пусть на нижнем уровне должен быть реализован модуль абстрактной машины, описываемый следующим выражением:

$$[f_1(\text{disk}_1)](f_1(\text{disk}_1) \leftarrow \text{false} \vee R^E).$$

Целью действий, выполняемых данным модулем, является проверка незанятости дискового устройства и последующее занятие его. Первый подход предполагает реализацию данного модуля СеАМ физического уровня. Другой подход предполагает рассмотрение данного модуля как абстрактной машины, использующей некоторый протокол взаимодействия одного из сетевых процессов с дисковым модулем. Последовательность команд, передаваемых по сети, имеет в этом случае следующий вид:

send_lock(msg_1, process_1, disk_1) – послать сообщение msg_1 процесса process_1, блокирующее ресурс (дисковое устройство) disk_1 от вмешательства всех других процессов;

receive_locked(msg_2, process_1, disk_1) − принять сообщение msg_2 от драйвера сетевого контроллера-маршрутизатора дискового устройства disk_1, свидетельствующее о том, что ресурс disk_1 успешно заблокирован; истинное значение логической переменной f1.msg_2 свидетельствует о том, что ресурс disk_1 ранее не был заблокирован ни одним другим процессом и не был занят;

if f1.msg_2 send_busy(msg_3, process_1, disk_1) − послать сообщение msg_3 с требованием занятия ресурса disk_1, если f1.msg_2=true;

send_unlock(msg_4, process_1, disk_1) − послать сообщение msg_4 с требованием разблокировать ресурс disk_1.

Как видно из данного примера, каждая команда сопровождается посылкой соответствующего сообщения. Диалог со стороны сетевого контроллера дискового устройства очевиден. Данный пример показывает: основанное на формальных спецификациях понятие абстрактной машины полезно и на этапе реализации обычных сетевых взаимодействий, не связанных непосредственно с технологией согласования объектов и процессов через общее пространство памяти.

В общем случае в процессе функционирования распределенной системы происходит обмен данными, представляющими в абстрактном пространстве функции и предикаты. Узлы распределенной системы могут обмениваться не только данными, но и программами, т.е. кодами модулей, и благодаря использованию абстрактного пространства памяти при перемещении модулей сохраняются все межмодульные каузальные связи.

Операционная система виртуализированной системы имеет иерархическую структуру, изоморфную структуре абстрактной машины. При этом физическим ресурсам (микропроцессорным модулям, модулям основной, буферной и кэш-памяти, шинам, коммутаторам и маршрутизаторам, сетевым адаптерам, каналам связи) и логическим ресурсам (программам, переменным, массивам данных) соответствуют определенные функции и предикаты из абстрактного пространства памяти. Универсальной структурной единицей информации здесь является абстрактный объект. Данное понятие используется для обозначения любых ресурсов распределенной системы, включая про-

граммно, микропрограммно или аппаратно реализованные модули СеАМ и объекты, в которые отображается состояние физических ресурсов системы, т.е. объектов, представляющих функции и предикаты в информационном пространстве. В целом подобный подход во многом позволяет ликвидировать семантический разрыв между данными и операциями, поддерживаемыми физическими машинами и данными, и операциями, используемыми языками высокого уровня. Последнее утверждение поддерживается еще и тем, что язык формализма СеАМ прямо или косвенно поддерживает императивную, алгебраическую, функциональную и логическую парадигмы, свойственные сразу нескольким языкам высокого уровня типа Пролог, Лисп, Паскаль и программному обеспечению промежуточного уровня, реализованному, например, на языке Java.

Областями истинности предикатов, составляющих абстрактное пространство памяти, представлены операционные и пространственно-временные отношения. Пространственно-временные отношения служат для взаимного соотнесения абстрактных объектов в пространстве и времени, что повышает в существенной степени гибкость реализации сложных сетевых виртуализированных облачных и ГРИД-систем.

4. Модификация топологии систем хранения и обработки данных

Топологию вычислительной сети зададим неориентированным графом G, описывающим структуру сетевых виртуальных связей. Данный граф зададим двумя характеристическими функциями, или унарными предикатами вида

$$V : Y \to \{true, false\},$$

$$U : X \to \{true, false\},$$

где Y – множество «потенциальных» (возможных) вершин, соответствующих узлам сети, $|Y| = n$; X – множество «потенциальных» (возможных) ребер, представленных двухэлементными множествами пар смежных вершин $x_i \in X$, $i = 1, 2, \ldots, m$, $m = \left(n^2 - n\right)/2$, $x_i = \{y_k^{(i)}, y_e^{(i)}\}$, $y_k{}^{(i)} \in Y$, $y_e{}^{(i)} \in Y$, $k \neq e$. Под «потенциальностью» подразумевается возможность вхождения вершин и ребер в граф. Реальное число вершин и ребер в выбранный момент времени задается характеристическими функциями.

Для упрощения мы будем описывать преобразования графа как результат работы модулей СеАМ.

Операции удаления некоторой вершины y_j и инцидентных ей ребер выполняются последовательностью модулей сети абстрактных машин

$$m_{yx}^{-} = m_y^{-}; m_x^{-},$$

где первому из модулей соответствует выражение

$$m_y^{-} = [V(y_j)](V(y_j) \leftarrow false \vee R^E),$$

которым описывается удаление вершины y_j из графа G путем обновления предиката V. В условной части данного модуля проверяется предварительное условие $V(y_j)$ наличия вершины y_j в графе G. Второй модуль m_x^{-} удаляет все

ребра, инцидентные удаляемой вершине y_j. Возможно несколько семантически эквивалентных вариантов выражений для модуля m_x^-:

$$1)\ m_x^- = [\neg((\exists x \in X)(U(x)\ \&\ f_{iselem}(y_j, x))]$$
$$\{((\exists! x \in X)(U(x)\ \&\ f_{iselem}(y_j, x)); U(x) \leftarrow false\};$$

$$2)\ m_x^- = [\underline{\neg((\tilde{\exists}! x \in X)(U(x)\ \&\ f_{iselem}(y_i, x))}]\{U(x) \leftarrow false\};$$

$$3)\ m_x^- = [(\forall x \in X)(U(x)\ \&\ f_{iselem}(y_i, x))](U(x) \leftarrow false \vee R^E);$$
$$m_x^- = [\underline{(\tilde{\forall} x \in X)(U(x)\ \&\ f_{iselem}(y_i, x))}](U(x) \overset{*}{\longleftarrow} false \vee R^E).$$

В данных выражениях используются квантифицированные операторы выбора $\tilde{\exists}!$ и $\tilde{\forall}$. Оператор $\tilde{\exists}!$ выбирает одно из значений переменной x (что соответствует выбору одного из ребер графа G), при котором истинно условие $U(x)\&f_{iselem}(y_j, x)$, где f_{iselem} – бинарный предикат, устанавливающий вхождение элемента y_j в двухэлементное множество x. Истинность высказывания $f_{iselem}(y_j, x)$ при связанном вхождении переменной x означает, что вершина y_j инцидентна выбранному ребру. Выполнение правила $U(x) \leftarrow false$ обновления характеристической функции U соответствует исключению выбранного ребра x из графа G. Данный процесс, согласно первому выражению для модуля m_x^-, выполняется циклически, пока не станет истинным условие

$$\neg((\exists x \in X)(U(x)\ \&\ f_{iselem}(y_j, x)),$$

т.е. пока не будут исключены все ребра x, инцидентные удаляемой вершине y_j.

Во втором выражении использован введенный нами оператор «подчеркивание», ставящий в соответствие подчеркнутому выражению некоторое условие, истинное в том случае, если с помощью квантифицированного оператора выбора $\tilde{\exists}!$ удалось сделать указанный выбор. Тогда правило $U(x) \leftarrow false$ обновления характеристической функции U будет выполняться до тех пор, пока не станет истинным условие

$$\underline{\neg((\tilde{\exists}! x \in X)(U(x)\ \&\ f_{iselem}(y_i, x))}.$$

Первые два выражения для модуля m_x^- описывают циклы выбора и удаления ребер, инцидентных выбранной и удаляемой первым модулем m_y^- вершине y_j. В третьем выражении, «модуле-продукции» СеАМ, используется квантифицированный оператор выбора $\tilde{\forall}$, с помощью которого осуществляется выбор всех значений переменной x, для которых истинно условие $U(x)\&f_{iselem}(y_j, x)$. Порядок такого выбора здесь не регламентирован. Правило $U(x) \overset{*}{\longleftarrow} false$ обновления характеристической функции U будет выполняться для всех выбранных значений переменной x, что соответствует исключению из графа G всех ребер, инцидентных вершине y_j. Порядок исключения ребер из графа при этом не регламентирован, как и в двух первых случаях. По числу элементарных (внутренних) операций последние два выраже-

ния эквивалентны. Реализация первого выражения приводит к двойному выбору значений переменной x и поэтому неэффективна.

Операции включения в сеть нового узла и создания новых виртуальных соединений можно реализовать с помощью одного модуля СеАМ m^{+}_{xy}, описываемого следующим выражением:

$$m^{+}_{yx} = [\neg V(y_i)]([(\tilde{\forall} x \in X) U_{yj}(x)](\{V(y_i) \leftarrow true, U_{yj}(x) \xleftarrow{*} true\} \vee R^E) \vee R^E),$$

где U_{yj} – характеристическая функция, или унарный предикат вида

$$U_{yj} : X \to \{true, false\}$$

для подмножества $X_{yj} \subseteq X$ ребер, которые будут инцидентны вершине y_j. В условной части данного модуля проверяется условие $\neg V(y_j)$ предварительного отсутствия вершины y_j в сети. Символ операции «подчеркивание» можно опустить, так как подчеркнутое выражение с квантифицированным оператором выбора $\tilde{\forall}$ – единственное в квадратных скобках.

Приведенные построения показывают, что для описания модификации топологии систем и сетей хранения и обработки пригоден такой же формализм, который ранее нами использовался для описания сценариев. Следовательно, для практической реализации топологических операций и распределенных приложений в сетях хранения и обработки данных может быть использована одна и та же технология. Для децентрализованного управления топологией сети необходимо, чтобы программно реализуемые модули, выполняющие модификацию информационных объектов V и U, размещались на каждом узле сети и копировались на каждый вновь подключаемый узел. Копии информационных объектов, представляющих характеристические функции V и U в пространстве функций и предикатов, также должны размещаться на каждом узле сети, но они должны быть активными только на одном из них. В случае отключения данного узла в сети активной должна стать другая произвольно выбранная копия объектов V и U. В один и тот же момент времени только один модуль может модифицировать активные объекты V и U. В случае модификации этих объектов ее результат должен быть передан на все остальные узлы. В организации управления образованием новых конфигураций сети участвуют агенты-серверы и агенты хранения-размещения объектов; данные агенты могут при необходимости реализовывать и другие известные алгоритмы децентрализованного управления ресурсами.

5. Размещение объектов в сетях хранения данных и алгебра ситуаций

Введем далее следующие обозначения для пространственных отношений и соответствующих им одноименных операций между объектами, задействованных в том или ином сценарии:

$a \text{⫴} b$ – объекты a и b необходимо размещаются на одном и том же узле сети;

$a \text{①} b$ – объекты a и b возможно размещаются на одном и том же узле сети (но возможно размещение и на разных узлах);

$a \text{↕} b$ – объекты a и b необходимо размещаются на разных узлах сети;

$a \,⓵\, b$ – лишь один из объектов должен находиться в сети в заданный момент времени (аналог α-дизъюнкции в алгебре операторов В. М. Глушкова [5]);

$a \,⓸\, b$ – возможно размещение на одном или разных узлах одного или обоих объектов;

$a \,⓷\, b$ – необходимо размещение на одном и том же узле обоих объектов либо одного из них;

$a \,⊙\, y$ – объект a размещен на узле y.

Операции (d-операции) связывания объектов данными отношениями необходимы для размещения объектов в сети с учетом определенных рекомендаций и ограничений. Их имена составляют сигнатуру d-алгебры (от *deployment* – размещение, развертывание). Добавим к сигнатуре унарную операцию уничтожения объекта a на каком-либо узле $⓫\, a$ и операцию уничтожения всех его копий $⓫'\, a$.

Операция $Ⓒ^n a$ позволяет получать копии (клоны) агентов a', a'', …, $a^{(n)}$ от исходного агента a. Ей соответствует следующее обновление R_C функции f_c, связывающее имя агента-родителя с множеством имен его копий:

$$R_C = f_c(a) \leftarrow \{a', a'', ..., a^{(n)}\}.$$

Зафиксируем систему образующих, включающую множество элементарных ситуаций (начальное размещение агентов, менеджеров, данных, результатов на узлах сети). Пусть система операций, принимающих значения в множестве ситуаций – вариантов пространственных размещений объектов, содержит перечисленные выше d-операции. Посредством суперпозиции данных операций и системы образующих порождаются новые ситуации пространственного размещения объектов. Таким образом, нами сформулирован подход к определению d-алгебры размещения объектов, или алгебры пространственных ситуаций.

Представляет интерес интеграция методологии построения пространственных сценариев (ситуаций) с методологией сетей абстрактных машин. Рассмотрим следующий пример сложной организации распределенной среды. Пусть $A = \{a_1, a_2\}$ – множество мобильных агентов, $D = \{d_1, d_2, d_3\}$ – множество наборов данных, $R = \{r_1, r_2\}$ – множество результатов, $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}$ – множество узлов сети.

Следующее множество d-операций (пространственная ситуация) определяет начальное размещение объектов в сети перед выполнением некоторого сценария обработки данных:

$$U_1 = (a_1 ⓫ a_2,\ a_1 ↕ d_1,\ a_1 ↕ d_2,\ a_1 ↕ d_3,\ d_1 ↕ d_2 ↕ d_3).$$

Так как агенты a_1 и a_2 до начала реализации сценария планируется разместить на одном и том же узле, здесь достаточно определить размещение наборов данных относительно одного агента и между собой.

Пусть в процессе реализации некоторого сценария требуется, чтобы агенты a_1 и a_2 размещались на различных узлах, наборы данных d_1 и d_2 – на том же узле, что и агент a_1, а набор данных d_3 – на любом узле сети, где рас-

положен агент a_2, кроме такого, на котором размещен агент a_1, а результаты r_1 и r_2 в процессе обработки данных должны сформироваться на различных узлах сети, на которых не находятся наборы данных d_1, d_2, d_3. Такое размещение определяется следующим множеством *d*-операций:

$$U_2 = (a_1 ⓘ a_2,\ a_1 ⓙ d_1,\ a_1 ⓙ d_2,\ \mathrm{a}_1 ⓘ d_3,\ r_1 ⓘ d_1,\ a_2 ⓙ d_3,$$
$$r_1 ⓘ d_2,\ r_1 ⓘ d_3,\ r_2 ⓘ d_1\ r_2 ⓘ d_2,\ r_2 ⓘ d_3,\ r_1 ⓘ r_2).$$

Допустим, что после завершения сценария программные агенты должны размещаться на одном и том же узле вместе с результатами, а исходные наборы данных – на другом узле. Подобное размещение может быть задано следующим множеством *d*-операций:

$$U_3 = (a_1 ⓙ a_2,\ a_1 ⓙ r_1,\ a_1 ⓙ r_2,\ a_1 ⓘ d_1,\ a_1 ⓘ d_2,$$
$$a_1 ⓘ d_3,\ d_1 ⓙ d_2,\ d_2 ⓙ d_3,\ d_1 ⓙ d_3).$$

В общем случае ситуациям U_1, U_2 и U_3 могут соответствовать по нескольку вариантов размещения объектов. Для операций размещения объектов $a ⓙ b$, $a ⓘ b$, $a ⓘ b$, $a ⓘ b$, $a ⓘ b$, $a ⓙ b$ определим соответственно бинарные предикаты f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6 и унарную функцию f_z непосредственного, или прямого, размещения объектов. В ряде случаев удобно рассматривать вместо унарной функции f_z бинарное отношение $\odot$ (или f_z') размещения объектов, учитывая его функциональный характер. Множество операций U_1 по размещению объектов задается блоками B_1 и C_1 обновлений функций (здесь и далее в число функций включаются и высказывательные функции, или предикаты):

$$B_1 = \{f_1(a_1, a_2) \leftarrow true, f_3(a_1, d_1) \leftarrow true, f_3(a_1, d_2) \leftarrow true,$$
$$f_3(a_1, d_3) \leftarrow true, f_3(d_1, d_2) \leftarrow true, f_3(d_1, d_3) \leftarrow true, f_3(d_2, d_3) \leftarrow true\},$$
$$C_1 = \{f_z(a_1) \leftarrow y_1, f_z(a_2) \leftarrow y_1, f_z(d_1) \leftarrow y_3, f_z(d_2) \leftarrow y_4, f_z(d_3) \leftarrow y_5\}.$$

В блоке B_1 выполняется конкретизация бинарных пространственных отношений между объектами, а в блоке C_1 обновляется унарная функция размещения f_z.

Множество операций U_2 по размещению объектов задается блоками B_2 и C_2:

$$B_2 = \{f_1(a_1, a_2) \leftarrow false, f_3(a_1, d_1) \leftarrow false, f_3(a_1, d_2) \leftarrow false,$$
$$f_3(d_1, d_3) \leftarrow false, f_3(d_2, d_3) \leftarrow false, f_3(d_1, d_2) \leftarrow false,$$
$$f_3(a_1, d_3) \leftarrow false, f_3(a_1, a_2) \leftarrow true, f_1(a_1, d_1) \leftarrow true,$$
$$f_1(a_2, d_3) \leftarrow true, f_1(a_1, d_2) \leftarrow true, f_3(a_2, d_3) \leftarrow true,$$
$$f_3(r_1, d_1) \leftarrow true, f_3(r_1, d_2) \leftarrow true, f_3(r_1, d_3) \leftarrow true,$$
$$f_3(r_2, d_1) \leftarrow true, f_3(r_2, d_2) \leftarrow true, f_3(r_2, d_3) \leftarrow true, f_3(r_1, r_2) \leftarrow true\},$$

$$C_2 = \{f_z(a_2) \leftarrow y_2, f_z(d_1) \leftarrow y_1, f_z(d_2) \leftarrow y_1, f_z(d_3) \leftarrow y_2,$$

$$f_z(r_1) \leftarrow y_5, f_z(r_2) \leftarrow y_3\},$$

а множество операций U_3 по окончательному размещению объектов задается блоками B_3 и C_3:

$$B_3 = \{f_3(a_1, a_2) \leftarrow false, f_1(a_1, d_1) \leftarrow false, f_1(a_1, d_2) \leftarrow false,$$

$$f_3(a_2, d_3) \leftarrow false, f_3(r_1, d_1) \leftarrow false, f_3(r_1, d_2) \leftarrow false,$$

$$f_3(r_1, d_3) \leftarrow false, f_3(r_2, d_1) \leftarrow false, f_3(r_2, d_2) \leftarrow false,$$

$$f_3(a_2, d_3) \leftarrow true, f_3(r_2, d_3) \leftarrow false, f_3(r_1, r_2) \leftarrow false,$$

$$f_1(a_1, a_2) \leftarrow true, f_1(a_1, r_1) \leftarrow true, f_1(a_1, r_2) \leftarrow true,$$

$$f_3(a_1, d_1) \leftarrow true, f_3(a_1, d_2) \leftarrow true, f_3(a_1, d_3) \leftarrow true,$$

$$f_1(d_1, d_2) \leftarrow true, f_1(d_2, d_3) \leftarrow true, f_1(d_1, d_3) \leftarrow true\},$$

$$C_3 = \{f_z(a_1) \leftarrow y_2, f_z(r_1) \leftarrow y_2, f_z(r_2) \leftarrow y_2, f_z(d_3) \leftarrow y_1\}.$$

Поэтапное размещение агентов, исходных данных и результатов иллюстрирует рис. 1.

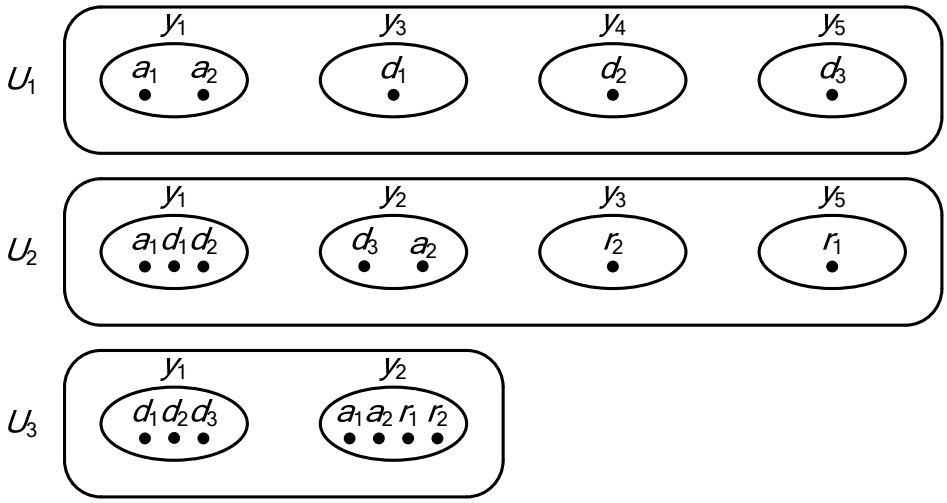


Рис. 1. Размещение агентов, наборов исходных данных
и результатов в процессе реализации пространственного сценария

Реализация операций ⦀, ⦶ и ⦷ предполагает, что для них выполняются свойства ассоциативности, коммутативности, а соответствующие им отношения транзитивны. Операция ⊙ некоммутативна, а соответствующее ей отношение асимметрично.

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют результаты выполнения действий, предписанных пространственными сценариями (ситуациями) U_1, U_2 и U_3.

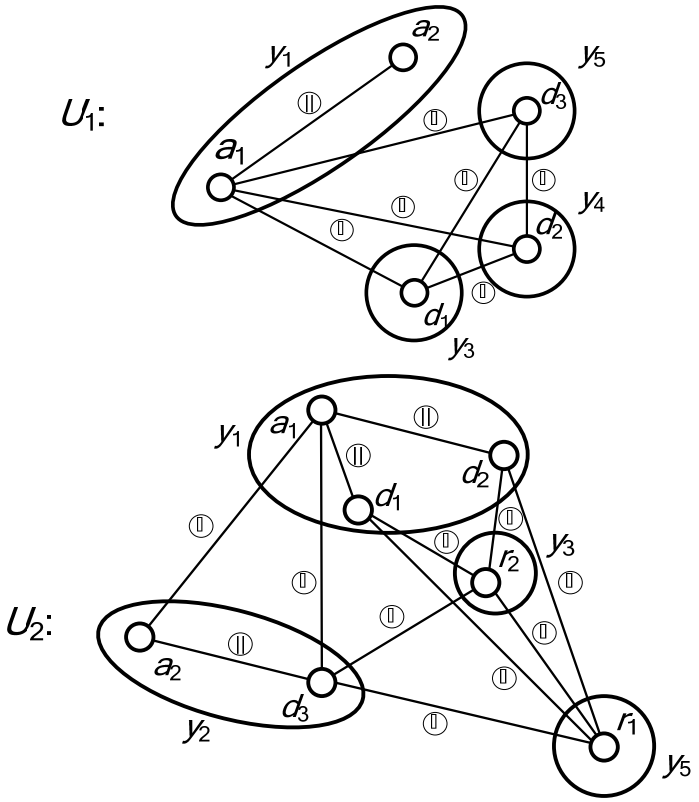


Рис. 2. Эволюции пространственных бинарных отношений между объектами (ситуации U_1 и U_2)

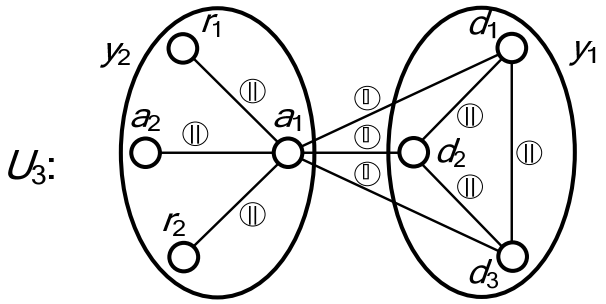


Рис. 3. Эволюции пространственных бинарных отношений между объектами (ситуация U_3)

Определим также возможность установления групповых связей между объектами при их размещении в сети. Например, блок обновления функций

$$F_A(A_1) \leftarrow Y_{A1}, F_D(D_1) \leftarrow Y_{D1}, F_R(R_1) \leftarrow Y_{R1}\}$$

задает размещение подмножества мобильных агентов A_1, подмножества наборов данных D_1 и подмножества результатов R_1 (результирующих наборов данных) на соответствующих, возможно пересекающихся, подмножествах

узлов вычислительной сети). Здесь $A_1 \in \mathbf{P}(A)$, $D_1 \in \mathbf{P}(D)$, $R_1 \in \mathbf{P}(R)$, $Y_{A1} \in \mathbf{P}(Y)$, $Y_{D1} \in \mathbf{P}(Y)$, $Y_{R1} \in \mathbf{P}(Y)$, $\mathbf{P}$ – символ булеана.

Заключение

Самомодифицируемые сценарные модели, формализуемые сетями абстрактных машин, особенно удобны при создании такого сетевого программного обеспечения реконфигурируемых систем хранения и обработки структурированных данных, в котором стираются грани между сетевой операционной системой, распределенной системой управления, базой данных и распределенным приложением.

Используемые для представления сценариев СеАМ допускают недвусмысленное описание операционной и функциональной семантик. Кроме того, представлены выражения для модулей, или узлов СеАМ, представляющих собой логические формулы, которые аксиоматизируют определенные свойства сети в целом. Предложены операторы размещения объектов в сетях хранения и обработки данных и формализованы механизмы их выполнения.

Обоснована необходимость разработки новых методов и средств поддержки функционально-структурной и функционально-топологической декомпозиции архитектурных моделей систем и сетей хранения и обработки данных. Эти модели и методы должны соответствовать современной технологической инфраструктуре параллельных и распределенных баз данных, кластерных и мультипроцессорных систем, сетевых соединений, интеллектуальных контроллеров и накопителей информации.

Список литературы

1. **Зинкин, С. А.** Самомодифицируемые сценарные модели функционирования систем и сетей хранения и обработки данных (реализация и свойства сценарных моделей) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 13–21.
2. **Зинкин, С. А.** Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (базовый формализм и его расширения) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 13–22.
3. **Брой, М.** Информатика. Основополагающее введение / М. Брой. – М. : Диалог-МИФИ, 1996. – 299 с.
4. **Колмогоров, А. Н.** Математическая логика / А. Н. Колмогоров, А. Г. Драгалин. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 240 с.
5. Многоуровневое структурное проектирование программ. Теоретические основы, инструментарий / Е. Л. Ющенко, Г. Е. Цейтлин, В. П. Грицай, Т. К. Терзян. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 208 с.
6. **Волчихин, В. И.** Логико-алгебраические модели и методы в проектировании функциональной архитектуры распределенных систем хранения и обработки данных / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 2 (22). – С. 3–16.
7. **Зинкин, С. А.** Функционально-структурная реализация интеллектуальных систем управления внешней памятью ЭВМ и систем / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 1 (5). – С. 14–24.

References

1. Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 2, pp. 13–21.
2. Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 3, pp. 13–22.
3. Broy M. *Informatika. Osnovopolagayushchee vvedenie* [Informatics. Fundamental introduction]. Moscow: Dialog-MIFI, 1996, 299 p.
4. Kolmogorov A. N., Dragalin A. G. *Matematicheskaya logika* [Mathematical logic]. Moscow: Editorial URSS, 2005, 240 p.
5. Yushchenko E. L., Tseytlin G. E., Gritsay V. P., Terzyan T. K. *Mnogourovnevoe strukturnoe proektirovanie programm. Teoreticheskie osnovy, instrumentariy* [Multilevel structural design programs. Theoretical basics, instruments]. Moscow: Finansy i statistika, 1989, 208 p.
6. Volchikhin V. I., Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 2 (22), pp. 3–16.
7. Zinkin S. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2008, no. 1 (5), pp. 14–24.

Волчихин Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор, президент Пензенского государственного университета (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rectorat@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich
Doctor of engineering sciences, professor, President of Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

E-mail: zsa49@yandex.ru

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

УДК 681.324

Волчихин, В. И.

Самомодификация топологии и развертывания объектов в виртуализированных сетях хранения и обработки данных (I. Темпоральные и пространственные ситуации) / В. И. Волчихин, С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 54–69.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 681.511.4

О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, С. В. Никулин, А. Д. Семенов

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНЫХ ПОМЕХ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является алгоритм экстремального управления инерционным объектом с запаздыванием. Целью работы является подтверждение работоспособности и эффективности предложенного алгоритма на примере зависимости между соотношением скоростей бумажной массы и бумагоделательной машины и среднеквадратичным отклонением веса бумажного полотна.

Материалы и методы. В работе использованы методы современной теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, теории вероятностей и математической статистики, компьютерного моделирования.

Результаты. По экспериментальным данным с помощью пакета System Identification Toolbox была получена модель, устанавливающая взаимосвязь между напором и среднеквадратичным отклонением веса бумажного полотна. Произведен анализ предложенного алгоритма экстремального управления для минимизации среднеквадратичного отклонения веса бумажного полотна.

Выводы. Исследования, проведенные на математических моделях и на реальном объекте, показали, что предложенный алгоритм поиска экстремума инерционного объекта с запаздыванием, основанный на методе периодического поискового сигнала с фильтрацией помех путем синхронного накопления и последующего поиска максимума выделенной из выходного сигнала второй гармоники является эффективным.

Ключевые слова: инерционный объект с запаздыванием, экстремальное управление, синхронное накопление, гармонический анализ.

O. V. Avdeeva, D. V. Artamonov, S. V. Nikulin, A. D. Semenov

EXTREME CONTROL OF AN INERTIAL OBJECT WITH DELAY IN CONDITIONS OF A STRONG NOISE

Abstract.

Background. The research object is an algorithm of extreme control of an inertial object with delay. The aim of the work is to confirm working capacity and efficiency of the suggested algorithm by the example of dependence between paper mass'

and paper making machine's speeds ratio and a mean-square weight deviation of a paper sheet.

Materials and methods. The authors used the methods of the modern theory of automatic control and technological process automation, the probability theory and mathematical statistics, computer modeling.

Rsults. According to experimental data, using the System Identification Toolbox package, the authors obtained a model establishing interconnection between a thrust and a mean-square weight deviation of a paper sheet. The researchers analyzed the suggested algorithm of extreme control to minimize the mean-square weight deviation of paper sheet.

Conclusions. The research conducted using mathematical models and real objects showed that the suggested algorithm of searching of an extremum of an inertial object with delay, based on the method of periodic searching signal with noise filtering by synchronous accumulation and further search of a maximum of a second harmonic, extracted from an output signal, is an effective one.

Key words: inertial object with delay, extremal control, synchronous accumulation, harmonic analysis.

Введение

Экстремальное управление инерционными объектами с запаздыванием, работающими в условиях сильных помех, основанное на традиционных методах оптимальной фильтрации [1], стохастической аппроксимации [2], методах теории статистических решений и динамического программирования (дуального управления) [3] требует определенных ограничений на характеристики объекта и действующих на него возмущений.

В связи с этим на первый план выступает задача эффективного выделения полезного сигнала на фоне сильных помех, а задача экстремального управления отодвигается на второй план.

Постановка задачи

Одним из эффективных методов фильтрации полезного сигнала является метод накопления (усреднения) [4]. При использовании этого метода наибольший эффект достигается в том случае, если полезный сигнал является гармоническим сигналом с известным периодом. Частота этого сигнала должна находиться в полосе пропускания системы и для повышения быстродействия должна приближаться к ее верхней границе. Тогда его эффективное выделение достигается использованием либо корреляционного метода [5], либо метода синхронного накопления [4].

Наиболее предпочтительным представляется использование метода синхронного накопления как более простого в реализации и менее требовательно к форме входного и выходного сигналов экстремальной системы [4].

Использование метода синхронного накопления предопределяет применение методов периодического поискового сигнала для поиска экстремума. В том случае, если временное запаздывание в экстремальном объекте фиксированное, для поиска экстремума можно воспользоваться методом синхронного детектирования предварительно, с учетом запаздывания, синхронизируя фазы опорного и выходного сигналов экстремальной системы с помощью фазовращателя. В противном случае (при изменяющемся временном запаздывании) требуется использование специальных методов поиска экстремума.

1. Помехозащищенный алгоритм поиска экстремума инерционного объекта с запаздыванием

Будем полагать, что объект находится в окрестностях экстремума. При значительном удалении от него переход в окрестность точки экстремума можно осуществить, совмещая методы синхронного накопления и детектирования, выбирая период опорного сигнала в несколько раз больше времени запаздывания.

При нахождении в области экстремума в силу четности экстремальной характеристики в выходном сигнале экстремального объекта, вход которого модулируется гармоническим сигналом, будут появляться четные гармоники. Тогда экстремальное значение амплитуды второй гармоники будет свидетельствовать о нахождении системы в точке экстремума. Временное запаздывание в этом случае не будет влиять на точность определения экстремума. Кроме того, можно увеличить частоту гармонического сигнала на входе экстремального объекта, выбирая ее, как уже отмечалось, около верхней границы полосы пропускания инерционного объекта.

На основании вышеизложенного предлагается следующий помехозащищенный алгоритм поиска экстремума инерционного объекта с запаздыванием:

1. Формируют гармонический сигнал, частота которого выбирается в несколько раз больше временного запаздывания в объекте, а амплитуда не нарушает его работу.

2. Модулируют вход экстремальной системы этим гармоническим сигналом.

3. Производят фильтрацию выходного сигнала методом синхронного накопления.

4. Гармоническим анализом выделяют вторую гармонику отфильтрованного выходного сигнала.

5. По фазовому сдвигу определяют направление движения к экстремуму.

6. Изменяют входной сигнал объекта до тех пор, пока в выходном сигнале не появится вторая гармоника.

7. Увеличивают частоту модулирующего сигнала, выбирая ее близкой к частоте пропускания экстремального объекта.

8. Традиционными методами экстремального управления реализуют поиск максимума амплитуды второй гармоники

2. Построение модели экстремального объекта

Для проверки разработанного алгоритма была построена Simulink-модель экстремального объекта. Объектом исследования была выбрана бумагоделательная машина (БДМ).

Известна [6], экстремальная зависимость между соотношением скоростей бумажной массы, поступающей из напускного устройства, и сетки бумагоделательной машины на неравномерность просвета бумаги. Поскольку изменение скорости бумагоделательной машины влечет к изменению технологического режима и влияет на все ее системы, отношение скоростей будем задавать путем изменения скорости истечения бумажной массы, регулируя ее с помощью изменения напора в напускном устройстве.

Данные о неравномерности просвета будем косвенным образом вычислять по весу бумажного полотна, измеряемого сканирующим устройством. Очевидно, что чем меньше изменение веса относительно среднего значения, тем меньше неравномерность бумажного полотна и, следовательно, изменение дисперсии веса метра квадратного будет оценкой неравномерности просвета.

На рис. 1 приведены экспериментальные осциллограммы изменения напора, веса бумажного полотна и расчетные значения его среднеквадратичного отклонения (СКО).

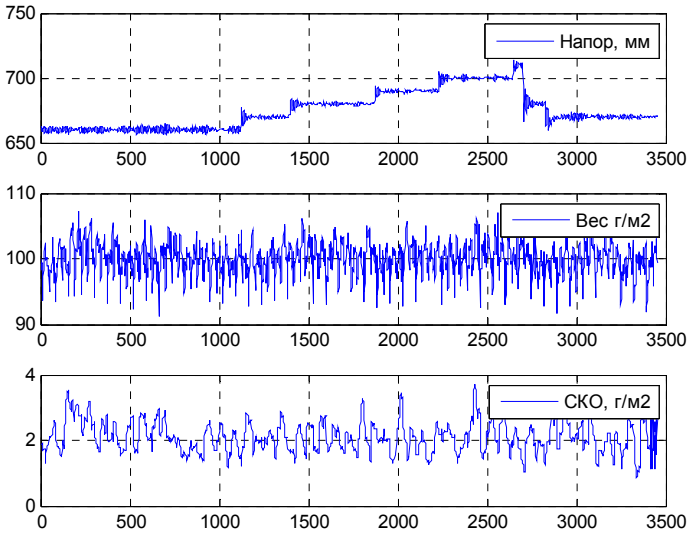


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные осциллограммы изменения напора, веса бумажного полотна и его СКО

Первые две осциллограммы были получены экспериментально. Расчет осциллограммы СКО проводился по рекуррентной процедуре оценки математического ожидания и дисперсии.

В результате статистической обработки экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, была получена экстремальная зависимость между напором напускного устройства и среднеквадратичным отклонением веса, представленным на рис. 2.

Эта экстремальная зависимость позволяет установить, что рабочий диапазон изменения СКО веса бумажного полотна при экстремальном регулировании лежит в диапазоне 2,04–2,14 г/м^2. Фактическое изменение СКО, приведенное на рис. 1, находится в диапазоне 1–3 г/м^2, что на порядок превышает рабочий диапазон и позволяет считать, что рассматриваемый объект отвечает исходным требованиям, т.е. является инерционным объектом с запаздыванием, работающим в условиях сильных помех.

По экспериментальным данным, представленным на рис. 1, с помощью пакета System Identification Toolbox была получена модель, устанавливающая взаимосвязь между напором и СКО веса бумажного полотна. Модель включает в себя две подмодели: подмодель типа Гаммерштейна, воспроизводящую

нелинейную экстремальную зависимость (рис. 2) и линейные подмодели возмущений, действующие на входе и выходе объекта. Simulink-модель такого объекта приведена на рис. 3.

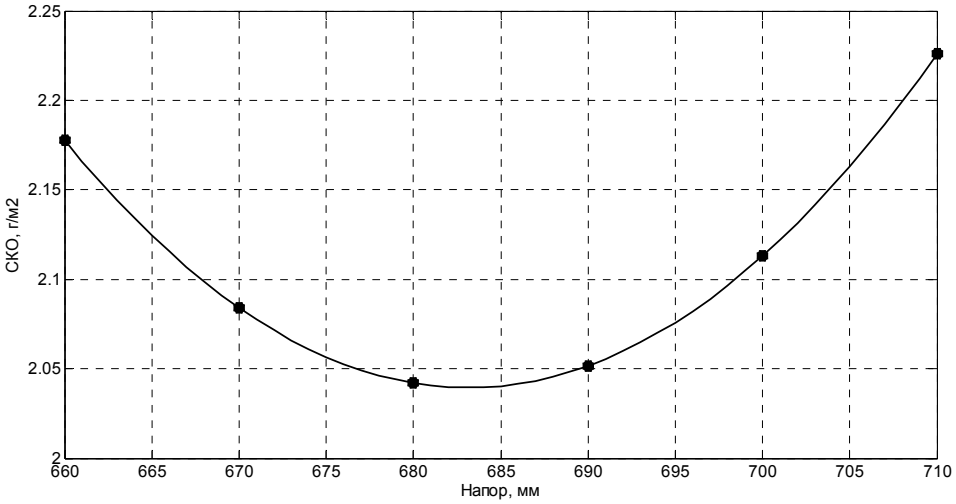


Рис. 2. Экстремальная зависимость СКО от напора

Блок ограничения Saturation ограничивает входной сигнал нелинейного (экстремального) элемента в диапазоне 660–710 мм. Нелинейный блок Fcn воспроизводит экстремальную зависимость, приведенную на рис. 2, запаздывание в объекте равно 30 с.

На рис. 4 показаны результаты моделирования, хорошо совпадающие с экспериментальными данными (рис. 1).

3. Анализ помехозащищенного экстремального управления

С помощью разработанной Simulink-модели инерционного экстремального объекта, приведенной на рис. 1, был проведен анализ помехозащищенного экстремального управления, построенного на основе предлагаемого алгоритма. Для этого на вход сумматора Add (рис. 3) подавался гармонический сигнал с амплитудой 10 мм и периодом 125 с, что примерно в четыре раза превышает время запаздывания.

В процессе моделирования постоянный входной сигнал экстремального объекта, задаваемый блоком Constant, выбирался таким образом, чтобы рабочая точка объекта находилась справа от точки экстремума (рис. 5), в точке экстремума (рис. 6) и слева от точки экстремума (рис. 7).

На рисунках 5–7,***а*** приведены входной гармонический и выходной зашумленный сигналы инерционного экстремального объекта, на рис. 5–7,***б*** – результаты синхронного накопления входного и выходного сигналов за 23 периода входного сигнала, на рис. 5–7,***в*** – результаты гармонического анализа входного и выходного сигналов, отфильтрованных методом синхронного накопления.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного алгоритма. При нахождении в точке экстремума видно, что амплитуда второй гармоники достигает максимального значения.

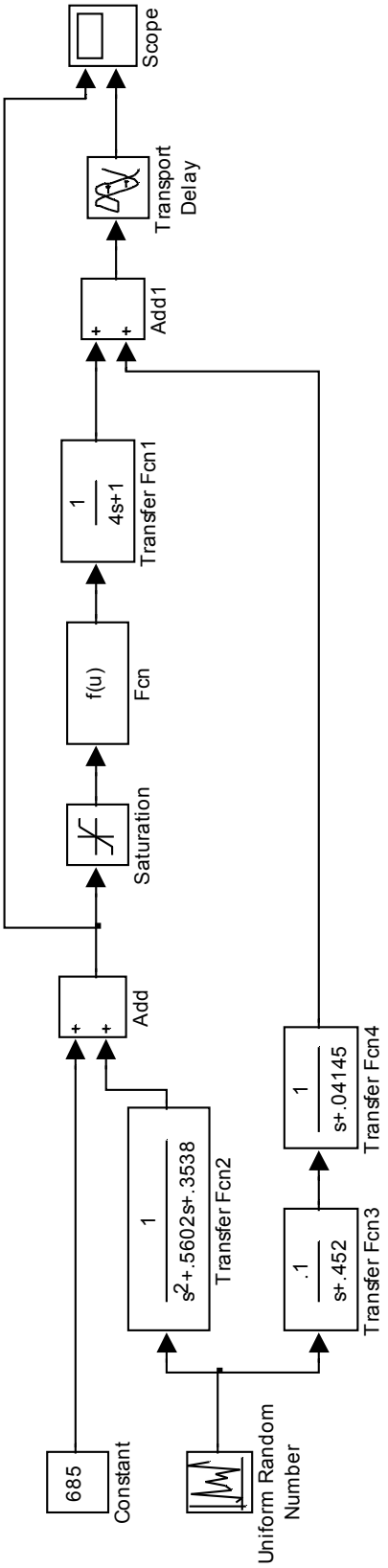


Рис. 3. Модель инерционного экстремального объекта

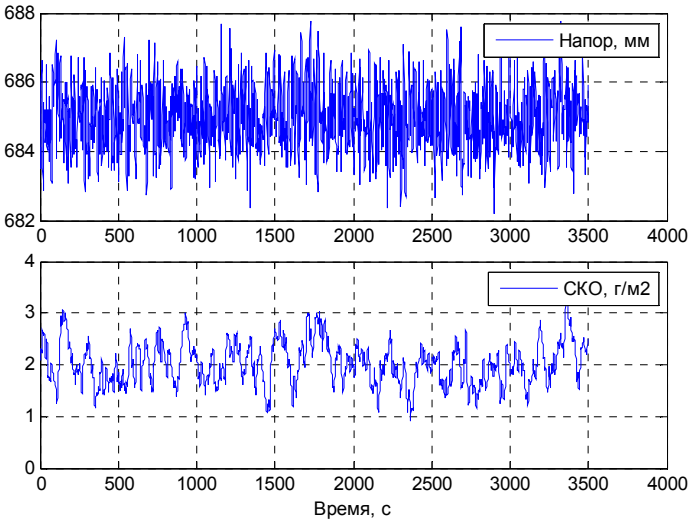


Рис. 4. Расчетные осциллограммы изменения напора
и среднеквадратичного отклонения бумажного полотна

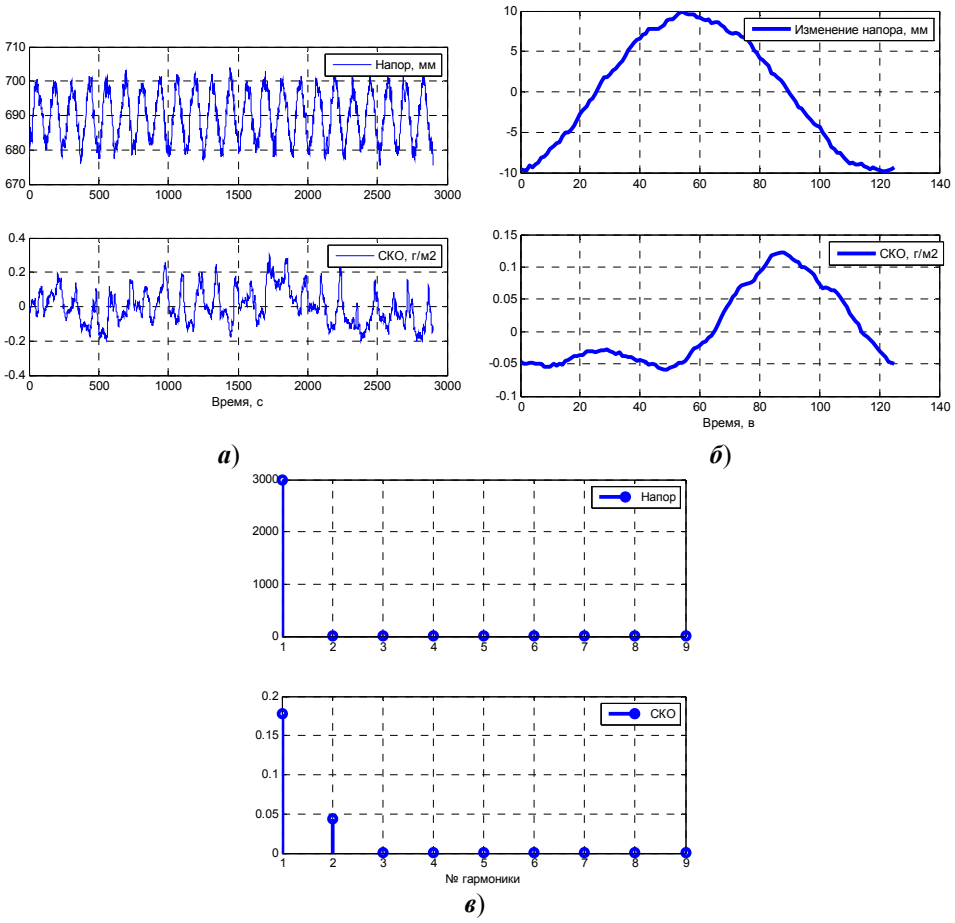
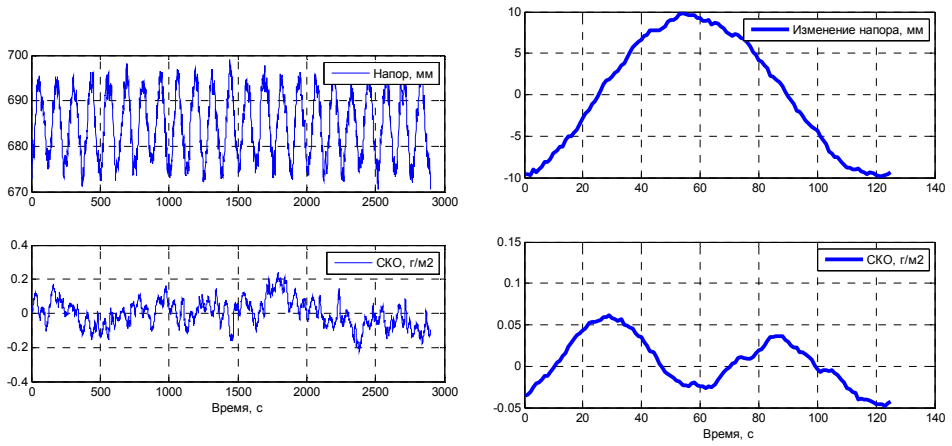
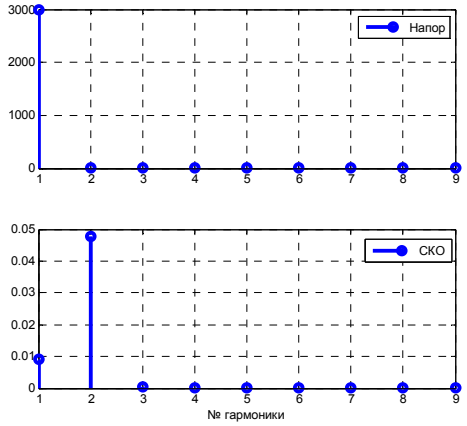


Рис. 5. Результаты моделирования при среднем значении
входного сигнала больше оптимального (690 мм)

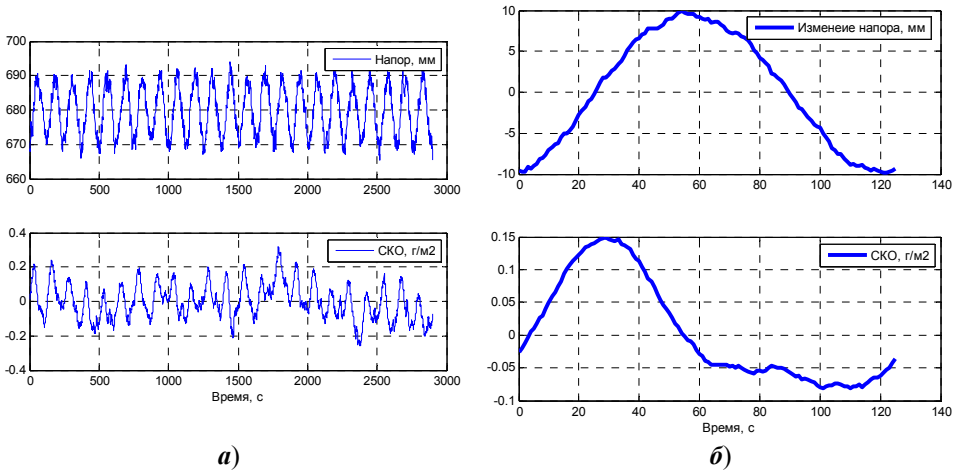


а) *б*)



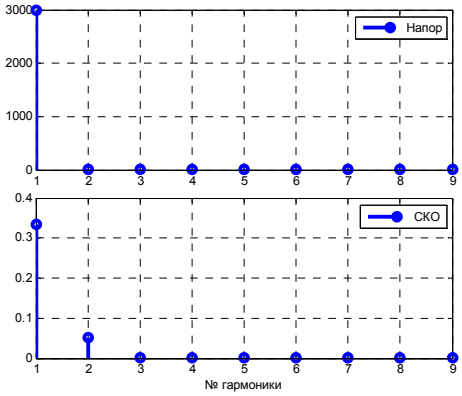
в)

Рис. 6. Результаты моделирования при среднем значении входного сигнала, равного оптимальному (685 мм)



а) *б*)

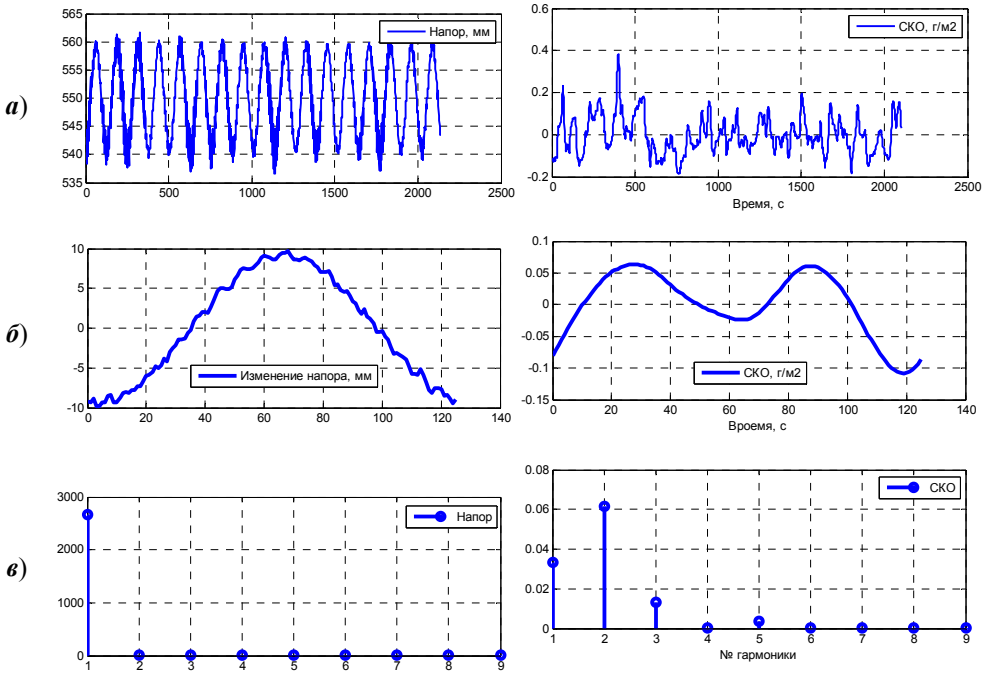
Рис. 7. Результаты моделирования при среднем значении входного сигнала меньше оптимального (680 мм)



в)

Рис. 7. Окончание

Работа алгоритма проверялась на реальном объекте для оптимального значения напора, равного 550 мм (рис. 8), что также подтвердило эффективность предложенного алгоритма.



а)

б)

в)

Рис. 8. Результаты моделирования при среднем значении напора, равного оптимальному (550 мм)

Заключение

Экспериментально подтверждена экстремальная зависимость между соотношением скоростей бумажной массы и бумагоделательной машины и среднеквадратичным отклонением веса бумажного полотна, которое определяет степень неравномерности просвета бумаги.

Разработан помехозащищенный алгоритм поиска экстремума инерционного объекта с запаздыванием, основанный на методе периодического поискового сигнала с фильтрацией помех путем синхронного накопления и последующего поиска максимума выделенной из выходного сигнала второй гармоники.

На основе моделирования и экспериментальной проверки на реальном объекте подтверждена эффективность предложенного алгоритма.

Список литературы

1. **Растригин, Л. А.** Статистические методы поиска / Л. А. Растригин. – М. : Наука, 1968. – 376 с.
2. **Александров, А. Г.** Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. – М. : Высш. шк., 1989. – 263 с.
3. **Фельдбаум, А. А.** Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. – М. : Физматгиз, 1963. – 552 с.
4. **Макс, Ж.** Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях : в 2-х т. ; пер. с франц. / Ж. Макс. – М. : Мир, 1983. – Т. 1. – 312 с.
5. **Зверев, В. А.** Выделение сигналов из помех численными методами / В. А. Зверев, А. А. Стромков. – Н. Новгород : ИПФ РАН, 2001. – 188 с.
6. Технология целлюлозно-бумажного производства : в 3 т. Т. 1. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. – СПб. : Политехника, 2005. – 423 с.

References

1. Rastrigin L. A. *Statisticheskie metody poiska* [Statistical searching methods]. Moscow: Nauka, 1968, 376 p.
2. Aleksandrov A. G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimal and adaptive systems]. Moscow: Vyssh. shk., 1989, 263 p.
3. Fel'dbaum A. A. *Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem* [Basics of the theory of optimal automatic systems]. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 552 p.
4. Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh: v 2-kh t.; per. s frants.* [Methods and techniques of signal processing at physical measurements: in 2 volumes; translation from French]. Moscow: Mir, 1983, vol. 1, 312 p.
5. Zverev V. A., Stromkov A. A. *Vydelenie signalov iz pomekh chislennymi metodami* [Extraction of signals from noise by numerical methods]. Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2001, 188 p.
6. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva: v 3 t. T. 1. Proizvodstvo bumagi i kartona. Ch. 1. Tekhnologiya proizvodstva i obrabotki bumagi i kartona* [Technology of pulp-and-paper production: in 3 volumes. Volume 1. Production of paper and cardboard. Part 1. Technology of paper and cardboard production and processing]. Saint Petersburg: Politekhnika, 2005, 423 p.

Авдеева Ольга Викторовна
старший преподаватель, кафедра автоматики и телемеханики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rasuma@mail.ru

Avdeeva Ol'ga Viktorovna
Senior lecturer, sub-department of automatics and remote control, 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)

Никулин Сергей Владимирович
начальник отдела автоматизированных систем управления технологическим процессом, ООО «МАЯКТРАНСЭНЕРГО» (Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 1)

E-mail: aius@pnzgu.ru

Nikulin Sergey Vladimirovich
Department manager, department of automatic systems and technological process control, "MAYAKTRANSENERGO" ltd. (1 Bumazhnikov street, Penza, Russia)

Семенов Анатолий Дмитриевич
доктор технических наук, профессор, кафедра автоматики и телемеханики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: sad-50@mail.ru

Semenov Anatoliy Dmitrievich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of automatics and remote control, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.511.4

Авдеева, О. В.

Экстремальное управление инерционным объектом с запаздыванием в условиях сильных помех / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, С. В. Никулин, А. Д. Семенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 70–80.

УДК 621.396

Д. М. Ненадович

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОГО ПОДХОДА К ФОРМИРОВАНИЮ ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНОК СОСТОЯНИЙ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ЭКСПЕРТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА, ПРОЕКТИРУЕМЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются перспективные инфокоммуникационные системы. Предмет исследования – процессы формирования прогнозных оценок выборочных значений (в общем случае) нестационарных процессов изменения состояний моделей функционирования перспективных инфокоммуникационных систем. Целью работы является разработка обобщенного подхода к формированию прогнозных оценок состояний нестационарного процесса изменения значений экспертных показателей качества проектируемых инфокоммуникационных систем.

Материалы и методы. Формирование обобщенного подхода основано на методах анализа временных рядов с использованием модели авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего.

Результаты и выводы. Реализация разработанного подхода в программно-аппаратном комплексе инфокоммуникационной экспертной системы позволит существенно снизить степень субъективизма экспертных оценок качества проектно-технических решений, принимаемых в ходе разработки систем, а также в значительной мере повысить степень автоматизации экспертной деятельности.

Ключевые слова: инфокоммуникационные системы, экспертные показатели качества, инфокоммуникационные экспертные системы, качество проектно-технических решений, стохастические разностные уравнения, процесс «рождения и гибели», нестационарные процессы, модель авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего, рекуррентные алгоритмы наименьших квадратов.

D. M. Nenadovich

DEVELOPMENT OF A GENERALIZED APPROACH TO FORMATION OF PREDICTIVE ESTIMATES OF CONDITIONS OF THE UNSTEADY PROCESS OF EXPERT Q-FACTOR VALUES CHANGE, THE PROJECTIBLE INFORMATION-COMMUNICATION SYSTEM

Abstract.

Background. The research object is the perspective information-communication systems. The research subject is the processes of formation of predictive estimates of sample values (in a general case) of the unsteady processes of condition change of models of perspective information-communication systems' functioning. The aim of the work is to develop a generalized approach to formation of predictive estimates of conditions of the unsteady process of expert q-factor values change for the projectible information-communication systems.

Materials and methods. Formation of the generalized approach is based on the methods of time series analysis using a model of autoregression of an integrated moving average.

Results and conclusions. Realization of the developed approach in a software-hardware complex of an information-communication system will allow to significantly lower the degree of subjectivism of expert estimates of design-engineering decisions' quality, taken in the course of development of the system, and as well to significantly increase the degree of automation of the expert activity.

Key words: information-communication systems, expert estimation of quality, information-communication expert systems, quality of a project and technical decisions, stochastic difference equations, process of "die and birth", unsteady processes, model of autoregression – integrated moving average, recurrent algorithms of least squares.

Разработанные [1] модели позволяют формировать экспертные оценки качества того или иного технического решения, принимаемого в ходе проектирования инфокоммуникационной системы (ИКС) с учетом динамики моделируемых процессов (подпроцессов) функционирования системы на основе наблюдения за изменениями состояния моделируемой системы или изменениями значений ее экспертных показателей качества (ЭПК). Вместе с тем анализ динамики процесса функционирования ИКС в ходе проведения экспертизы качества проектно-технических решений (ПТР) не может быть ограничен рассмотрением только лишь процессов «рождения и гибели» [2]. Несмотря на очевидные достоинства данного класса процессов (достаточно ясный физический смысл, хорошо апробированный аппарат математического описания), основным недостатком процесса «рождения и гибели», по нашему мнению, для решения задач в рассматриваемой постановке является невозможность учета на его основе особенностей нестационарных (отличных от стационарных в широком смысле) процессов. В этом смысле большой интерес для организации процесса формирования экспертных оценок представляют авторегрессионные методы, позволяющие осуществлять оценку и прогнозирование состояний нестационарных процессов, реально протекающих в перспективных ИКС реализующих различные ПТР. При реализации авторегрессионных методов (в качестве оценочных) исходная математическая модель изменения состояния сети (изменения значений ЭПК) может быть описана в виде следующей системы стохастических разностных уравнений:

$$\eta(k) = C(k)\vec{\theta}(k), \tag{1}$$

$$\vec{\theta}(k+1) = \Pi^T\left(k+1, k, r(k)\right)\vec{\theta}(k) + \Gamma(k)\vec{V}(k), \tag{2}$$

где $C(k)$ – M-мерная матрица-строка возможных состояний процесса $\eta(k)$; $\vec{\theta}_m$ – вектор индикаторов состояния моделируемых последовательностей:

$$\vec{\theta}_m = \begin{cases} 1 \text{ при } \eta(k) = \eta_m, m = 1,...,M, \\ 0 \text{ в остальных случаях;} \end{cases}$$

$\Pi\left(k+1, k, r(k)\right)$ – матрица одношаговых переходных вероятностей (ОПВ), значения элементов которой зависят от принятых ПТР $r(k)$ и которая опре-

деляется в соответствии с соотношениями $\Pi_{ml}\left(k+1,k,r\left(x\right)\right)=q_{ml}T$, $\Pi_{mm}=q_{mm}T+1$, T – период изменения состояния; $\Gamma\left(k\right)$ – M-мерная диагональная матрица возбуждения процесса $\theta\left(k\right)$ с элементами $\Gamma_{mm}\left(k\right)=T\sqrt{2\sigma^2{}_{\theta m}q_{mm}/R_{vm}}$, $\sigma^2{}_{\theta m}$ – априорная дисперсия; R_{vm} – спектральная плотность мощности белого шума возбуждения $\vec{V}\left(k\right)$ ($V_m(k)$ – ступенчатый мартингал, удовлетворяющий условию $M\left\{V_m(k)/(s)\right\}=Z(\tau)$, $s\le\tau$, $\forall k\ge\tau$) при условии использования в качестве матрицы ОПВ полнозаполненной матрицы, описывающей вероятностно-временной механизм перехода цепи из любого начального положения в любое конечное. Различия в характере процессов изменения состояния моделируемых на основе «ленточной» и полнозаполненой матрицы ОПВ можно проследить на примерах результатов моделирования, представленных в виде графиков пошаговых изменений значений индикаторов на рис. 1, 2. Нетрудно видеть, что в отличие от реализации процесса «рождения и гибели» либо не меняющего своего состояния, либо осуществляющего переход в соседние состоянии в определенный момент времени, процесс, моделируемый на основе полнозаполненой матрицы ОПВ, может (до достижения установившихся состояний) на достаточно широких временных интервалах менять свои состояния с известной степенью произвольности. В этом случае есть все основания полагать, что условия стационарности (в широком смысле) не будут выполнены и использование дискретного фильтра Калмана [3] для получения состоятельных, несмещенных и эффективных оценок состояний системы (значений ЭПК) с минимальной дисперсией будет существенно затруднено. С целью анализа путей преодоления проблемы нестационарности в ходе формирования оценочных значений состояний системы (значений ЭПК) рассмотрим возможности авторегрессионных моделей. К основным задачам моделирования временных рядов и прогнозирования их параметров в классической постановке относятся: выбор подходящей параметрической модели временного ряда, оценивание ее параметров, диагностику ее качества, а также получение выражения для прогноза параметров ряда (экстраполяции значений на упреждающий момент времени). Для обеспечения состоятельности, достаточности, минимума дисперсии и эффективности результатов обработки имеющихся статистических данных необходимо выполнение ряда условий для модели, например: стационарности и обеспечения времени оценивания значения ЭПК, меньшего, чем интервал корреляции значений временного ряда, моделирования временных рядов и прогнозирования их параметров в классической постановке относятся: выбор подходящей параметрической модели временного ряда, оценивание ее параметров, диагностика ее качества, а также получение выражения для прогноза параметров ряда (экстраполяции значений на упреждающий момент времени). Для обеспечения состоятельности, достаточности, минимума дисперсии и эффективности результатов обработки имеющихся статистических данных необходимо выполнение ряда условий для модели, например: стационарности и обеспечения времени оценивания значения ЭПК, меньшего, чем интервал корреляции значений временного ряда.

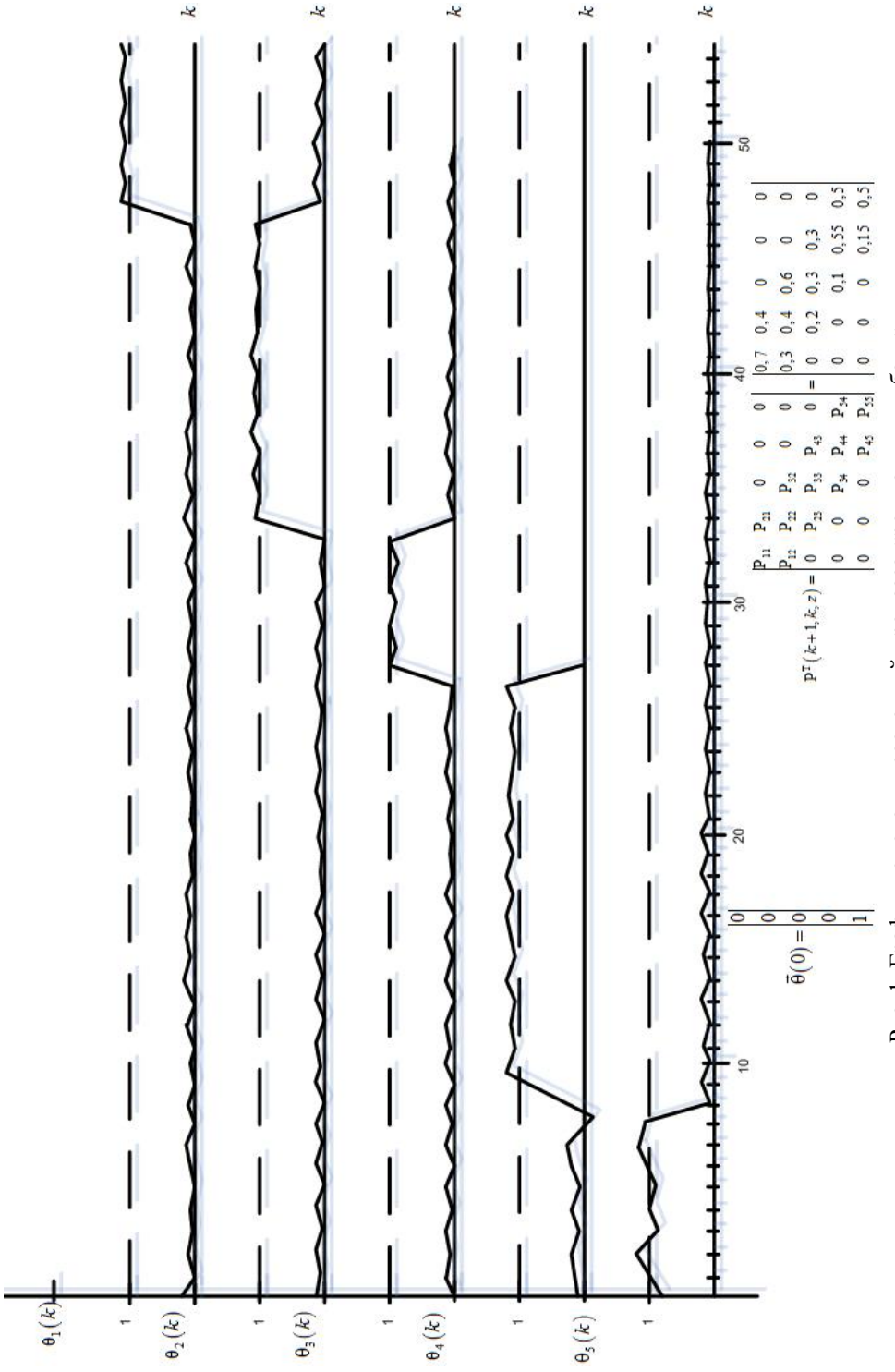


Рис. 1. График изменения состояний процесса «рождения и гибели»

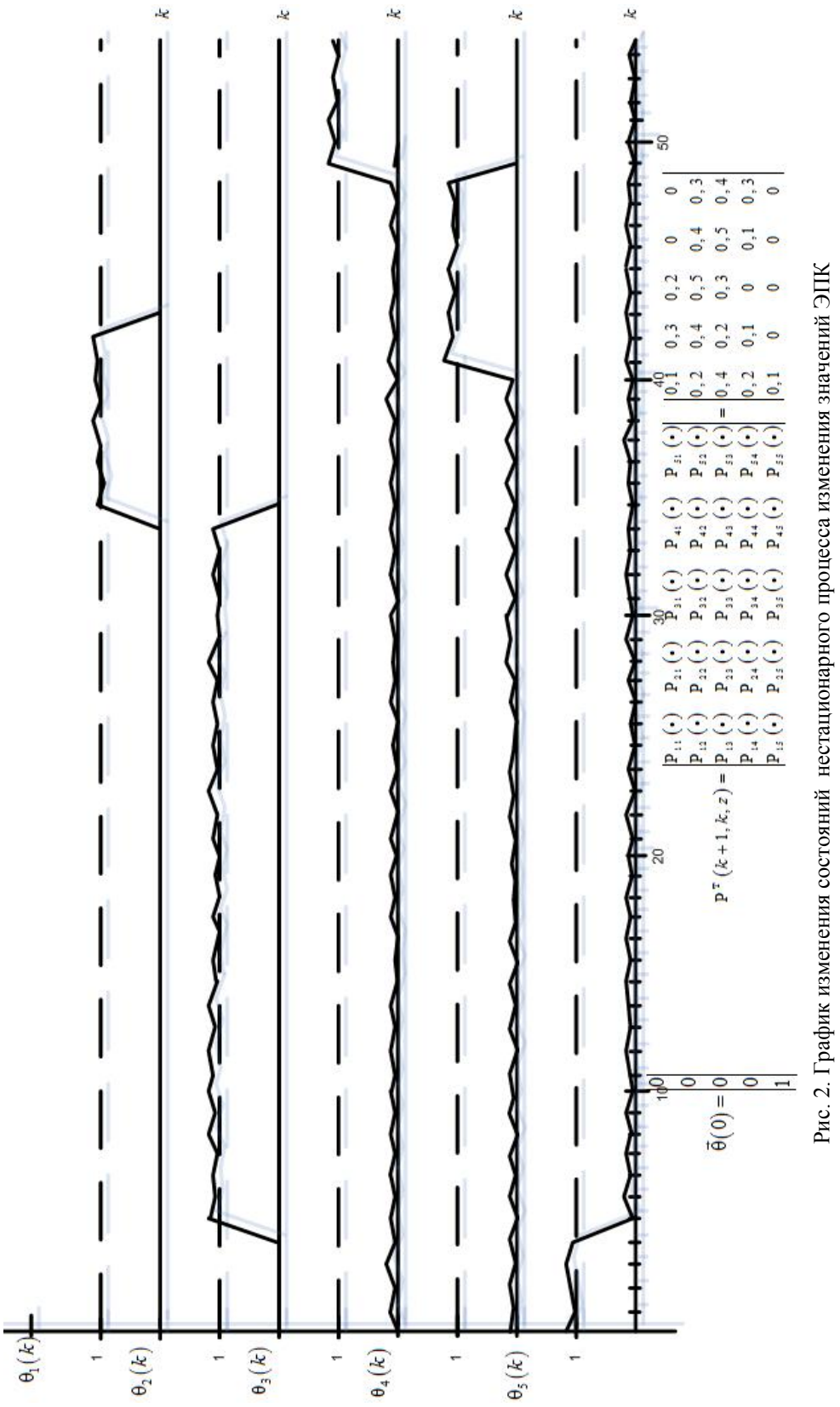


Рис. 2. График изменения состояний нестационарного процесса изменения значений ЭПК

Под этапом выбора модели понимается обоснование некоторого класса стохастической модели и идентификации ее параметров на основе знания автокорреляционных функций элементов временного ряда, а также метода диагностической проверки модели. Кроме того, параметры модели могут определяться и уточняться непосредственно в ходе оценивания. Простая модель временного ряда имеет следующий вид:

$$\theta_t = b + \varepsilon t, \tag{3}$$

где b – константа; ε – случайная ошибка. Константа b относительно стабильна на каждом временном интервале, но может также медленно изменяться со временем. Один из интуитивно ясных способов выделения b состоит в том, чтобы использовать сглаживание скользящим средним, в котором последним наблюдениям приписываются большие веса, чем предпоследним, предпоследним большие веса, чем предшествующим и т.д. Именно так устроено простое экспоненциальное сглаживание. Здесь более старым наблюдениям приписываются экспоненциально убывающие веса, при этом, в отличие от скользящего среднего, учитываются все предшествующие наблюдения ряда, а не те, что попали в определенное окно. Формула простого экспоненциального сглаживания имеет следующий вид:

$$S_t = \alpha\theta_t + (1-\alpha)S_{t-1}. \tag{4}$$

Когда эта формула применяется рекурсивно, то каждое новое сглаженное значение (которое является также прогнозом) вычисляется как взвешенное среднее текущего наблюдения и сглаженного ряда. Очевидно, результат сглаживания зависит от параметра α. Если α равно 1, то предыдущие наблюдения полностью игнорируются. Если α равно 0, то игнорируются текущие наблюдения. Значения α между 0, 1 дают промежуточные результаты. Эмпирические исследования [4, 5] показали, что простое экспоненциальное сглаживание дает достаточно точный прогноз. На практике параметр сглаживания часто определяется посредством реализации поиска на сетке. Возможные значения параметра разбиваются сеткой с определенным шагом. Например, рассматривается сетка значений от $\alpha = 0{,}1$ до $\alpha = 0{,}9$ с шагом 0,1. Затем выбирается α, для которого сумма квадратов (или средних квадратов) остатков (наблюдаемые значения минус прогнозы на шаг вперед) является минимальной. Рекомендуется брать начальное значение S_0, дающее наилучший прогноз. С другой стороны, влияние выбора уменьшается с увеличением длины ряда и становится некритичным при большом числе наблюдений. Таким образом, модели временных рядов позволяют описывать динамику стационарных случайных процессов. Учитывая тот факт, что большинство процессов, реально протекающих в ИКС, не являются строго стационарными, большой интерес для организации экспертной деятельности представляет такая разновидность моделей временных рядов, как модель авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС (p, d, q)), предложенная Боксом и Дженкинсом [4]. Модель включает три типа параметров: порядок операторов авторегрессии (p), порядок оператора разности (d) и порядок параметров скользящего среднего (q). Порядки операторов p и q, а также их значения вычисляются для ряда после взятия разности с лагом d. Расшире-

ние области моделирования в этом представлении достигается путем перехода к моделированию не самих значений процесса $\eta(k)$, а разности между значениями ряда до d -го порядка включительно, обладающей стационарными свойствами, что означает постоянство ее среднего и неизменность во времени соответствующих выборочных дисперсии и автокорреляции. Для того чтобы определить необходимый порядок разности, обычно проводят исследования графика исходного ряда и автокоррелограмму. Сильные изменения уровня (сильные скачки вверх или вниз) обычно требуют взятия несезонной разности первого порядка (лаг = 1), а сильные изменения наклона требуют взятия разности второго порядка. Вместе с тем порядок разности может быть определен в ходе реализации начальных процедур оценивания по результатам анализа выполнения условий стационарности. При организации экспертной деятельности большой интерес вызывает подход к формированию прогнозных значений временного ряда значений ЭПК проектируемой ИКС. Так, например, для эвентуальной модели временного ряда прогнозные значения ЭПК на l шагов вперед могут быть получены при выполнении условий $q \geq p + d$, $l > q - p - d$. Рассмотрим различные формы представления модели АРПСС. Общее выражение для модели АРПСС, временного ряда (m-го индикатора значения элемента векторного ЭПК, состояния модели системы (θ_m) и т.д.) может быть представлено в следующем виде:

$$\varphi(B)\Delta^d \theta_m(k) = \lambda(B)V_t + \varphi(B)\Delta^d w_t, \quad (5)$$

где $\varphi(B)$ – оператор авторегрессии, определяемый в соответствии с выражением

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - ... - \varphi_p B^p; \quad (6)$$

B – оператор сдвига назад ($B\theta_t = \theta_{t-1}$); Δ – разностный оператор со сдвигом назад ($\Delta = \theta_t - \theta_{t-1}$); w_t – значения шума наблюдения за индикаторами (погрешность измерения); V_t – значение шума возбуждения процесса θ_t; $\lambda(B)$ – оператор скользящего среднего, определяемый в соответствии с выражением

$$\lambda(B) = 1 - \lambda_1 B - ... - \lambda_q B^q. \quad (7)$$

Необходимо особо отметить, что частным случаем авторегрессионной модели при $p = 1$ является рассматриваемый нами ранее марковский процесс изменения значений индикаторов состояния системы (значений ЭПК)

$$\theta_{cm.t} = \varphi(t/t-1)\theta_{cm.t-1} + V_t. \quad (8)$$

При $p = 0$ смешанная модель преобразуется в модель *скользящего среднего*, реализующую только механизм учета динамики изменения значений возбуждающей последовательности V_t. В отличие от процесса авторегрессии, в процессе скользящего среднего текущее наблюдение ряда представляет собой сумму случайного компонента V_t в данный момент и линейной комбинации взвешенных значений случайных воздействий в предыдущие

q моментов времени. Определение оптимального значения параметров скользящего среднего основано на учете корреляций значений случайных воздействий на глубину q шагов. Общая структурная схема устройства оценки-экстраполяции, аппаратно реализующая общую форму представления выражения (5), представлена на рис. 3. Очень часто для получения оценок коэффициентов авторегрессии и скользящего среднего, а также текущих значений дисперсии шума возбуждения в модели АРСС(p, q), используют раздельные субоптимальные процедуры их определения [4, 5]. Вначале оценивают коэффициенты авторегрессии на основе реализации процедуры наименьших квадратов или решения уравнения Юла – Уолкера, затем на их основе формируют модель временного ряда и получают разностный ряд между принятым и смоделированным. Последовательность остаточных ошибок (разностный ряд) используется в дальнейшем для определения коэффициентов скользящего среднего. Однако необходимость реализации высокой степени автоматизации процесса экспертной деятельности на основе инфокоммуникационной экспертной системы требует построения алгоритмов определения параметров авторегрессии в виде, удобном для реализации на ЭВМ. С этой целью воспользуемся рекуррентным алгоритмом наименьших квадратов (РНК), который позволяет производить анализ ошибок фильтрации по выборке наблюдаемых значений объемом N и при поступлении новых текущих данных $\theta(N+1)$ переходить от вектора коэффициентов линейного предсказания $\vec{\varphi}_{p,N}$ к вектору $\vec{\varphi}_{p,N+1}$, не решая уравнение Юла – Уолкера [4].

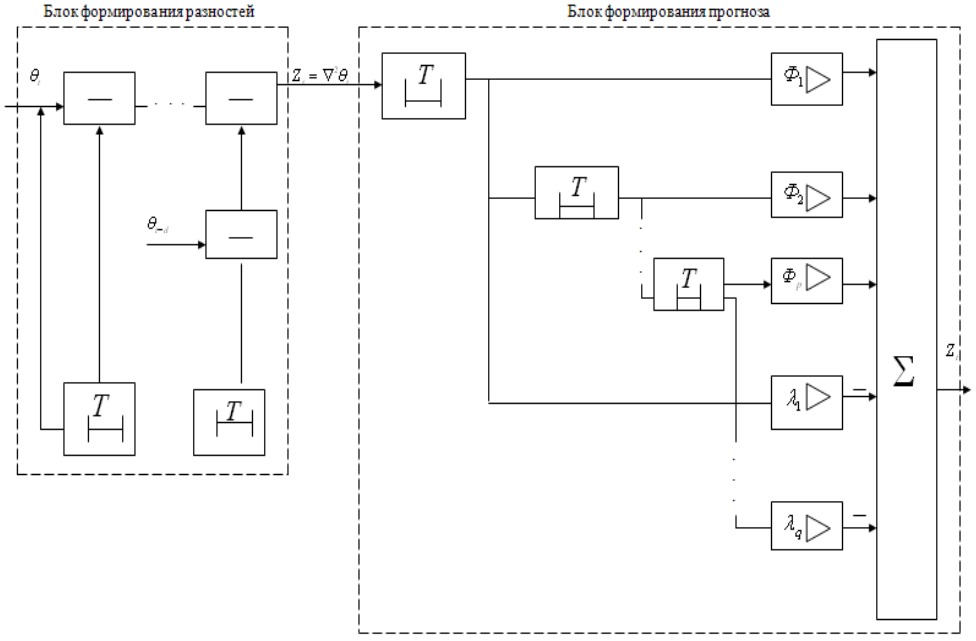


Рис. 3. Общая структурная схема фильтрации-экстраполяции значений ЭПК

Для получения алгоритма РНК выражение для ошибки линейного предсказания вперед при использовании выборки размером N для k-го временного шага и глубины регрессии p запишем в следующем виде:

$$e'_{p,N}(k) = \vec{\theta}^T_{p,N}(k)\vec{\varphi}^T_{p,N}(k), \tag{9}$$

где $\vec{\theta}^T_{p,N} = \left(\theta(k);\ \ \theta(k-1)\ \ \ldots\ \ \theta(k-p)\right)$ – вектор значений временного ряда размерностью $p + 1$; $\vec{\varphi}_{p,N}(r) = \left(1;\ \vec{\varphi}_{p,N}(k-1) \ldots \vec{\varphi}_{p,N}(k-p)\right)^T$ – вектор значений коэффициентов авторегрессии размерностью $p + 1$. Так как суммирование в выражении для ошибки осуществляется с учетом отрицательного знака при коэффициентах авторегрессии, то в результате получаем разность между значением ряда в момент времени k и взвешенными значениями регрессии на прошлые значения ряда глубиной p. Введем понятие суммы экспоненциально взвешенных квадратов ошибок предсказания на всей длине выборки $\rho'_{p,N} = \sum_{k=1}^{N} W^{N-k}(e'_{p,N}(n))^2$. Можно показать [5], что вектор коэффициентов линейного предсказания $\vec{\varphi}_{p,N}$, минимизирующий сумму экспоненциально взвешенных с весом W^{N-k} квадратов ошибок $\rho'_{p,N}$, удовлетворяет решению уравнения

$$R_{p,N}\vec{\varphi}_{p,N} = \begin{Bmatrix} \rho'_{p,N} \\ 0_p \end{Bmatrix}, \tag{10}$$

где $R_{p,N} = \begin{bmatrix} r_{p,N(0,0)} & r^T_{p,M} \\ r_{p,N} & \vec{R}_{p-1,N-1} \end{bmatrix}$ – рекуррентная матрица коэффициентов автокорреляции; $r_{p,N}(0,0) = \sum_{n=1}^{N} w^{N-n}\left(\theta(n)\right)^2$ – взвешенная дисперсия наблюдаемой последовательности.

Тогда основу базового РНК-алгоритма составляют следующие выражения для векторов коэффициентов предсказания, коэффициентов усиления и дисперсии ошибки фильтрации:

$$\vec{\varphi}_{p,N+1} = \begin{cases} \vec{\varphi}_{p,N} - P_{N\theta_N}\vec{\theta}_{m\,p-1}(N)(\vec{\theta}^T_{p-1}(N)\vec{\varphi}_{p,N} + \vec{\theta}_{m\,p-1}(N+1)) = \\ = \vec{\varphi}_{p,N} - \vec{e}^{\,f}_{p,N}(N+1)P_{N\theta_N}\vec{\theta}_{m\ p-1}(N) = \\ = \vec{\varphi}_{p,N} - \vec{e}^{\,f}_{p,N}(N+1)\vec{c}_{p-1,N}; \end{cases} \tag{11}$$

$$\vec{c}_{p-1,N} = P_{N-1}\vec{\theta}_{p-1}(N)\Big/\left(W + \vec{\theta}^T_{m\,p-1}(N)P_{N-1\,\theta_{N-1}}\vec{\theta}_{m\,p-1}\ (N)\right); \tag{12}$$

$$P_N = W^{-1}\left(\vec{I} - \vec{c}_{p-1,N}\vec{\theta}^T_{m\,p-1}(N)\right)P_{N-1\theta_{N-1}}, \tag{13}$$

где $\vec{e}^{\,f}_{p,N}(N+1) = \vec{\theta}_{m\ p-1}{}^T(N)\vec{\varphi}_{p,N} + \vec{\theta}_{m\,p-1}(N+1)$ – вектор остаточных ошибок фильтрации, так как, в отличие от ошибки предсказания, здесь использу-

ется вектор $\vec{\varphi}_{p,N}$, а не $\vec{\varphi}_{p,N+1}$; $\vec{c}_{p-1,N} = P_N \vec{\theta}_{m\,p-1}(N)$ – вектор коэффициентов компенсации остаточной ошибки фильтрации-экстраполяции; $\ddot{P}_{N-1} = \ddot{R}^{-1}_{p-1,N-1}$ – матрица дисперсий ошибок фильтрации;

$$R_{p-1,N-1} = \sum_{n=1}^{N-1} W^{N-1-n} \vec{\theta}_{m\,p-1}(n) \vec{\theta}^{T}_{m\,p-1}(n) \; -$$

матрица размерностью $(p-1)\times(p-1)$ взвешенных с весом $0 < W < 1$ вторых моментов процесса на шагах $(p-1)$, усредняемых по выборке объемом $(N-1)$. Исходные данные для работы фильтра задаются в виде $\vec{\varphi}_0$ и $\ddot{P}_{p,0} = \varepsilon I$, где I – единичная матрица, а ε – некоторая положительная величина, обеспечивающая обратимость матрицы $P_{p,0}$.

Таким образом, последовательно реализуя выражения (11)–(13) в соответствии со схемой, представленной на рис. 3, возможно наиболее просто формировать состоятельные, несмещенные и эффективные прогнозные оценки состояний (значений ЭПК) модели функционирования, проектируемой ИКС, что позволит существенным образом минимизировать степень субъективности экспертной оценки качества ПТР, принимаемых в ходе проектирования.

Список литературы

1. **Ненадович, Д. М.** Методологические аспекты экспертизы телекоммуникационных проектов / Д. М. Ненадович. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 272 с.
2. **Ненадович, Д. М.** Синтез дискретной математической модели процесса функционирования управляемой инфокоммуникационной системы со случайной скачкообразной структурой / Д. М. Ненадович // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – № 2–3. – С. 9–13.
3. **Ненадович, Д. М.** Методы теории линейной фильтрации и экстраполяции в задачах оценки состояния управляемой инфокоммуникационной системы со случайной скачкообразной структурой / Д. М. Ненадович // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – № 6. – С. 16–21.
4. **Бокс, Дж.** Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Джекинс. – М. : Мир, 1974. – 402 с.
5. **Марпл мл., С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.

References

1. Nenadovich D. M. *Metodologicheskie aspekty ekspertizy telekommunikatsionnykh proektov* [Methodological aspects of expert assessment of telecommunication projects]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2008, 272 p.
2. Nenadovich D. M. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems]. 2006, no. 2–3, pp. 9–13.
3. Nenadovich D. M. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems]. 2006, no. 6, pp. 16–21.
4. Boks Dzh., Dzhekins G. *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie* [Analysis of time series]. Moscow: Mir, 1974, 402 p.
5. Marpl ml. S. L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and applications thereof]. Moscow: Mir, 1990, 584 p.

Ненадович Дмитрий Михайлович
доктор технических наук, менеджер проектов Департамента управления проектами Корпоративного центра ОАО «Ростелеком» (Россия, г. Москва, ул. 1-я Тверская-Ямская, 14)

Nenadovich Dmitriy Mikhaylovich
Doctor of engineering sciences, project manager, Department of Project Management, Corporate Center "Rostelecom" plc. (14 1-ya Tverskaya-Yamskaya street, Moscow, Russia)

E-mail: nend@mail.ru

УДК 621.396

Ненадович, Д. М.

Разработка обобщенного подхода к формированию прогнозных оценок состояний нестационарного процесса изменения значений экспертных показателей качества, проектируемых инфокоммуникационных систем / Д. М. Ненадович // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 81–91.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.941

А. А. Игнатьев, В. В. Коновалов

ВЫБОР РЕЖИМА ТОЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА ПО ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ КОЛЕБАНИЯМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Обеспечение конкурентоспособности продукции машиностроительных предприятий на внутреннем и международном рынках обусловлено в значительной степени качеством ее изготовления. При производстве подшипников важная роль отводится процессам обработки деталей резанием (точение, шлифование). Токарная обработка колец подшипников предшествует обработке шлифованием рабочих поверхностей. Производительность и качество точения зависят от технического состояния станка и назначенных параметров режима обработки. Одной из важных характеристик станка, которая влияет на эффективность точения, является динамическое состояние станка, которое можно определить на основе измерения и анализа виброакустических колебаний основных узлов формообразующей подсистемы.

Материалы и методы. Передаточная функция динамической системы может быть вычислена, если получено аналитическое выражение выходного сигнала. Замкнутая динамическая система станка является нелинейной, однако при фиксированных значениях параметров режима резания (скорость вращения заготовки, подача инструмента, глубина резания) за время обработки одной детали можно рассматривать динамическую систему как линейную. При изменении значения одного из параметров режима изменяется и передаточная функция.

Результаты. Эксперименты проводились по специальной методике. В производственных условиях оценивалась предварительная токарная обработка поверхности качения наружных колец железнодорожного подшипника 42726 из материала ШХ-15. Скорость вращения заготовки 180 об/мин, подача резца 0,2, 0,4, 0,5, 0,6 мм/об. В ходе испытаний были произведены исследование наружных колец в количестве по 9 штук подшипника 42726 и измерение виброакустического колебания резцового блока станка с целью выявления возможных дефектов и их влияния на параметры точности поверхностей колец подшипников и производительность.

Выводы. Исследования процесса точения колец подшипников на станках ПАБ-350 показали, что наибольшая эффективность обработки достигается при максимуме запаса устойчивости динамической системы станка. Таким образом, получено достаточно простое выражение для определения передаточной функции замкнутой динамической системы токарного станка экспериментально-аналитическим методом, а также указано на ее практическое применение для обоснования выбора режима обработки.

Ключевые слова: виброакустическое колебание, передаточная функция, динамическая система, токарная обработка, кольцо подшипника.

A. A. Ignat'ev, V. V. Konovalov

CHOICE OF A TURNING MODE BASED ON IDENTIFICATION OF A MACHINE TOOL'S DYNAMIC SYSTEM BY VIBROACOUSTIC OSCILLATIONS

Abstract.

Background. Ensuring of competitiveness of products of machine-building enterprises on the domestic and international markets is conditioned to a large extent by the quality of its production. In the production of bearings an important role is given to the processes of parts machining (turning, grinding). Turning of race rings precedes abrasive machining of working surfaces. Performance and quality of turning depend on the technical condition of a machine and the assigned parameters of a mode of treatment. One of the important characteristics of a machine, affecting the efficiency of turning is the dynamic state of a machine, which can be defined on the basis of measurement and analysis of vibroacoustic oscillations (VA) of the basic units of the molding subsystem.

Materials and methods. The transfer function of the DS can be calculated, if the analytical expression of the ACF of the output signal has been obtained. The closed DS machine is nonlinear, but with fixed values of parameters of cutting modes (speed of rotation of a workpiece, submission tool, cutting depth) during the treatment of one part it is possible to consider the network as a linear one. When the value of one parameter of a mode is changed, the transfer function also changes.

Results. Experiments were carried out by a special technique. In conditions of production the authors estimated preliminary turning of rolling surface of an outer rings of a railway bearing 42726 made of material SX-15. The speed of rotation of the workpiece was 180 rpm, the supply of the tool was 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 mm/Rev, In the course of testing, the researchers studied the outer rings in the amount of 9 pieces of 42726 and measured VA fluctuations of a machine tool block in order to detect possible defects and their influence on precision parameters of the bearing rings surfaces and performance.

Conclusions. The research of the process of turning of the bearing rings on the PAB-350 machines showed that the greatest efficiency is achieved at the maximum stability margin of a DC machine. Thus, the authors received quite a simple expression to determine the closed-loop transfer function of the DS of a turning lathe by the experimental-analytical method and its practical application to substantiate the choice of a mode of treatment.

Key words: vibroacoustic oscillation, transfer function, dynamic system, turning processing, bearing ring

Обеспечение конкурентоспособности продукции машиностроительных предприятий на внутреннем и международном рынках обусловлено в значительной степени качеством ее изготовления. При производстве подшипников важная роль отводится процессам обработки деталей резанием (точение, шлифование).

Токарная обработка колец подшипников предшествует обработке шлифованием рабочих поверхностей. Производительность и качество точения зависят от технического состояния станка и назначенных параметров режима обработки. Одной из важных характеристик станка, которая влияет на эффективность точения, является динамическое состояние станка, которое можно

определить на основе измерения и анализа виброакустических (ВА) колебаний основных узлов формообразующей подсистемы [1, 2].

Ранее в работе [3] было показано, что уравнение колебаний в динамической системе (ДС) станка при наличии стохастической составляющей силы резания решается относительно автокорреляционной функции (АКФ) ВА колебаний. В этом случае именно АКФ является показателем качества динамических процессов в системе «резец – деталь».

Результаты обработки записей ВА колебаний резцового блока при обработке позволяют определить АКФ $K_{yy}(\tau)$ и на ее основе, при условии, что ДС станка возбуждается сигналом типа «белый шум», вычислить передаточную функцию замкнутой ДС $W_з(p)$ по формуле [4]:

$$K_{yy}(p)+K_{yy}(-p)=W_з(p)W_з(-p), \qquad (1)$$

где $K_{yy}(p)$ – изображение АКФ по Лапласу.

Покажем справедливость формулы (1) для нашего случая токарной обработки деталей, причем анализ будет отличаться от изложенного в работе [5]. Известно, что силу резания, возбуждающую ДС при стационарном резании, можно представить как стохастический сигнал типа «белый шум» (БШ) [6, 7]. Реально входной сигнал является «цветным шумом», однако при математическом анализе этот сигнал рассматривается как «ограниченный БШ». Сигнал типа БШ имеет спектральную плотность $S_{xx}(\omega)=1/2\pi$, а АКФ $K_{xx}(\tau)=\delta(\tau)$, где $\delta(\tau)$ – единичный импульс.

Спектр регистрируемых ВА колебаний выходного сигнала ДС определяется известной формулой [8]:

$$S_{yy}(\omega)=\left|W(j\omega)\right|^2 S_{xx}(\omega), \qquad (2)$$

где $\left|W(j\omega)\right|^2$ – квадрат модуля частотной функции, полученной из передаточной функции $W(p)$ заменой $P=j\omega$.

Стационарный случайный процесс на выходе ДС имеет АКФ вида

$$K_{yy}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} S_{yy}(\omega)e^{j\omega\tau}d\omega,$$

а спектральную плоскость вида

$$S_{yy}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} K_{yy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau, \qquad (3)$$

которая для большинства рекомендуемых ДС является дробно-рациональной функцией угловой частоты ω.

Представим $S_{yy}(\omega)$ через $K_{yy}(\tau)$ в виде

$$S_{yy}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\infty} K_{yy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau+\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{0} K_{yy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau. \qquad (4)$$

Заменяя во втором интеграле переменную τ на – τ_1, получаем

$$S_{yy}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K_{yy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau + \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K_{yy}(-\tau_1)e^{j\omega\tau_1}d\tau_1. \quad (5)$$

В силу четности АКФ имеем

$$K_{yy}(\tau_1) = K_{yy}(-\tau_1),$$

тогда

$$S_{yy}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K_{yy}(\omega)e^{-j\omega\tau}d\tau + \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K_{yy}(\tau)e^{j\omega\tau}d\tau. \quad (6)$$

Найдем изображение по Лапласу от правой ветви АКФ:

$$K_{yy}(p) = \int_0^{\infty} K_{yy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau, \quad (7)$$

тогда из последнего уравнения следует

$$\int_0^{\infty} K_{yy}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau = K_{yy}(p) = K_{yy}(j\omega), \quad (8)$$

$$\int_0^{\infty} K_{yy}(\tau)e^{j\omega\tau}d\tau = K_{yy}(p) = K_{yy}(-j\omega). \quad (9)$$

С учетом последних соотношений из выражения (4) следует, что

$$S_{yy}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\left[K_{yy}(j\omega) + K_{yy}(-j\omega)\right]. \quad (10)$$

По аналогии

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\left[K_{xx}(j\omega) + K_{xx}(-j\omega)\right]. \quad (11)$$

Принимая во внимание формулу (2), имеем

$$W(j\omega)W(-j\omega) = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} = \frac{K_{yy}(j\omega) + K_{yy}(-j\omega)}{K_{xx}(j\omega) + K_{xx}(-j\omega)}. \quad (12)$$

Выполним подстановку $p = j\omega$, тогда из последнего выражения следует, что

$$W(p)W(-p) = \frac{K_{yy}(p) + K_{yy}(-p)}{K_{xx}(p) + K_{xx}(-p)}. \quad (13)$$

Вычислим функцию $S_{xx}(\omega)$ при условии, что входной сигнал есть БШ, тогда

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K_{xx}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau + \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K_{xx}(\tau)e^{j\omega\tau}d\tau =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[K_{xx}(j\omega) + K_{xx}(-j\omega)\right] = \frac{1}{\pi}K_{xx}(j\omega) = \frac{1}{2\pi}. \qquad (14)$$

Из последней формулы следует, что $K_{xx}(p) = \frac{1}{2}$ для сигнала типа БШ.

В этом случае

$$K_{xx}(p) + K_{xx}(-p) = 1, \qquad (15)$$

откуда следует искомое соотношение (1).

Передаточная функция ДС может быть вычислена, если получено аналитическое выражение АКФ выходного сигнала, например, путем идентификации по экспериментально зарегистрированным ВА колебаниям резцового блока токарного станка.

Замкнутая ДС станка является нелинейной, однако при фиксированных значениях параметров режима резания (скорость вращения заготовки, подача инструмента, глубина резания) за время обработки одной детали можно рассматривать ДС как линейную. При изменении значения одного из параметров режима изменяется и передаточная функция.

Полученная по формуле (1) передаточная функция $W(p)$ используется для определения рационального режима точения с наибольшей производительностью при обработке колец подшипников [9]. Для этого оценивается запас устойчивости ДС на основе определения показателя колебательности $M_{\max} = \left|\Phi(j\omega)\right|_{\max}$, где $\left|\Phi(j\omega)\right|$ – модуль частотной функции замкнутой ДС [7]. Данный показатель аналогичен понятию «динамическая жесткость», ранее введенному для токарных станков [2].

Эксперименты проводились по специальной методике. В производственных условиях оценивалась предварительная токарная обработка поверхности качения наружных колец железнодорожного подшипника 42726 из материала ШХ-15. Скорость вращения заготовки 180 об/мин, подача резца 0,2, 0,4, 0,5, 0,6 мм/об. В ходе испытаний было произведено исследование наружных колец в количестве по 9 штук подшипника 42726 и измерение ВА колебания резцового блока станка с целью выявления возможных дефектов и их влияния на параметры точности поверхностей колец подшипников и производительность [7].

В первом эксперименте использован резец Т5К10, применяемый в реальном технологическом процессе, во втором эксперименте использован резец PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, фирма «PRAMET».

Сигналы с вибродатчика подавались на виброизмеритель ВШВ-003М3 и регистрировались в режиме линейного усиления в диапазоне частот 1…4000 Гц. Выход виброизмерителя подключался к компьютеру для визуального наблюдения формы и амплитуды вибросигналов в различных режимах работы станка, а также для записи и дальнейшей обработки результатов.

Эксперимент 1. Обработка резцом Т5К10 по цеховому техпроцессу. Соответствующие различным подачам инструмента АКФ, полученные с помощью программы MATLAB.

Для аппроксимации АКФ используется формула

$$K(\tau) = A \cdot e^{-\alpha\tau}(1 + m\cos\Omega\tau)\cos\omega_0\tau, \qquad (16)$$

где A – постоянный коэффициент; α – коэффициент затухания; Ω – частота огибающей АКФ; ω_0 – основная частота АКФ; m – коэффициент модуляции.

Проверка моделей на адекватность проводилась по критерию Фишера.

Далее, используя формулу (8) и выполняя алгебраические преобразования, получаем выражение для передаточной функции в виде

$$W_3(p) = \frac{A(1+m)\sqrt{2}\left[(p+\alpha)^2 + \omega_0^2\right]}{\left[(p+\alpha)^2 + (\omega_0+\Omega)^2\right]\left[(p+\alpha)^2 + (\omega_0-\Omega)^2\right]}. \qquad (17)$$

Следует отметить, что передаточная функция практически не изменяется за время обработки одного кольца (~1 мин) при неизменном режиме резания, т.е. ДС рассматривается как линейная. При изменении режима точения (например, подачи резца) передаточная функция изменяется, т.е. в целом ДС станка является нелинейной.

Далее по полученным передаточным функциям для четырех подач инструмента вычисляется запас устойчивости ДС по показателю колебательности M. Минимальное значение M соответствует максимальному запасу устойчивости ДС, вычисляемому по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) ДС при резании, при котором обеспечиваются высокая производительность точения, заданное качество обработки дорожек точения колец и более низкая скорость износа инструмента, что согласуется с результатом работы.

Таким образом, экспериментально-аналитическое определение передаточной функции замкнутой ДС станка позволяет определить рациональный режим точения колец подшипников.

Для используемых подач резца получены различные АКФ, что свидетельствует о нелинейности ДС при резании. Однако для каждой подачи АКФ близки по виду, т.е. ДС можно рассматривать как линеаризованную и вычислить по АКФ с использованием соотношений (1) передаточную функцию замкнутой ДС $W_3(P)$. Далее из каждой $W_3(P)$ вычисляется АЧХ, типичный вид которых приведен на рис. 1.

Затем вычисляется показатель колебательности $M_{\max}$, характеризующей запас устойчивости ДС при резании. Результаты измерений, приведенные на рис. 2, показывают, что подача резца 0,6 мм/об является недопустимой из-за снижения запаса устойчивости ДС (повышение показателя колебательности) и повышение волнистости поверхности качения колец выше допустимого значения.

Рекомендуемой подачей является 0,5 мм/об, которая превышает используемую 0,4 мм/об на данном станке в производственных условиях на 25 %, т.е. производительность обработки повышается на 25 %.

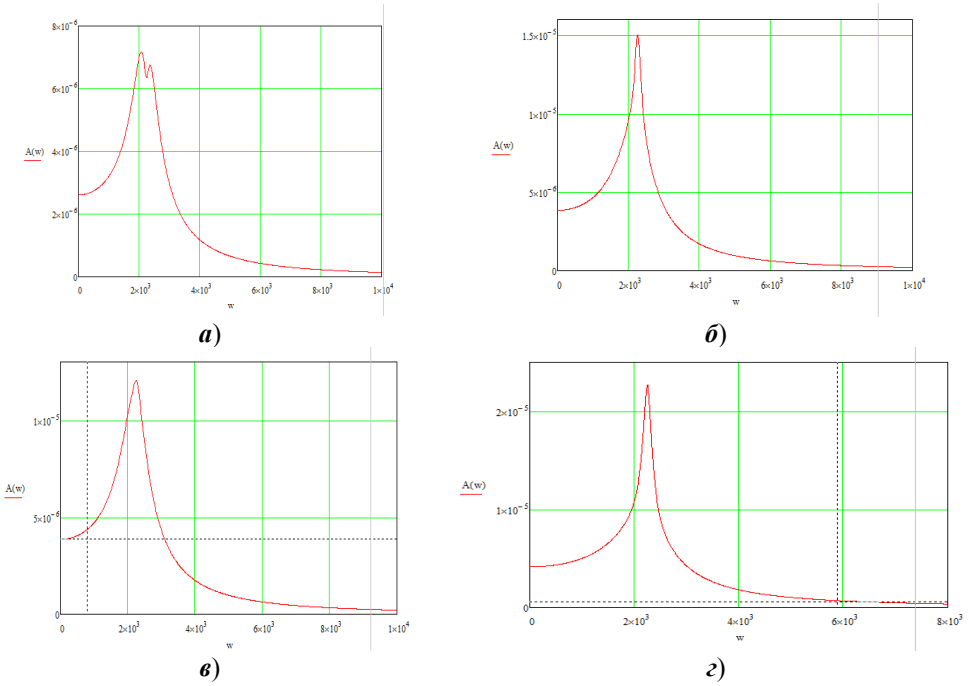


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики ДС на подачах:
а – 0,2 мм/об; ***б*** – 0,4 мм/об; ***в*** – 0,5 мм/об; ***г*** – 0,6 мм/об

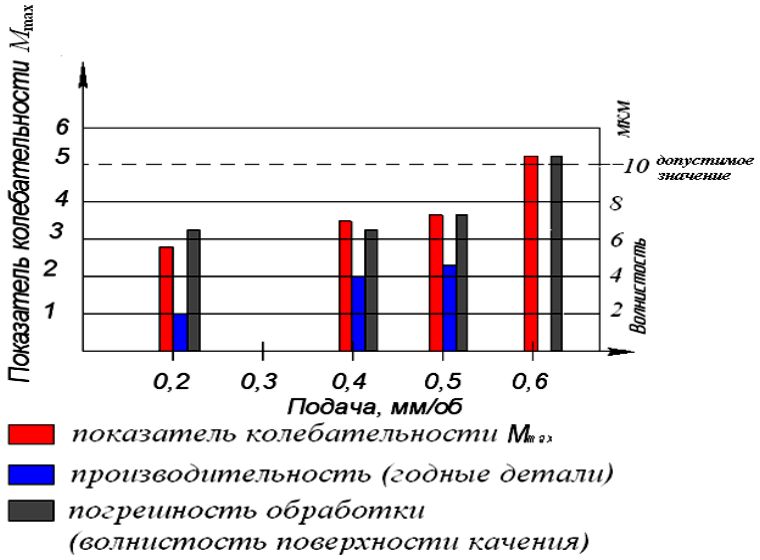


Рис. 2. Соотношение исследуемых показателей при точении колец резцом Т5К10. Количество измерений при каждой подаче – 9; среднее квадратическое отклонение измерений волнистости – не более 0,5 мкм; СКО M_{max} – не более 0,4

Эксперимент 2. Обработка резцом PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, фирма «PRAMET». Порядок проведения эксперимента аналогичен предыдущему.

Визуально наблюдается отличие АКФ при обработке различными резцами, соответственно различаются АЧХ (рис. 3) и показатель колебательности (рис. 4).

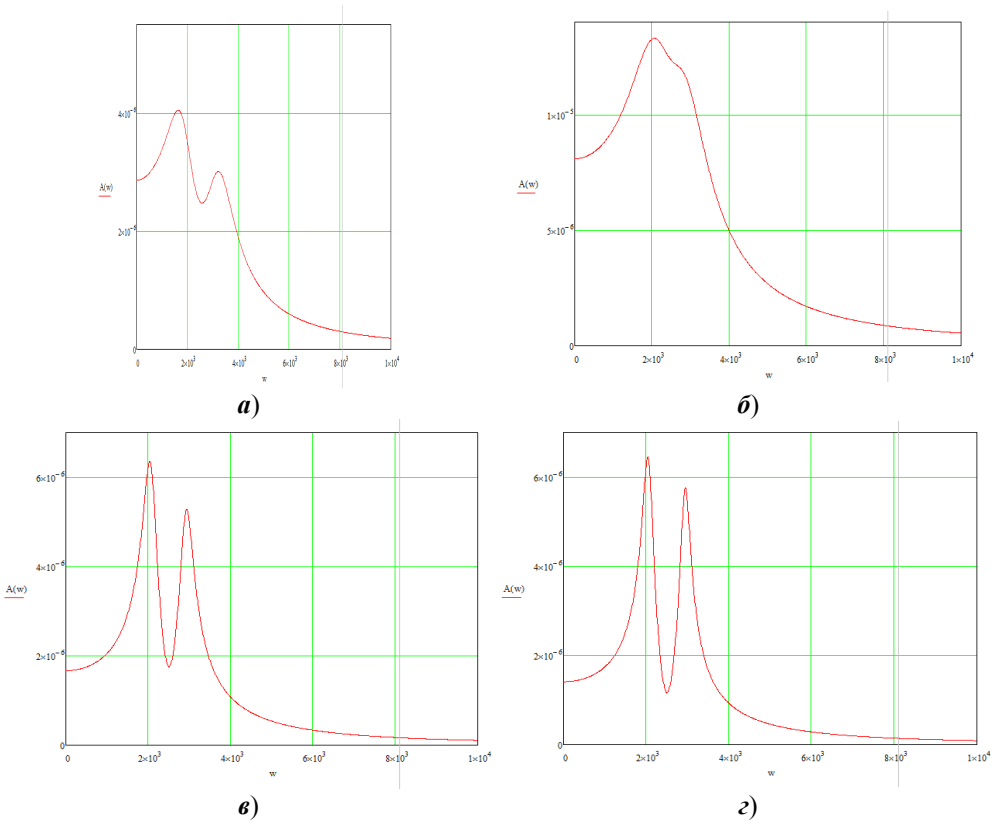


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ДС на подачах:
а – 0,2 мм/об; ***б*** – 0,4 мм/об; ***в*** – 0,5 мм/об; ***г*** – 0,6 мм/об

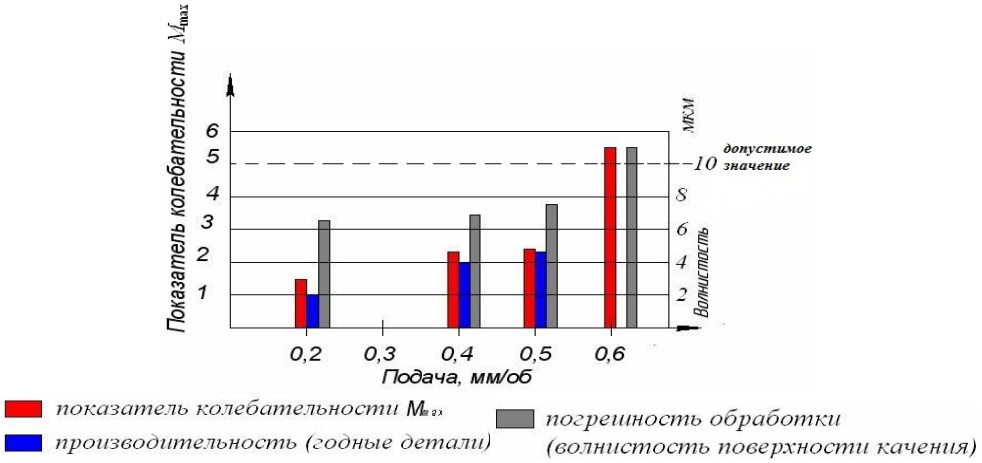


Рис. 4. Соотношение исследуемых показателей при точении колец резцом PSON 2020, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230. Количество измерений при каждой подаче – 9; СКО измерений волнистости – не более 0,5 мкм; СКО M_{max} – не более 0,4

Вид АЧХ с двумя максимумами объясняется тем, что при изменении режима резания возбуждаются колебания в ДС как в двухмассовой (масса, связанная с инструментом и масса, связанная с заготовкой).

Во втором эксперименте показатель $M_{\max}$ почти в 2 раза ниже аналогичного для эксперимента 1, что свидетельствует о более высоком запасе устойчивости ДС при обработке резцом PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, рекомендуемая подача n = 0,5 мм/об.

Исследования процесса точения колец подшипников на станках ПАБ-350 показали [9], что наибольшая эффективность обработки достигается при максимуме запаса устойчивости ДС станка.

Таким образом, получено достаточно простое выражение для определения передаточной функции замкнутой ДС токарного станка экспериментально-аналитическим методом, а также указано на ее практическое применение для обоснования выбора режима обработки.

Список литературы

1. **Кудинов, В. А.** Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
2. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков : в 3 ч. Ч. 2 / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, В. В. Мартынов. – Саратов : СГТУ, 1994. – 156 с.
3. **Скляревич, А. Н.** Операторные методы в статической динамике автоматических систем / А. Н. Скляревич. – М. : Наука, 1956. – 460 с.
4. Методы цифрового моделирования и идентификации стационарных случайных процессов / А. Н. Лебедев, Д. Д. Недосекин, Г. А. Стеклова, Е. А. Чернявский. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 64 с.
5. **Попов, В. И.** Динамика станков / В. И. Попов, В. И. Локтев. – Киев : Техніка, 1975. – 136 с.
6. **Коновалов, В. В.** Модель процессов в динамической системе токарного станка с учетом стохастических свойств сил резания / В. В. Коновалов, А. А. Игнатьев // Вестник СГТУ. – 2011. – № 2 (56). – С. 230–233.
7. Точность и надежность автоматизированных и прецизионных металлорежущих станков : в 3 ч. Ч. 1 / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, В. В. Мартынов. – Саратов : СГТУ, 1992. – 160 с.
8. **Игнатьев, А. А.** Выбор подачи круга для обеспечения качества обработки колец подшипников на основе идентификации динамической системы шлифовального станка / А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова // Вестник СГТУ. – 2011. – № 2 (56). – С. 69–73.
9. **Коновалов, В. В.** Моделирование и идентификация динамической системы автоматизированного токарного станка / В. В. Коновалов, А. А. Игнатьев // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении : сб. науч. тр. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2011. – С. 141–143.

References

1. Kudinov V. A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p.
2. Brzhozovskiy B. M., Ignat'ev A. A., Dobryakov V. A., Martynov V. V. *Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh pretsizionnykh metallorezhushchikh stankov: v 3 ch. Ch. 2* [Precision and reliability of automatic precision metal-cutting machine tools: in 3 parts. Part 2]. Saratov: SGTU, 1994, 156 p.

3. Sklyarevich A. N. *Operatornye metody v staticheskoy dinamike avtomaticheskikh sistem* [Operating methods in static dynamics of automatic systems]. Moscow: Nauka, 1956, 460 p.
4. Lebedev A. N., Nedosekin D. D., Steklova G. A., Chernyavskiy E. A. *Metody tsifrovogo modelirovaniya i identifikatsii statsionarnykh sluchaynykh protsessov* [Methods of digital modeling and identification of stationary random procces]. Leningrad: Energoatomizdat, 1988, 64 p.
5. Popov V. I., Loktev V. I. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Kiev: Tekhnika, 1975, 136 p.
6. Konovalov V. V., Ignat'ev A. A. *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU]. 2011, no. 2 (56), pp. 230–233.
7. Brzhozovskiy B. M., Ignat'ev A. A., Dobryakov V. A., Martynov V. V. *Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh i pretsizionnykh metallorezhushchikh stankov: v 3 ch. Ch. 1* [Precision and reliability of automatic precision metal-cutting machine tools: in 3 parts. Part 1]. Saratov: SGTU, 1992, 160 p.
8. Ignat'ev A. A., Karakozova V. A. *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU]. 2011, no. 2 (56), pp. 69–73.
9. Konovalov V. V., Ignat'ev A. A. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sb. nauch. tr.* [Automation and control in machine and instrument engineering: collected papers]. Saratov: Izd-vo SGTU, 2011, pp. 141–143.

Игнатьев Александр Анатольевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и управления технологическими процессами, Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: atp@sstu.ru

Ignat'ev Aleksandr Anatol'evich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department automation and control of technological processes, Saratov State Technical University named after Y. A. Gagarin (77 Politechnicheskaya street, Saratov, Russia)

Коновалов Валерий Викторович
кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии машиностроения, Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: science7@rambler.ru

Konovalov Valeriy Viktorovich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of machine engineering technology, Saratov State Technical University named after Y. A. Gagarin (77 Politechnicheskaya street, Saratov, Russia)

УДК 621.941
Игнатьев, А. А.
Выбор режима точения на основе идентификации динамической системы станка по виброакустическим колебаниям / А. А. Игнатьев, В. В. Коновалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 92–101.

УДК 621.317.08

И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик

К ВОПРОСУ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ РЕЗЦА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Предметом исследования является возможность использования виброакустического контроля состояния режущей кромки инструмента на станках с ЧПУ в процессе резания. Темой исследования является обоснование выбора рабочего частотного диапазона, т.е. диапазона, где максимально выражено изменение амплитуды сигнала от износа лезвия резца. Показано, что наиболее удобными перестраиваемыми фильтрами для этой цели служат фильтры на основе интегрирующих дискретизаторов. Целью исследования явилось создание приборов виброакустического контроля для станков с ЧПУ и алгоритмов виброакустического контроля износа режущего инструмента методом касания.

Материалы и методы. Дан анализ современных методов виброакустической диагностики процесса резания на основе Фурье-анализа.

Результаты. Представлена структурная схема устройства виброакустического контроля «Износ-2мп», выполненного на микропроцессорной основе для станков с ЧПУ.

Выводы. Анализ методов контроля состояния режущего инструмента на станках с ЧПУ показал, что наиболее перспективным для практического применения в производственных условиях является виброакустический метод контроля. Применение метода позволяет получить высокую точность и использовать один виброакустический датчик для контроля всех инструментов станка.

Ключевые слова: контроль износа режущего инструмента виброакустическим методом, математическое моделирование, выбор рабочего частотного диапазона, виброакустический контроль касанием.

I. R. Dobrovinskiy, Yu. T. Medvedik, M. Yu. Medvedik

ON THE ISSUE OF CONTROL OF THE BLADE'S CUTTING EDGE CONDITION BY THE VIBROACOUSTIC METHOD

Abstract.

Background. The research subject is the possibility of using vibroacoustic control of the instrument's cutting edge condition in CNC machine tools in the process of cutting. The theme of the research is a substantiation of a choice of a frequency range of operation, i.e. the range where the change of a singnal's amplitude due to blade's edge wear is displayed at maximum. It is shown that the most convenient tunable filters for the said purpose are the filters based on integrating samplers. The aim of the research is to create devices of vibroacoustic control for CNC machine tools and algorithms of vibroacoustic control of cutting tool wear by the touch technique.

Materials and methods. The authors analyzed the modern methods of vibroacoustic diagnostics of the cutting process on the basis of the Fourier analysis.

Results. The researchers presented a structural scheme of a device of vibroacoustic control «Iznos-2mp», executed on a microprosessor base for CNC machine tools.

Conclusions. The analysis of the methods of cutting tool condition control in CNC machine tools showed that the most promising for practical application in conditions of production is the vibroacoustic method of control. Application of the method allows to achieve high accuracy and to use one vibroacoustic sensor for control of all machine tool's instruments.

Key words: checking wear on cutting tools by vibroacoustic method, mathematical modeling, choice of operating frequency range, measuring degree of tool wear.

Введение

Данная работа является продолжением статьи авторов о возможности ведения контроля состояния режущего инструмента виброакустическим методом [1]. Результаты математического моделирования картины акустического поля резца позволили предположить, что виброакустический метод можно использовать для контроля лезвия резца, однако процесс резания сопровождается большим количеством виброакустических помех периодического и непериодического характера. Для подавления периодических составляющих спектра частот вибраций системы (станок, приспособление, инструмент, деталь), не несущих информацию об износе режущего инструмента, применяют различные методы их устранения: интегрирование, синхронизацию, фильтрацию и др. [1, 2].

Виброакустический метод контроля состояния режущей кромки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) предполагает правильный выбор рабочего частотного диапазона, т.е. диапазона, где максимально выражено изменение амплитуды сигнала от износа лезвия резца. Теоретическая возможность такого выбора пока проблематична, а весь частотный диапазон ограничивается возможностями современных датчиков вибраций не интеллектуализированных в достаточной степени и не оснащенных средствами самоконтроля [3].

Для определения информативной полосы частот в звуковом диапазоне была проведена серия экспериментов на обычных токарных станках и станках с ЧПУ (при этом использовался стандартный широкополосный пьезоакселерометр типа АВС-27, расположенный на торцевой части резца [1]), сняты виброакустические амплитудно-частотные характеристики режимов резания в среде Audio-T.

В эксперименте в широких пределах изменялась глубина резания t, подача S и число оборотов n, использовались заготовки из различных металлов, с разными физико-механическими свойствами: сталь, латунь, дюралюминий. Точение заготовок проводилось однолезвийным резцом Т15К6 на станках типа 16К20 и ТПК-125.

Резец имел следующие геометрические размеры: длина 120 мм, ширина 10 мм, толщина 12 мм, углы заточки: $\alpha = 12°$, $\gamma = 18°$, $\varphi = 60°$, $\varphi_1 = 15°$.

При включении станка на одних и тех же режимах резания были сняты амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вибраций станка на холостом ходу при отсутствии режима резания (рис. 1), момента касания резцом заготовки (рис. 2) и режим резания (рис. 3, 4). Станок 16К20, материал заготовки – сталь, число оборотов шпинделя – 200 об/мин, подача – 0,1 мм/об, глубина резания 0–0,5 мм. АЧХ момента касания резцом вращающейся заготовки приведена на рис. 2.

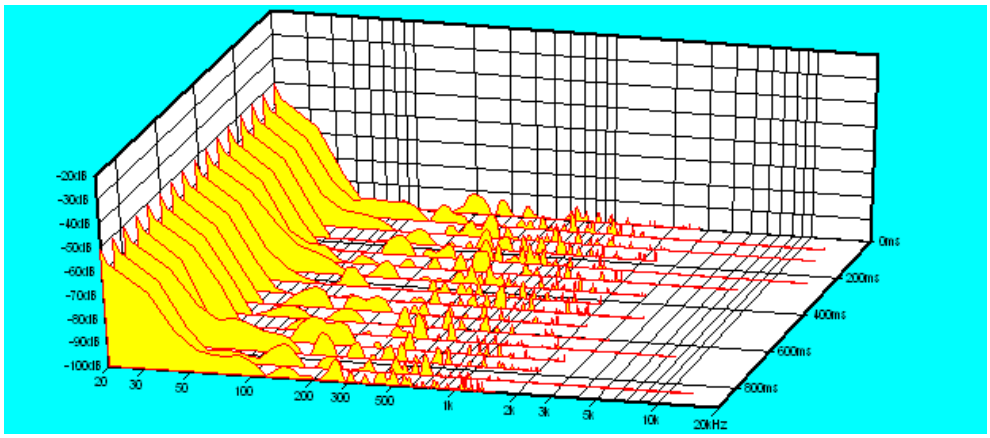


Рис. 1. Холостой ход (вибрации привода самого станка)
число оборотов шпинделя – 200 об/мин

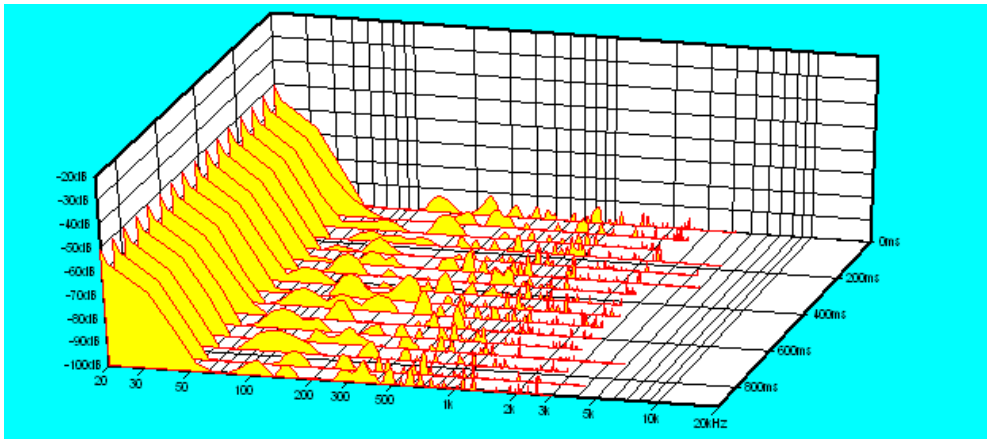


Рис. 2. АЧХ сигнала, получаемого с резца в режиме касания. Сталь, число оборотов шпинделя – 200 об/мин, глубина резания – 0 мкм (касание), подача – 0,1 мм/об

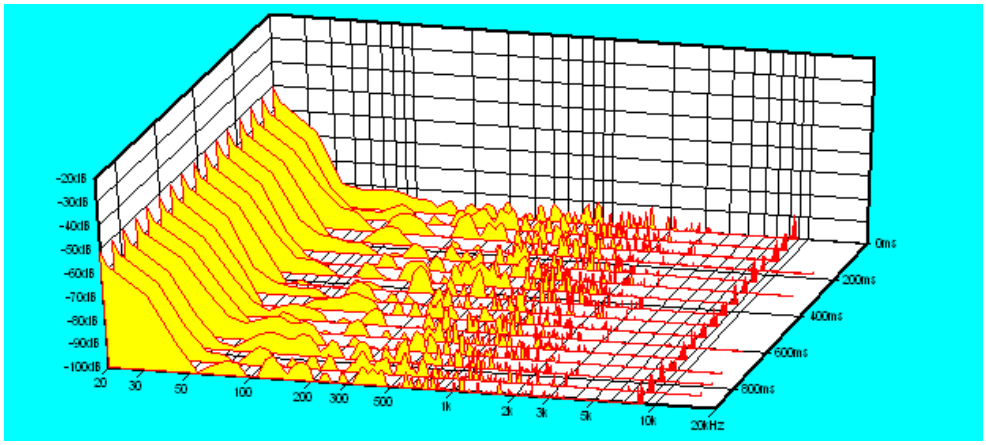


Рис. 3. АЧХ сигнала, получаемого с резца в режиме резания.
Материал сталь, число оборотов шпинделя – 200 об/мин,
подача – 0,1 мм/об, глубина резания – 10 мкм

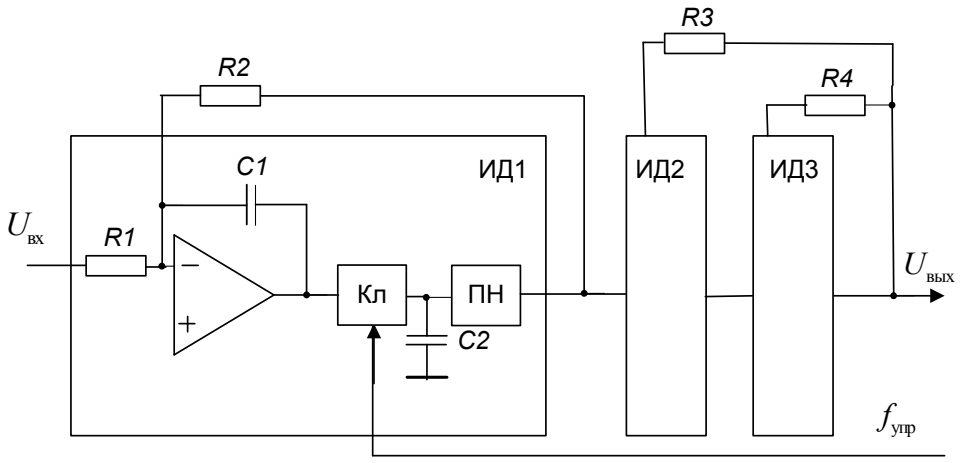


Рис. 4. Функциональная схема фильтра, использующего
три последовательно соединенных интегрирующих дискретизатора

Проведенное математическое моделирование акустических полей в теле резца [1, 4–9] и результаты экспериментов позволили выбрать полосы рабочих частот для контроля состояния режущих инструментов в пределах звукового диапазона.

На рис. 3 представлена АЧХ процесса резания острым резцом при глубине резания 10 мкм.

Фильтрация полезного сигнала

Использование фильтрации в устройствах виброакустического контроля обеспечивает подавление сигнала помехи и пропускание полезного сигнала. Рабочий диапазон частот и полосу пропускания фильтра для виброакустических устройств контроля состояния резца с твердосплавной режущей кромкой целесообразно находить из снятых амплитудно-частотных характеристик конкретного процесса резания (рис. 1–3). Для этого понадобятся высокодобротные перестраиваемые в достаточно широких пределах фильтры. Особенностью фильтров является наличие переходных процессов, которые тем дольше, чем выше добротность фильтра. Коэффициент подавления помехи фильтром определяется отношением амплитуды сигнала помехи на его входе $u_{\text{пом.вх}}$ к амплитуде сигнала помехи на его выходе $u_{\text{пом.вых}}$:

$$K_{\text{п}} = \frac{u_{\text{пом.вх}}}{u_{\text{пом.вых}}}.$$

Относительная погрешность измерения, обусловленная помехой, равна

$$\gamma = \frac{u_{\text{пом.вх}}}{u_{\text{пол}} K_{\text{п}}}.$$

Для случая периодической виброакустической помехи, связанной с работой привода станка и некруглостью детали, зажатой в патроне станка при резании, можно записать:

$$K_{\text{п}} = \frac{u_{\text{пом.вх}}}{u_{\text{пом.вых}} F(\omega)},$$

где $F(\omega)$ – функция, определяемая АЧХ фильтра.

Таким образом, с увеличением частоты помехи обусловленная этим погрешность измерения уменьшается. Наличие переходного процесса в фильтре влияет на быстродействие всего устройства. Время переходного процесса тем больше, чем выше значение коэффициента подавления помехи. Фильтрацией могут быть подавлены периодические и непериодические аддитивные помехи, не имеющие постоянной составляющей. Фильтр должен быть рассчитан на напряжение, равное сумме максимального значения измеряемого напряжения полезного сигнала и максимально допустимой амплитуды помехи:

$$u_{\text{полное}} = u_{\text{полез}} + \frac{u_{\text{пом.max}}}{K_{\text{п}}}.$$

Методика расчета пассивных и активных фильтров разработана достаточно хорошо. Современные фильтры проектируются на усилительных элементах: транзисторах, операционных усилителях с применением RC и LC цепей, формирующих их АЧХ. В качестве RC-фильтров обычно используют интегрирующие RC-цепи или двойные T-образные мосты в прямом или обратном включении. Но в приборах виброакустического контроля состояния режущего инструмента эффективность использования таких фильтров невелика.

Для разделения информативного виброакустического сигнала от виброакустического сигнала помехи системы (станок, приспособление, инструмент, деталь) необходимо учитывать режимы резания станка, изменяющиеся в зависимости от подачи, числа оборотов детали и глубины резания. Изменение режима резания влияет на виброакустический сигнал АЧХ. Для учета этого влияния необходимы перестраиваемые по полосе пропускания и рабочему диапазону фильтры достаточно высокой добротности. Эта задача в настоящее время решается методами аналого-дискретной фильтрации [10]. На рис. 4 представлена функциональная схема такого фильтра.

Для пояснения сущности работы схемы резонансного фильтра рассмотрим сначала работу интегрирующего дискретизатора (ИД). Интегрирующие дискретизаторы используются как высокоточные, помехоустойчивые усредняющие устройства. В данном случае используется их свойство осуществлять задержку значения входной величины на один цикл преобразования. Дискретизатор содержит: интегратор на базе усилителя постоянного тока с отрицательной емкостной обратной связью, ключ Кл, запоминающую емкость $C2$ и повторитель напряжения (ПН). В процессе работы устройства в начале каждого цикла преобразования T, задаваемого от генератора импульсов $f_{\text{упр}}$, на короткий промежуток времени замыкается ключ Кл и производится запоминание напряжения на интеграторе, которое хранится в течение всего цикла преобразования. В каждом n-м цикле преобразования напряжение на интеграторе увеличивается на $U_{\text{вх}}(n) = T/R1C1$, где $U_{\text{вх}}(n)$ – среднее за рассматриваемый интервал времени значение входного напряжения. Одновременно с этим

под действием выходного напряжения, которое равно результату интегрирования в (n – 1)-м цикле преобразования, будет осуществляться списывание информации, накопленной за предыдущий цикл. При $R2C1 = T$ выходное напряжение интегрирующего дискретизатора будет связано с входным следующим соотношением:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R2}{R1}U_{\text{вх}}(n-1),$$

т.е. осуществится задержка на один цикл дискретизированного по среднему значению входного напряжения. Точность интегрирующего дискретизатора, как следует из выражения $U_{\text{вых}}$, определяется стабильностью отношения сопротивления $R2/R1$.

Используя интегрирующие дискретизаторы в качестве элементов задержки, можно строить разнообразные фильтры, аналогично тому, как это осуществляется в цифровых фильтрах, у которых роль элементов задержки играют цифровые регистры. При этом существенно упрощается схемная реализация и сохраняется точность, свойственная цифровым фильтрам. Интегрирующие дискретизаторы имеют погрешность менее 0,01 %.

Работа фильтра заключается в том, что напряжение, поступающее на вход интегратора в течение интервала времени $T = \frac{1}{f_{\text{упр}}}$, интегрируется, здесь $f_{\text{упр}}$ – тактовая частота. В конце каждого такта напряжение, накопленное интегратором, запоминается на емкости $C2$, хранится в течение всего такта и подается на инвертирующий вход интегратора через резистор $R2$ обратной связи. Напряжение на выходе интегрирующего дискретизатора ИД1 $u_{\text{вых}(n)}$ описывается линейным разностным уравнением первого порядка:

$$u_{\text{вых}(n)} = u_{\text{вых}(n-1)} + \left(1 - \frac{T}{RC}\right)u_{\text{вых}(n-1)},$$

где $u_{\text{вых}(n-1)}$ – среднее значение входной величины за $(n-1)$ такт; n – номер такта.

Этому уравнению соответствует переходная функция $H(p) = \frac{e^{-pT}}{1 + ke^{-pT}}$, где p – оператор Лапласа, $k = 1 - \frac{T}{RC}$.

Модуль передаточной функции имеет вид

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + k^2 + 2k\cos\Omega}}, \qquad (1)$$

здесь $\Omega = \omega T$ (ω – текущее значение частоты), $\omega = 2\pi f$.

Из анализа выражения (1) следует, что при $k \to 1$ наблюдается резонанс на частоте, равной $0{,}5 f_{\text{упр}}$. Добротность фильтра определяется $Q = \frac{1}{1-k}$.

Частота резонанса не зависит от коэффициента обратной связи, а определяется тактовой частотой $f_{\text{упр}}$, а частота, как известно, может точно задаваться в широких пределах. Это является одним из достоинств аналого-дискретных фильтров, в которых для получения стабильной тактовой частоты используются высокостабильные кварцевые генераторы. В аналоговых фильтрах, частота резонанса которых определяется R, L, C – параметрами элементов фильтра, для получения стабильной частоты требуется высокая температурная и временная стабильность применяемых элементов.

Частота импульсов управления $f_{\text{упр}}$ ИД определяет среднюю частоту пропускания полосового фильтра $f_{\text{пф}}$ и выбирается из условия $f_{\text{упр}} = 2 f_{\text{пф}}$. Скважность импульсов управления порядка 50–100. Полоса пропускания фильтра задается резистором $R4$ и может быть приблизительно рассчитана по формуле

$$\Delta f_{\text{пф}} = \frac{f_{\text{пф}} \left[\pi - \arccos 0,5 \left(1 - \frac{1}{f_{\text{упр}} R_4 C} \right) \right]}{\pi}.$$

Добротность фильтра задается резисторами *R*3 и *R*4.

Перестройка резонансной частоты осуществляется без изменения схемотехнической основы устройства. По заданному значению резонансной частоты устанавливается необходимая частота импульсов управления и одновременно изменяются на одну и ту же величину номиналы емкостей *C*1 во всех трех интегрирующих дискретизаторах.

Подобные фильтры рационально применять в диапазоне 100–15000 Гц.

Описанный аналого-дискретный фильтр, легко перестраиваемый по частоте и полосе пропускания, удобно использовать в устройствах виброакустического контроля. Причем для различных режущих инструментов значение тактовой частоты дискретного фильтра задается программой станка автоматически в зависимости от режимов резания по снятым предварительно АЧХ. Очевидно, что для дальнейшего повышения помехозащищенности устройств необходимо повышать коэффициент подавления фильтров с одновременным увеличением их быстродействия за счет уменьшения длительности переходных процессов.

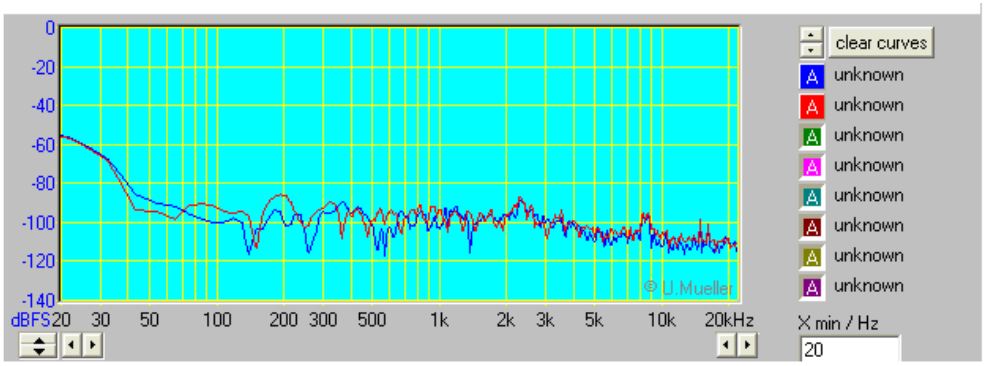
Установка аналого-дискретного фильтра в устройствах контроля состояния режущего инструмента приводит к некоторому усложнению схем устройств, но позволяет совмещать фильтрацию помех с другими методами повышения помехозащищенности.

Современные методы виброакустической диагностики процесса резания, основанные на Фурье-анализе

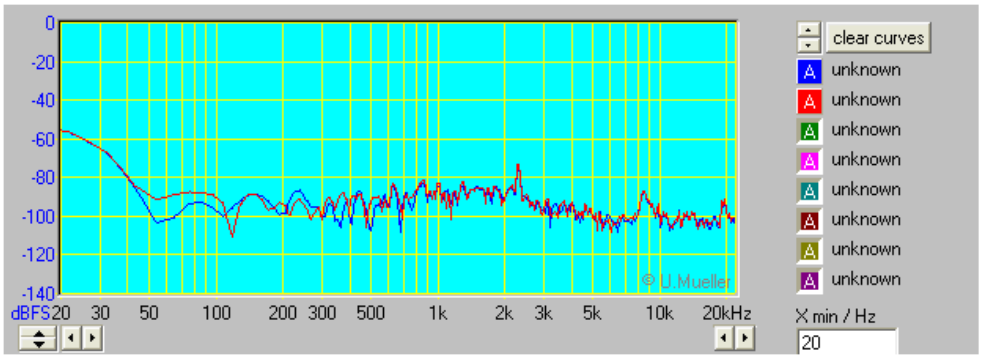
В настоящее время в вибродиагностике используются различные методы оценки динамики сложных виброакустических процессов. Для виброакустического анализа процесса резания резца целесообразно применять следующие методы: метод ПИК-фактора, метод прямого спектра, метод спектра огибающей.

Метод ПИК-фактора

Метод ПИК-фактора отслеживает изменение отношения пиковой амплитуды вибросигнала к его среднеквадратичному значению в выбранном диапазоне частот, например, полосы 200–300 Гц, 2–3 кГц (рис. 5).



а) АЧХ процесса резания острым резцом



б) АЧХ процесса резания изношенным резцом

Рис. 5. Вид АЧХ виброакустического сигнала одним и тем же острым и изношенным резцом

Основное достоинство метода – определение начала разрушения острия резца (выкрашивание) и отслеживание дальнейшего процесса его разрушения.

Основные недостатки – слабая помехозащищенность метода и необходимость проведения постоянных измерений в процессе резания. В случае изменения ПИК-фактора в выбранном частотном диапазоне на блок управления ЧПУ передается сигнал на использование виброакустического контроля касанием и измерения размерного износа острия резца.

Метод прямого спектра

АЧХ на рис. 5 можно проанализировать не только с точки зрения соотношения амплитудных и энергетических характеристик, но и с точки зрения периодичности появления амплитудных всплесков. Этот принцип используется в методе прямого спектра. Вибрационный сигнал анализируется узкополосным спектроанализатором, и по частотному составу спектра идентифицируется возникновение и развитие дефектов острия.

Основных достоинств у метода два:

– достаточно высокая помехозащищенность (маловероятно наличие в зоне резания источников, создающих вибрации на тех же точно частотах, что и дефекты острия);

– информативность метода существенно выше, чем по методу ПИК-фактора.

Недостатка два:

– метод требует наличия узкополосного спектроанализатора;

– метод малочувствителен к малым дефектам острия. Это связано с тем, что плавный износ острия резца слабо влияет на виброакустическую картину резания. Только при достаточно сильных дефектах лезвия резца полезный виброакустический сигнал начинает заметно выделяться над общей шумовой частью спектра. В случае использования этого метода после определения возникших изменений в ЧПУ подается сигнал на виброакустический контроль касанием для определения размерного износа инструмента.

Метод спектра огибающей

Высокочастотная часть сигнала меняет свою амплитуду во времени, она модулируется более низкочастотным сигналом. Это модулирование может содержать информацию о состоянии лезвия резца. Выделение и обработка этой информации составляют основу этого метода. Наилучшие результаты этот метод дает в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала, получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить полосовую фильтрацию вибросигнала в рабочем диапазоне и анализировать модуляцию этого сигнала. Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, т.е. выделяется модулирующий сигнал (его называют «огибающая сигнала»), который подается на узкополосный спектроанализатор и получается спектр интересующего нас модулирующего сигнала или спектр огибающей. Достоинства метода – высокая чувствительность, информативность и помехозащищенность. Основной недостаток – высокая стоимость и сложность реализации. Применение данного метода также подразумевает передачу на ЧПУ станка сигнала на виброакустический контроль касанием с последующим измерением размерного износа лезвия резца.

Для анализа состояния лезвия резца пока целесообразно использовать метод ПИК-фактора, так как он позволяет отслеживать состояние лезвия от момента начала разрушения до полной его деградации. При этом не требуется дорогостоящих аппаратурных средств и какой-либо экспертной оценки.

Алгоритмы виброакустического контроля износа режущего инструмента методом касания

Среди методов виброакустического контроля состояния режущего инструмента особое место занимает контроль касанием [11, 12]. Он должен быть отнесен скорее к межоперационному или послеоперационному контролю состояния режущего инструмента, его отличает высокая точность контроля (шаг станка с ЧПУ). По сигналу виброакустического устройства контроля состояния режущего инструмента, описанного выше, проводится точное измерение размерного износа контролируемого инструмента.

Алгоритм виброакустического контроля состояния режущего инструмента методом касания целесообразно хранить в виде набора подпрограмм в памяти станка с ЧПУ. Вызов подпрограммы может осуществляться по разным признакам, сопутствующим процессу обработки деталей: времени резания, стойкости инструмента, подсчету числа готовых изделий, температуре зоны резания и др., но наиболее удобно и точно – по сигналу с устройства активного виброакустического контроля состояния режущего инструмента [2]. По этому сигналу процесс обработки детали прекращается и производится контроль износа режущего инструмента методом касания с одновременным подсчетом шагов до момента касания.

В зависимости от технических особенностей станка с ЧПУ и технологии изготовления деталей выбирают один из возможных вариантов контроля режущего инструмента методом касания:

– использование метода касания базовой поверхности;

– использование метода касания поверхности самой детали эталонным резцом.

В первом случае производится подсчет шагов от начального контрольного положения инструмента до базовой поверхности, сформированной и закрепленной на шпинделе станка. Касание осуществляется одним и тем же инструментом, вначале острым, затем изношенным.

Размерный износ инструмента определяется по разности шагов острого и изношенного резца до базовой поверхности.

Неудобство первого метода заключается в необходимости создания базовой вращающейся поверхности, закрепленной на шпинделе станка, и необходимость контроля ее состояния, что требует дополнительных затрат времени.

Во втором случае для определения износа инструмента резание прекращается, рабочий резец с подсчетом шагов отводится на исходную позицию, затем выводится на контрольную позицию эталонный резец, подсчитывается число шагов до поверхности, обрабатываемой детали. После этого сравнивается число шагов рабочего и эталонного резца и определяется износ инструмента. Если износ меньше критического, обработка детали продолжается с места остановки, причем разность шагов отрабатывается рабочим инструментом. Если износ больше допустимого, подается сигнал на замену инструмента.

Этот метод отбирает одно рабочее место, например, у револьверной головки, что не всегда удобно по технологическим соображениям.

На рис. 6 приведен один из вариантов такого адаптивного алгоритма виброакустического контроля состояния режущего инструмента для станков с ЧПУ. В приведенном алгоритме контроля касанием нужно особо остановиться на температурных погрешностях, возникающих при обработке детали на станке с ЧПУ. Так, например, при колебаниях температуры обрабатываемой детали в пределах $\Delta t = \pm 10$ °С температурная погрешность на диаметр детали $d =$ 50 мм составляет $\pm 5{,}5$ мкм. В алгоритме контроля касанием ее необходимо учитывать, так как шаг современного станка с ЧПУ составляет от 10 до 2 мкм. Повышение точности контроля в этом случае возможно за счет применения цифрового термокомпенсированного датчика измерения малых линейных перемещений. На основании полученных экспериментальных данных установлено, что в общем случае температуры охлаждающей жидкости (СОЖ), обрабатываемой детали и режущего инструмента не равны между собой и могут отличаться на значительную величину. Так, температура

острого резца в проведенном эксперименте оказалась на 1–4 °С выше температуры СОЖ, а температура детали выше последней на 10–25 °С.

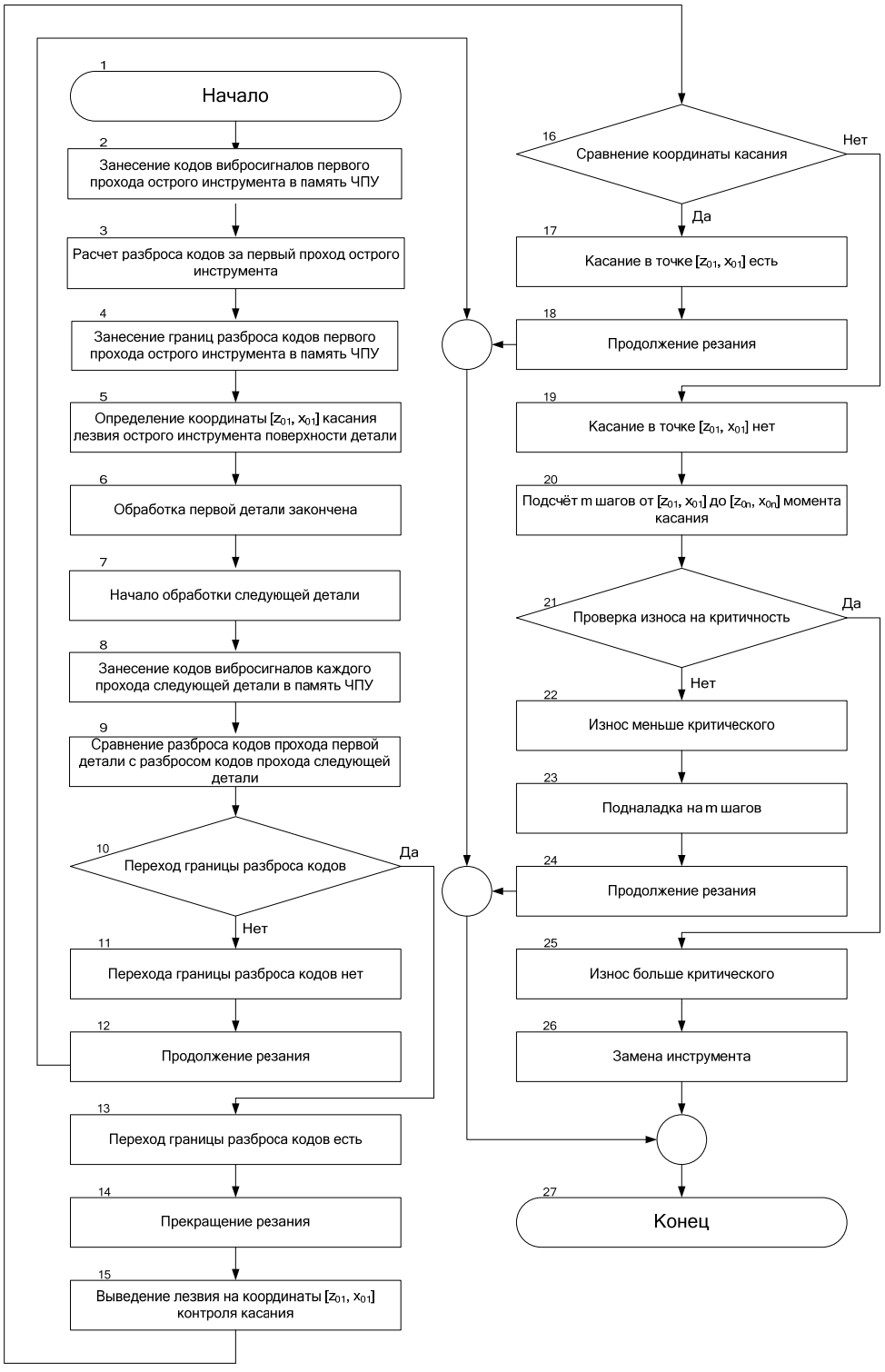


Рис. 6. Алгоритм контроля размерного износа резца на станке с ЧПУ

В современном производстве самым надежным способом достижения минимальной величины температурной погрешности размера детали является быстрый отвод тепла с помощью охлаждающей жидкости и воздуха, а также регулирование температуры охлаждающей жидкости, масла в гидросистеме и в окружающей среде и поддерживания постоянной температуры 20 °С.

Для снижения температурных погрешностей текущий контроль касанием необходимо производить при равных температурных условиях.

К достоинствам виброакустического контроля касанием самим режущим инструментом можно отнести также невозможность возникновения автоколебаний, а следовательно, и погрешностей измерения в системе (станок – приспособление – инструмент – деталь) из-за практически отсутствия сил резания.

На рис. 7 представлена структурная схема устройства виброакустического контроля «Износ-2мп», выполненного на микропроцессорной основе, что позволяет не только применять алгоритмы контроля любой сложности, но и изменять их простым изменением программы.

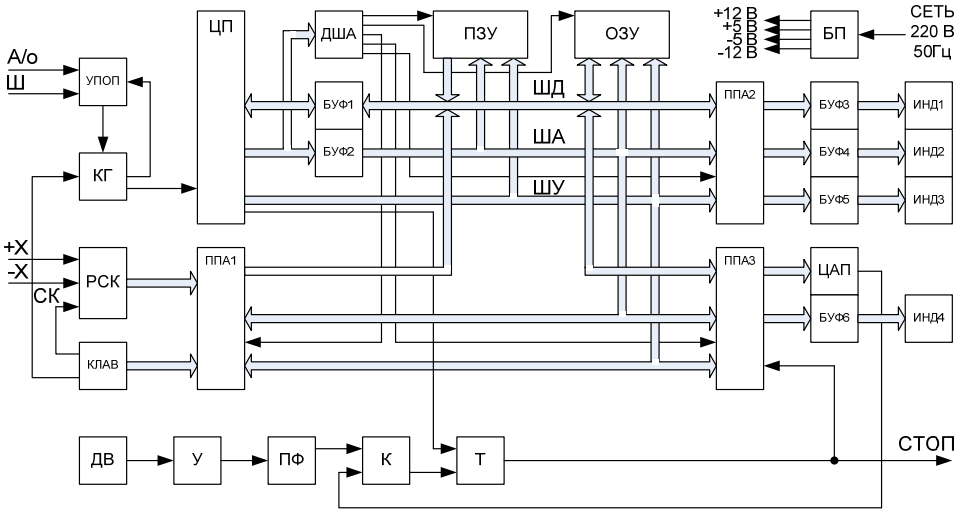


Рис. 7. Структурная схема устройства виброакустического контроля «Износ-2мп»

Устройство выполняет активный виброакустический контроль семи резцов и их контроль касанием и выводит значения текущего размерного износа резцов на блок индикации. Внешний вид устройства представлен на рис. 8.

Технические характеристики устройства «Износ-2мп»:

– быстродействие, изм/с……..……...……5;
– точность контроля, мкм……...….±1 шаг станка;
– количество контролируемых инструментов, шт…...……..……7;
– питание от сети 50 Гц, В……...……..220;
– потребляемая мощность, Вт……...……..50;
– габариты, мм……...….370×300×120;
– масса, кг…….……2,5.

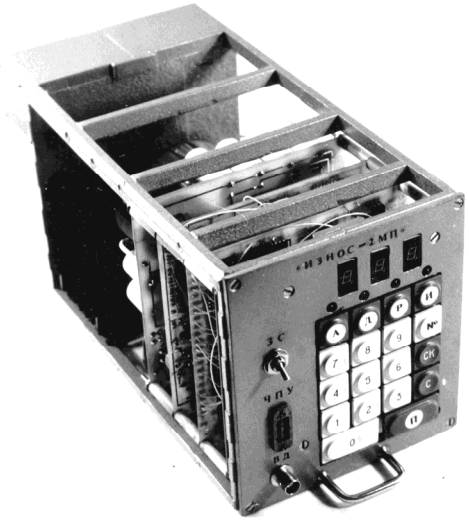


Рис. 8. Внешний вид устройства «Износ-2мп»

Виброакустическим прибором контроля состояния режущего инструмента «Износ-2мп» оснащена стойка 2Р22 станка ЧПУ 16К20.

Заключение

Анализ методов контроля состояния режущего инструмента показал, что наиболее перспективным для практического применения в производственных условиях является виброакустический метод контроля. Применение метода позволяет получить высокую точность и быстродействие и использовать один виброакустический датчик для контроля всех инструментов станка. Предложено анализировать виброакустические явления процесса резания математическими моделями [1] без учета автоколебаний. Разработаны способы компенсации периодических виброакустических помех, вызванных работой привода станка, некруглостью заготовки, методами многократного интегрирования, синхронизации и фильтрации.

Разработан, испытан и внедрен цифровой виброакустический прибор контроля состояния режущего инструмента «Износ-2мп», работающий в полосе информативных резонансных частот режущего инструмента.

Список литературы

1. **Добровинский, И. Р.** Измерение износа резца виброакустическим методом и моделирование напряженности акустического поля внутри режущего инструмента / И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик, В. С. Чапаев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 59–70.
2. Пат. № 2263300 Россия. Устройство для измерения износа режущего инструмента / Добровинский И. Р. Белолапотков Д. А., Медведик Ю. Т., Чувыкин Б. В. – Опубл. 27.10.2004, Бюл. № 30.
3. **Шаблицкий, А. Ю.** Метрологический самоконтроль в интеллектуальном акустическом пьезоэлектрическом датчике / А. Ю. Шаблицкий, В. К. Доля // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 36–45.

4. **Медведик, М. Ю.** Субиерархический метод решения интегрального уравнения на плоских экранах произвольной формы / М. Ю. Медведик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2009. – № 4 (12). – С. 48–53.
5. **Медведик, М. Ю.** Субиерархический метод решения интегрального уравнения Липпмана – Швингера / М. Ю. Медведик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2010. – № 4 (16). – С. 82–88.
6. **Медведик, М. Ю.** Субиерархический метод решения задачи дифракции электромагнитных волн на диэлектрическом теле в прямоугольном волноводе / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, № 8. – С. 940–945.
7. **Медведик, М. Ю.** Субиерархический параллельный вычислительный алгоритм для решения задач дифракции электромагнитных волн на плоских экранах / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 4. – С. 441–446.
8. **Медведик, М. Ю.** Применение субиерархического метода в задачах электродинамики / М. Ю. Медведик // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – Т. 13. – С. 87–97.
9. **Медведик, М. Ю.** Субиерархический метод решения интегрального уравнения Липпмана – Швингера на телах сложной формы / М. Ю. Медведик // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 2. – С. 175–180.
10. **Добровинский, И. Р.** Цифровой анализатор частоты звукового диапазона / И. Р. Добровинский и др. // Организация производства и прогрессивная технология. – М. : ЦНИИатоминформ, 1981. – № 8. – С. 41–43.
11. А.с. 1442875 (СССР). Устройство контроля затупления режущего инструмента на станках с ЧПУ / Добровинский И. Р., Бражников А. И., Медведик Ю. Т. – Опубл. 12.07.11. Бюл. № 45.
12. А.с.1705022 (СССР). Устройство контроля затупления режущего инструмента на станках с ЧПУ / Медведик Ю. Т., Бражников А. И., Добровинский И. Р. – Опубл. 16.03.08. Бюл. № 2.

References

1. Dobrovinskiy I. R., Medvedik Yu. T., Medvedik M. Yu., Chapaev V. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 2 (26), pp. 59–70.
2. Pat. No. 2263300 Russian Federation. Device for cutting tool wear measurement. Dobrovinskiy I. R. Belolapotkov D. A., Medvedik Yu. T., Chuvykin B. V. Publ. 27 November 2004. Bull. No. 30.
3. Shablitskiy A. Yu., Dolya V. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 3 (23), pp. 36–45.
4. Medvedik M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 4 (12), pp. 48–53.
5. Medvedik M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 4 (16), pp. 82–88.
6. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2011, vol. 56, no. 8, pp. 940–945.
7. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2008, vol. 53, no. 4, pp. 441–446.

8. Medvedik M. Yu. *Vychislitel'nye metody i programmirovanie* [Numerical methods and programming]. 2012, vol. 13, pp. 87–97.
9. Medvedik M. Yu. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2012, vol. 57, no. 2, pp. 175–180.
10. Dobrovinskiy I. R. et al. *Organizatsiya proizvodstva i progressivnaya tekhnologiya* [Organization of production and progressive technology]. Moscow: TsNIIatominform, 1981, no. 8, pp. 41–43.
11. A.s. 1442875 (SSSR). *Ustroystvo kontrolya zatupleniya rezhushchego instrumenta na stankakh s ChPU* [Device for cutting tool dulling control in CNC machine tools]. Dobrovinskiy I. R., Brazhnikov A. I., Medvedik Yu. T. Publ. 12 July 2011. Bull. No. 45.
12. A.s.1705022 (SSSR). *Ustroystvo kontrolya zatupleniya rezhushchego instrumenta na stankakh s ChPU* [Device for cutting tool dulling control in CNC machine tools]. Medvedik Yu. T., Brazhnikov A. I., Dobrovinskiy I. R. Publ. 16 March 2008. Bull. No. 2.

Добровинский Игорь Рувимович
доктор технических наук, профессор, кафедра информационно-измерительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: idobr@tl.ru

Dobrovinskiy Igor' Ruvimovich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of information measuring technology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Медведик Юрий Тимофеевич
кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра электротехники и транспортного электрооборудования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: yura.medvedik@mail.ru

Medvedik Yuriy Timofeevich
Candidate of engineering sciences, senior lecturer, sub-department of electrical engineering and transport electrical equipment, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Медведик Михаил Юрьевич
кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математики и суперкомпьютерного моделирования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: medv@mail.ru

Medvedik Mikhail Yur'evich
Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, sub-department of mathematics and supercomputer modeling, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.08
Добровинский, И. Р.

К вопросу контроля состояния режущей кромки резца виброакустическим методом / И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 102–116.

УДК 620.197 +621.791.13

И. С. Лось, А. Е. Розен, Л. Б. Первухин,
Ю. П. Перелыгин, С. Г. Усатый, Д. Б. Крюков, А. А. Розен

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И СЕРТИФИКАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ С «ПРОТЕКТОРНОЙ ПИТТИНГ-ЗАЩИТОЙ»

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются многослойные коррозионно-стойкие материалы с «протекторной питтинг-защитой», в которых принципиально новым является внутреннее расположение протектора. Предметом исследования являются технология сварки взрывом, использованная для производства многослойных коррозионно-стойких материалов, и их коррозионные и технологические свойства. Целью работы является представление инновационного продукта на рынке металлопродукции, на который разработаны и утверждены технические условия.

Материалы и методы. Исследование многослойных коррозионно-стойких материалов выполнено с использованием стандартных методик, способов контроля сварных соединений и оригинальных методик, разработанных для оценки коррозионной стойкости многослойных материалов.

Результаты и выводы. Разработанные многослойные коррозионно-стойкие материалы защищены патентами 11 стран. Они могут быть произведены в соответствии с требованиями ТУ 0989-001-43070235–2012. Основные области их применения – химическая, нефтегазовая промышленность, атомная энергетика.

Ключевые слова: многослойные коррозионно-стойкие материалы, технология сварки взрывом, коррозионные и технологические свойства.

I. S. Los', A. E. Rozen, L. B. Pervukhin,
Yu. P. Perelygin, S. G. Usatyy, D. B. Kryukov, A. A. Rozen

EXPERIENCE OF DEVELOPMENT AND CERTIFICATION OF MULTILAYER CORROSION-RESISTANT MATERIALS WITH “SACRIFICIAL PITTING PROTECTION”

Abstract.

Background. The research object is the multilayer corrosion-resistant materials with “sacrificial pitting protection” that feature a principally new internal placement of a protector. The research subject is the technology of explosion welding used for production of the multilayer corrosion-resistant materials, and corrosion and technological properties thereof. The aim of the work is to present the innovative product in the metal product market, for which the technical conditions have been developed and approved.

Materials and methods. Research of multilayer corrosion-resistant materials was is carried out using the standard techniques, methods of welded joints control and original methods, developed multilayer materials’ corrosion resistance estimation.

Results and conclusions. The developed multilayer corrosion-resistant materials are protected by patents in 11 countries. They can be produced according to the requirements ТУ 0989-001-43070235–2012. The main fileds of application are chemical and oil-and-gas industries, nuclear power engineering.

Key words: multilayer corrosion-resistant materials, explosion welding technology, corrosion and technological properties.

Введение

Эксплуатация технологического оборудования ведущих отраслей промышленности связана с агрессивным воздействием рабочих сред и внешних климатических факторов. Ущерб составляют не только прямые, но и косвенные потери от простоя оборудования при замене прокорродировавших деталей, нарушении технологических процессов, ликвидации экологических и социальных последствий. Ежегодные потери от коррозии оцениваются в 2,2 трлн долл. и составляют от 2,0 до 4,0 % валового национального продукта промышленно развитых стран [1, 2].

Основными отраслями, в которых металлоконструкции подвержены различным видам коррозии, являются химическая, нефтегазоперерабатывающая, целлюлозно-бумажная промышленности, атомная энергетика.

В США в 2011 г. прямые потери от коррозии составили 468 млрд долл. Химическая и нефтехимическая промышленность США по уровню потерь от коррозии занимает третье место среди отраслей промышленности. В нефтехимической промышленности Японии затраты на защиту оборудования от коррозии составляют 575 млн долл. в год, из них затраты на защиту от коррозии новых установок – 340 млн долл. (60 %); на защиту ранее построенных установок – 235 млн долл. (40 %).

По данным фирмы «Du Pont» (США) [3], в 247 случаях выхода из строя оборудования этой фирмы 79 % аварий произошли по причине коррозионных повреждений. При этом на долю общей коррозии пришлось 31,5 % случаев, на коррозионное растрескивание (коррозия под напряжением) – 21,6 % случаев, питтинговая коррозия стала причиной 15,7 % выходов оборудования из строя, а межкристаллитная коррозия явилась причиной аварий в 10,2 % случаев.

Развитие атомной энергетики также требует решения задач по противокоррозионной защите. Технологических цикл эксплуатации всех типов атомных электростанций предусматривает накопление жидких радиоактивных отходов (ЖРО), содержащих большое количество галогенов, которые провоцируют коррозионное разрушение. До настоящего времени эффективные меры переработки ЖРО отсутствуют. Только в России их количество превышает 470 млн т [4]. В настоящее время длительность эксплуатации хранилищ определяется толщиной стенки из коррозионно-стойкой стали. Потребность в хранилищах ЖРО существует во всех странах, производящих атомную электроэнергию [5].

Таким образом, проблема коррозионного разрушения остается чрезвычайно актуальной во всем мире. Широко применяемые в настоящее время коррозионностойкие моно- и биметаллические материалы не могут в полной мере осуществить повышение ресурса работы материала в агрессивных и высоко агрессивных средах. Направление разработки новых сталей и сплавов, основанное на увеличении содержания легирующих элементов, молибдена, никеля и хрома, практически исчерпано.

1. Описание технического решения

Одним из наиболее опасных видов коррозионного разрушения является питтинговая коррозия. Она характерна для пассивирующихся материалов:

хромоникелевых сталей, сплавов титана, алюминия. Питтинг развивается вследствие неоднородности химического состава металла или сплава, структурных несовершенств и неметаллических включений. Выделяют два необходимых условия образования питтинга – смещение электрохимического потенциала металла положительнее некоторого критического значения и наличие окислителей и активирующих ионов [6]. Особая опасность питтинговой коррозии заключается в сквозной перфорации в исключительно малых объемах, в то время как вся конструкция сохраняет высокую прочность, а потери массы от коррозии составляют менее 0,001 %.

В 2008 г. сотрудниками Пензенского государственного университета совместно с коллегами из Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка Московской обл.) был разработан новый коррозионно-стойкий материал [7]. Принципиальным отличием предложенного технического решения является применение в структуре многослойных материалов внутренних слоев-протекторов определенного электрохимического потенциала, которые заключены между слоями более стойких в коррозионном отношении сплавов. Авторами проекта данное техническое решение названо «протекторной питтинг-защитой» [8–10].

Показано, что многослойный материал должен содержать как минимум три слоя, средним из которых является протектор – жертвенный слой. Материалы защищаемых слоев и протектора и число слоев выбирают в зависимости от состава среды и напряжений, действующих в конструкции. При этом соотношение электрохимических потенциалов защищаемых слоев и протектора должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечивалось пассивное состояние защищаемых слоев в течение длительного времени. Для достижения высокой конструкционной прочности трехслойный материал может быть соединен с основным слоем из низколегированной или углеродистой стали заданной толщины.

При контакте первого слоя с агрессивной средой, не содержащей окислители, на нем устанавливается стационарный потенциал E_1 (рис. 1). В результате действия среды в нем возникают очаги поражения в виде питтинга, которые с течением времени увеличивают глубину и достигают второго слоя. Материал второго слоя выбирается таким образом, чтобы величина его стационарного электрохимического потенциала E_2 в условиях контакта с рабочей средой была ниже стационарного электрохимического потенциала металла первого слоя.

При достижении питтингом металла второго слоя устанавливается стационарный потенциал E_{12}, обусловленный контактной разностью потенциалов металла первого и второго слоев, что соответствует точке пересечения катодной кривой K_1 и анодной кривой A_2 материалов первого и второго слоев соответственно. При этом металл второго слоя становится анодом, а металл первого – катодом. Второй слой является протектором, т.е. жертвенным электродом по отношению к первому слою, и постепенно растворяется. Реакция анодного растворения может протекать до образования в протекторе полости значительных размеров – линзы. Третий слой по составу аналогичен первому и также сохраняет пассивное состояние.

Таким образом, происходит трансформация питтинговой коррозии в анодное растворение протектора, что позволяет снизить скорость коррози-

онного разрушения, приводящего к сквозной перфорации. Для достижения высокой конструкционной прочности трехслойный материал может быть соединен с основным слоем из низколегированной или углеродистой стали заданной толщины.

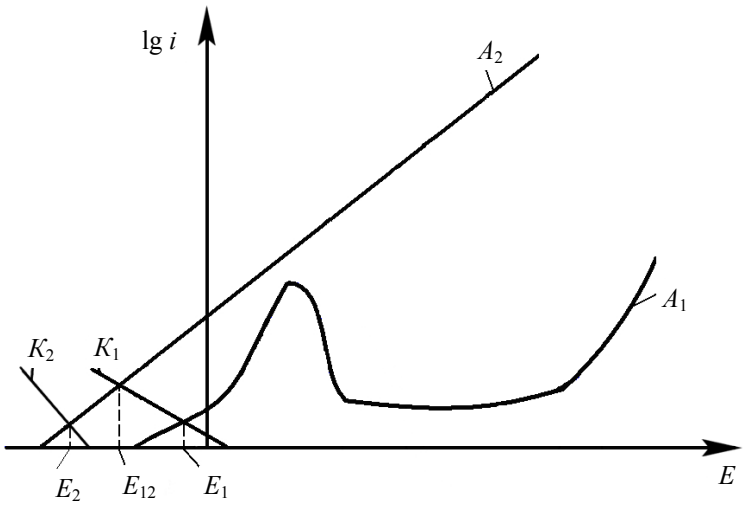


Рис. 1. Схематичное расположение поляризационных кривых металлов в многослойном материале: K_1, K_2 – катодные кривые наружного и внутреннего слоев; A_1, A_2 – анодные кривые соответственно

Результаты разработки были оформлены в виде международной заявки на изобретение и поданы на регистрацию в рамках PCT. На международную заявку PCT/RU2008/000620 получено обоснованное утверждение в отношении новизны, изобретательского уровня и промышленной применимости. Опубликованная международная заявка WO2010/036139 A1 на изобретение «Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения» относится к области электрохимии, материаловедения и металлургии [11]. Поданы заявки по национальным процедурам патентования в Японии, США, Китае, Южной Корее, Украине, по региональным процедурам в Европейское и Евразийское патентные ведомства. Предполагается получение исключительных прав на изобретение в 37 странах. На настоящий момент получены патенты по 11 странам [12–14].

2. Технология производства многослойных материалов

В качестве основной технологии производства многослойного металлического материала с «протекторной питтинг-защитой» была выбрана сварка взрывом. Это высокоскоростной способ сварки давлением, при котором неразъемное соединение формируется в результате соударения свариваемых элементов под действием расширяющихся продуктов взрыва.

К числу основных преимуществ данного способа сварки относятся:

– возможность получения соединений из однородных и разнородных металлов и сплавов, в том числе с резко отличающимися физическими и механическими свойствами;

– основной и плакирующий слой в процессе сварки взрывом не изменяют химического состава;

– сварка взрывом осуществляется в твердой фазе, что позволяет соединять материалы, образующие хрупкие интерметаллические соединения;

– возможность получения соединений площадью до 30 м^2 (толщина основного слоя, ограниченного только толщиной проката, толщина плакирующего слоя до 15 мм);

– возможность получения плоских, цилиндрических заготовок и плакирования криволинейных поверхностей;

– отсутствие необходимости применения сложного и дорогостоящего оборудования;

– сравнительно низкая стоимость расходуемых материалов (взрывчатых веществ, вспомогательных материалов);

– возможность получения многослойных материалов за один технологический цикл сварки, т.е. за один подрыв.

Для производства трехслойных материалов использовали схему сварки, приведенную на рис. 2. Пластины *3* и *4* последовательно устанавливали на технологических опорах на неподвижной пластине 5. Высота опор соответствовала величине зазоров h_1 и h_2. В качестве опор использовали V-образные скобы (жеребейки) из металла, близкого по составу к одному из свариваемых материалов. Чтобы обеспечить высокое качество сварки по всему периметру, пластины *3* и *4* имели размер, на 40 мм больший по сравнению с неподвижной пластиной. В процессе сварки происходила вырубка по периметру неподвижной пластины. Для предотвращения схватывания неподвижной пластины с основанием между ними прокладывали инертный материал *6* (полиэтилен). Заряд (взрывчатое вещество – ВВ) располагали на наружной поверхности верхней метаемой пластины в специальном контейнере.

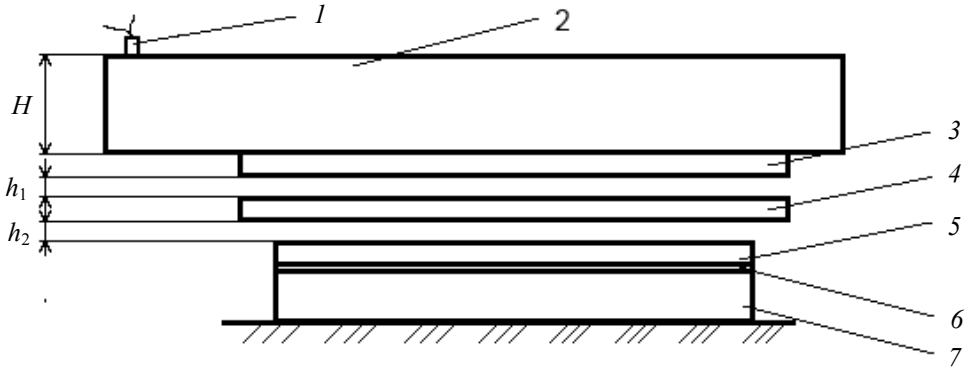


Рис. 2. Схема сварки взрывом трехслойного материала: H – толщина заряда ВВ; h_1, h_2 – технологические зазоры: *1* – электродетонатор; *2* – заряд ВВ; *3*, *4* – метаемые пластины; *5* – неподвижная пластина; *6* – слой инертного материала; *7* – стальное основание

При сварке взрывом четырехслойного материала увеличивали число метаемых пластин, а нижняя пластина одновременно являлась четвертым слоем. Толщина трехслойных материалов составляла от 6 до 24 мм, а четы-

рехслойных – от 16 до 75 мм. Площадь заготовок варьировалась в пределах от 1 до 9 м^2.

Для назначения технологических режимов процесс сварки взрывом предварительно моделировали с применением многоцелевой программы *LS-DYNA*, предназначенной для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных задач механики деформированного твердого тела и теплопереноса, механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа. Моделирование было проведено при помощи многокомпонентного эйлерового подхода. Каждый элемент содержал определенную часть представленного в рассматриваемой системе материала. Для описания поведения взрывчатого вещества была использована модель Уилкинса – Гейроуха. Она позволила моделировать детонацию взрывчатого вещества. Дополнительно было задано уравнение состояния. В данном решении использовали модель *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN*, включающую уравнение Джонса – Уилкинса – Ли. Объемная деформация определялась натуральным логарифмом относительного объема. Вплоть до смены сжатия растяжением разгрузка происходит по линейному закону с наклоном, соответствующим величине объемного модуля для ненагруженного состояния.

На рис. 3 в качестве примера приведены графические результаты моделирования трехслойного материала состава 08Х18Н10Т + сталь 10 + + 08Х18Н10Т [15].

Моделирование процесса сварки взрывом позволило существенно сократить число экспериментов и устойчиво получать качественные трех- и четырехслойные композиции многослойного материала с «протекторной питтинг-защитой» в широком диапазоне толщин и размеров.

В частности, были получены:

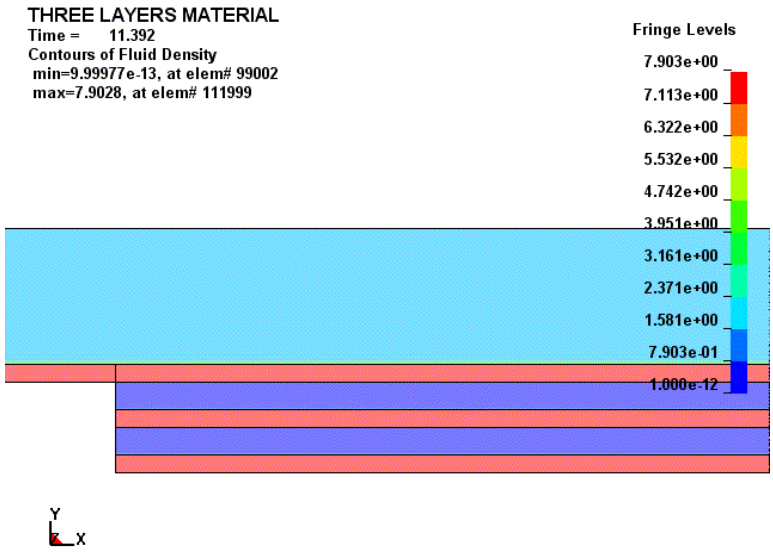
08Х18Н10Т + сталь 10 + 08Х18Н10Т,
12Х18Н10Т + сталь 20 + 12Х18Н10Т,
12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т,
08Х18Н10Т + сталь 08кп + 08Х18Н10Т,
12Х18Н10Т + Ст3 + 12Х18Н10Т,
08Х18Н10Т + сталь 10 + 08Х18Н10Т + 09Г2С,
10Х17Н13М3Т + сталь 10 + 10Х17Н13М3Т + 09Г2С,
08Х18Н10Т + сталь 08кп + 08Х18Н10Т + 09Г2С.

Работы по сварке взрывом производились на специализированных полигонах Пензенского государственного университета, Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН и ООО «Битруб Интернэшнл» (рис. 4,***а***,***б***,***в***). После сварки взрывом осуществляли 100 % визуальный и ультразвуковой виды контроля на всех образцах (рис. 4,***г***).

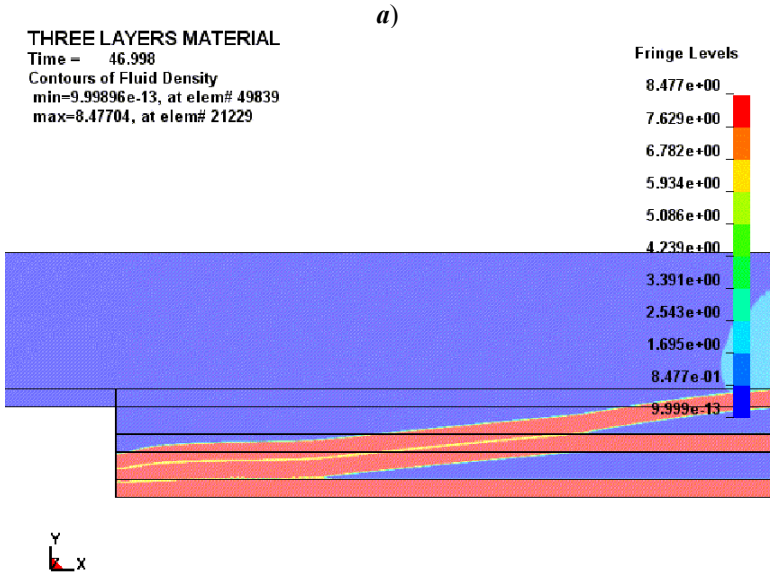
Для устранения остаточной деформации заготовки подвергали термической обработке – нормализации при температуре 840…850 °С и правке на прессе и пятивалковых вальцах.

Из многослойных заготовок изготавливали образцы для исследования микроструктуры, механических свойств и для проведения коррозионных испытаний. Основная сложность этого этапа работ заключалась в отсутствии методик испытаний, предназначенных для многослойных материалов. Совместно с ОАО ГНЦ «НПО ЦНИИТМАШ» (г. Москва) были разработаны ме-

тодики по оценке скорости коррозионного разрушения [7–9] и проведены соответствующие испытания, которые подтвердили результаты предварительных исследований и позволили перейти к процедуре подтверждения качества посредством независимой экспертизы – сертификации.



а)



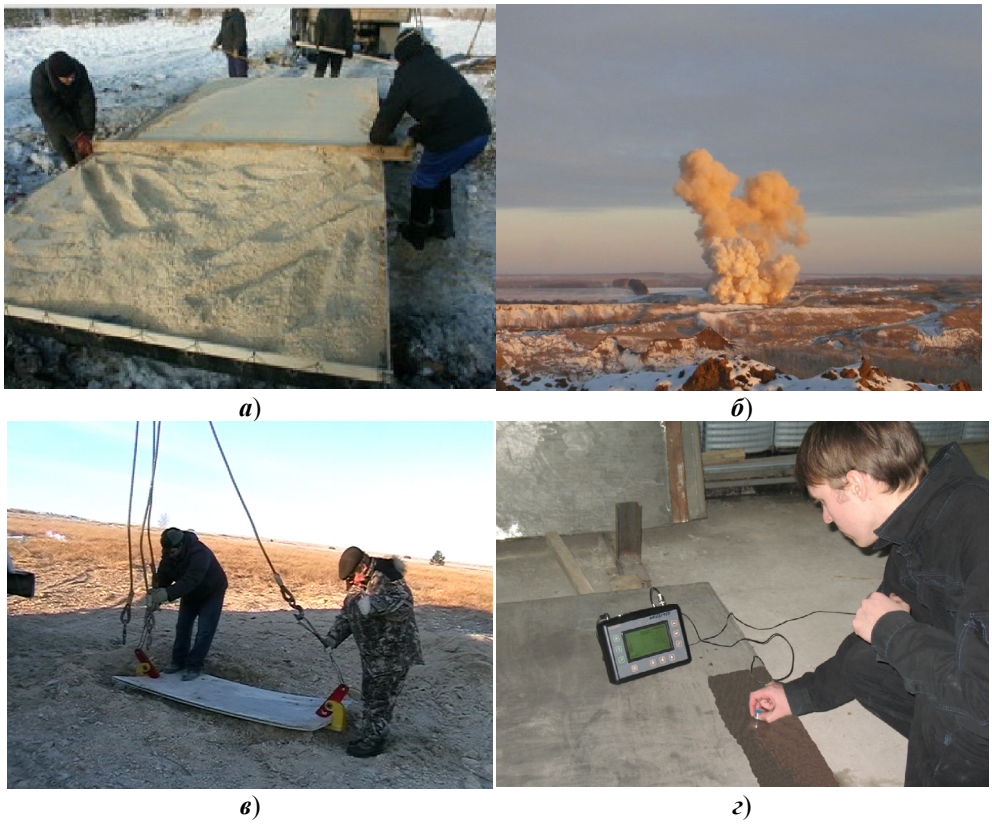
б)

Рис. 3. Результаты 2*D*-моделирования в *LS-DYNA* сварки взрывом многослойного трехслойного материала при начальном времени (***а***) и через 40 мкс после начала детонации взрывчатого вещества (***б***)

3. Сертификация многослойных материалов с «протекторной питтинг-защитой»

С целью продвижения многослойных материалов на рынке металлопродукции выполнена независимая оценка свойств и сертификация. Разработанные методики испытаний вошли в состав технических условий на листо-

вые многослойные материалы и явились основой программы коррозионных испытаний при реализации процедур сертификации.



а) ***б***)

в) ***г***)

Рис. 4. Работа на открытом полигоне и контроль многослойных материалов:
а – подготовка к сварке пакета; ***б*** – взрывные работы; ***в*** – погрузка заготовки на транспорт; ***г*** – ультразвуковой контроль

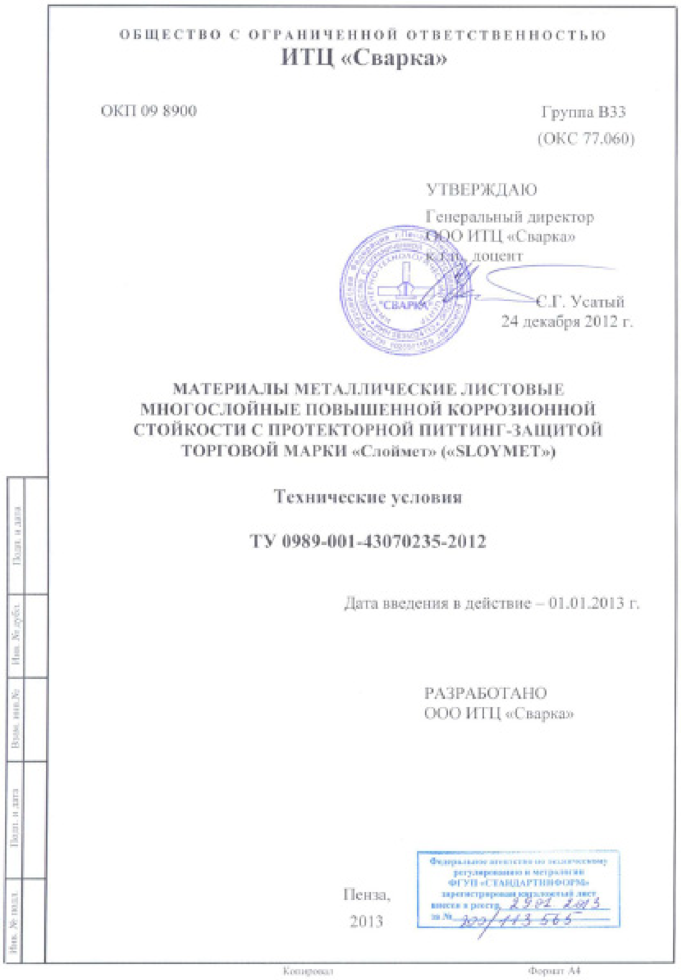
В 2012 г. были разработаны и утверждены технические условия ТУ 0989-001-43070235–2012 «Материалы металлические листовые многослойные повышенной коррозионной стойкости с протекторной питтинг-защитой торговой марки «Слоймет» («*SLOYMET*»)» (рис. 5).

В 2013 г. в ООО «СЕРТИФ-ТЕСТ» РОСС RU.АВ67.Н02493 на материалы металлические листовые многослойные повышенной коррозионной стойкости с протекторной питтинг-защитой торговой марки «Слоймет» («S*LOYMET*») был получен сертификат соответствия № 0821527 (рис. 6). Процедура сертификации производилась Центром сертификации «*TestTime*» (г. Москва).

В соответствии с общероссийским классификатором продукции созданный материал может быть отнесен к 18 классам, включая прокат черных металлов, металлоизделия промышленного назначения.

В соответствии с ТУ созданный материал предназначен для изготовления баков, емкостей, бочек, баллонов, резервуаров, цистерн, сосудов, включая сосуды и резервуары атомных энергетических установок, аппаратов, технологического оборудования и трубопроводов, корпусов и элементов котлов,

реакторов, турбин, насосов для агрессивных жидкостей и газов, кожухов печей и нагревательных камер, элементов теплообменного и рекуперационного оборудования, подводных частей обшивки речных и морских судов, конструкционных элементов бурового оборудования и буровых платформ и других изделий, эксплуатируемых в условиях агрессивных сред, в том числе при повышенной температуре.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ИТЦ «Сварка»

ОКП 09 8900

Группа В33
(ОКС 77.060)

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО ИТЦ «Сварка»
к.т.н., доцент
С.Г. Усатый
24 декабря 2012 г.

МАТЕРИАЛЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЛИСТОВЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ С ПРОТЕКТОРНОЙ ПИТТИНГ-ЗАЩИТОЙ ТОРГОВОЙ МАРКИ «Слоймет» («SLOYMET»)

Технические условия

ТУ 0989-001-43070235-2012

Дата введения в действие – 01.01.2013 г.

РАЗРАБОТАНО
ООО ИТЦ «Сварка»

Пенза,
2013

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»

Формат А4

Рис. 5. Документация на многослойные материалы: титульный лист технических условий

В технических условиях учтены требования и рекомендации российских и зарубежных стандартов в части обеспечения свойств и качества металлических материалов.

Технические условия содержат основные термины и определения, вводную часть, технические требования, требования безопасности, требования охраны окружающей среды, правила приемки, методы контроля и испытаний, маркировку, упаковку, транспортирование и хранение, указания по применению, гарантии изготовителя.

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

Добровольная сертификация

СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ РОСС RU.AB67.H02493

Срок действия с 05.02.2013 по 04.02.2016

№ 0821527

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ рег. № РОСС RU.0001.11AB67.
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "СЕРТИФ-ТЕСТ".
121351, г. Москва, ул. Ярцевская, д. 20, корп. 1, тел. (499) 346-37-15, E-mail info@sertif-test.ru.

ПРОДУКЦИЯ Материалы металлические листовые многослойные повышенной коррозионной стойкости с протекторной питтинг-защитой т.м. «СЛОЙМЕТ» («SLOYMET»).
ТУ 0989-001-43070235-2012.
Серийный выпуск.

код ОК 005 (ОКП): 09 8900

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ
ТУ 0989-001-43070235-2012

код ТН ВЭД России:

ИЗГОТОВИТЕЛЬ ООО ИТЦ «Сварка»
ОКПО 43070235.
Адрес: 440026, Пензенская область, г. Пенза, ул. Красная д.40, к.1.
Телефон +7 (8412) 900 471.

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН ООО ИТЦ «Сварка»
ОКПО 43070235.
Адрес: 440026, Пензенская область, г. Пенза, ул. Красная д.40, к.1.
Телефон +7 (8412) 900 471.

НА ОСНОВАНИИ
Протокола сертификационных испытаний № 004-02/18 от 04.02.2013 г. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ "УЭС-КАЛИНИНГРАД" ООО "УЭС-КАЛИНИНГРАД", рег. № РОСС RU.0001.21AB65 от 13.07.2011 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ
Инспекционный контроль: февраль 2014 г., февраль 2015 г.
Схема сертификации: 3.

Для сертификатов

Руководитель органа _____ В. Бозкурт
подпись инициалы, фамилия

Эксперт _____ А.В. Буздалина
подпись инициалы, фамилия

Сертификат не применяется при обязательной сертификации

Рис. 6. Документация на многослойные материалы: сертификат соответствия

Примеры записи маркировки многослойных металлических материалов повышенной коррозионной стойкости в документах или при заказе:

1) пример условного обозначения листа из многослойного металлического материала повышенной коррозионной стойкости с протекторной питтинг-защитой с тремя слоями, общей толщиной 8,0 мм, шириной 1500 мм и длиной 6000 мм, с рабочим слоем из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т толщиной 2,0 мм, с протекторным слоем из стали марки Ст2кп толщиной 4,0 мм и облицовочным слоем из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т толщиной 2,0 мм, 1-го класса сплошности сцепления слоев по ГОСТ 22727–88:

$$\text{Лист Мнсл}\ \frac{8(2+4+2)\times 1500\times 6000}{(12\text{Х18Н10Т}+\text{Ст2кп}+12\text{Х18Н10Т})-\text{кл.1}},$$

ТУ 0989-001-43070235–12;

2) пример условного обозначения листа из многослойного металлического материала повышенной коррозионной стойкости с протекторной питтинг-защитой с четырьмя слоями, общей толщиной 30,0 мм, шириной 1250 мм и длиной 3500 мм, с рабочим слоем из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т толщиной 3,0 мм, с протекторным слоем из стали марки Ст2кп толщиной 4,0 мм, разделительным слоем из коррозионностойкой стали марки 12Х18Н10Т толщиной 3,0 мм и несущим слоем из стали марки 09Г2С толщиной 20,0 мм, 1-го класса сплошности сцепления слоев по ГОСТ 22727-88:

$$\text{Лист Мнсл}\ \frac{30(3+4+3+20)\times 1250\times 3500}{(12\text{Х18Н10Т}+\text{Ст2кп}+12\text{Х18Н10Т}+09\text{Г2С})},$$

ТУ 0989-001-43070235–12.

Заключение

Многослойный металлический материал с «протекторной питтинг-защитой» – это совершенно новый продукт на рынке. Прямых аналогов его не существует. Основные области его применения – химическая, нефтегазовая промышленность, атомная энергетика. При этом получаемый многослойный материал по эксплуатационным показателям находится в одном сегменте с танталом и платиной, а в ценовом сегменте – на уровне традиционных хромоникелевых нержавеющих сталей.

Разработчики имеют возможность производить до 10 тыс. $м^2$ данного материала в год. Из созданного материала в 2013 г. был изготовлен опытный образец реактора, работающего по принципу сверхкритического водного окисления, активно использующий ионы галогенов. В настоящее время он проходит ресурсные испытания в условиях воздействия окислительной водной среды при температуре до 650 °С и давлении до 40 МПа.

Ведутся переговоры с Госкорпорацией «Росатом» по проектированию, реконструкции и изготовлению из многослойного материала хранилищ для ЖРО. Данный проект поддержан Инновационным центром Сколково (Московская обл.), обеспечивающим грантовую поддержку данному проекту.

Список литературы

1. **Каблов, Е. Н.** Коррозия или жизнь / Е. Н. Каблов // Наука и жизнь. – 2012. – № 11. – С. 16–21.
2. **Ивановский, В. Н.** Теоретические основы процесса коррозии нефтепромыслового оборудования / В. Н. Ивановский // Инженерная практика. – 2010. – № 6. – С. 4–14. – URL: http://glavteh.ru/files/InPraktika_6_2010-2_Ivanovsky.pdf/. (Загл. с экрана).
3. Новый справочник химика и технолога : справочник : в 7 т. / под общ. ред. Б. П. Никольского. – Изд. перераб. и доп. – СПб. : Профессионал, 2009.
4. **Щукин, А. Б.** Некоторые вопросы по реализации ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» / А. Б. Щукин // Электрон. дан. – URL: http://www.rosatom.ru/nuclearindustry/russainnuclearindustry/ (Загл. с экрана).
5. Промышленная экология : учеб. пособие / под ред. В. А. Грачева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : МарТ ; Ростов-на-Дону : МарТ, 2007. – 555 с.
6. **Розенфельд, И. Л.** Коррозия и защита металлов / И. Л. Розенфельд. – М. : Металлургия, 1970. – 448 с.

7. **Перелыгин, Ю. П.** Новый коррозионно-стойкий многослойный материал / Ю. П. Перелыгин, А. Е. Розен, И. С. Лось, С. Ю. Киреев // Коррозия: материалы, защита. – № 5. – 2013. – С. 7–10.
8. **Лось, И. С.** Многослойные коррозионно-стойкие материалы : моногр. / И. С. Лось, Ю. П. Перелыгин, А. Е. Розен, С. Ю. Киреев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 112 с.
9. **Лось, И. С.** Вопросы исследования коррозионной стойкости многослойных материалов, полученных сваркой взрывом / И. С. Лось, Ю. П. Перелыгин, А. Е. Розен, И. Л. Харина // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 6–7. – С. 7–10.
10. **Киреев, С. Ю.** Исследования коррозионно-электрохимических свойств многослойного материала, полученного сваркой взрывом / С. Ю. Киреев, И. С. Лось, Ю. П. Перелыгин, А. Е. Розен // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 104–111.
11. Международная заявка на патент 2010/036139 Российская Федерация. МПК6 C23F13/00; B32B7/02. Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости и способ его получения / Розен А. Е., Лось И. С., Перелыгин Ю. П. и др. ; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-технический центр «Инвестпатент». – № 2008/000620 ; заявл. 26.09.2008 ; опубл. 01.04.2010. – 44 с.
12. Евразийский патент № 016878 ЕАПВ. Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения, C23F 13/06 B 32B 7/02 / Розен А. Е., Лось И. С., Перелыгин Ю. П. и др. – Выдан 30.06.2012, приоритет от 26.09.2008.
13. Патент Украины № 100188. Багатошаровий матеріал корозійноїстійкості (варіанти) і способи його отримання / Розен А. Е., Лось И. С., Перелыгин Ю. П. и др. – Выдан 26.11.2012, приоритет от 26.09.2008.
14. Patent № 10-1300674 KIPO Multilayer material with enhanced corrosion resistance (variants) and methods for preparing same. Reg. date: 2013-08-21, Filing date: 2011-04-11.
15. Deformation of long-length exploclad sheets: mathematical modeling / A. Yu. Muizemnek, I. V. Denisov, O. L. Pervukhina, A. E. Rozen, I. S. Los, Yu. A. Gordopolov // Explosive Production of New Material: Science, Technology, Business, and Innovations / ed. by A. A. Deribas and Yu. B. Scheck. – Moscow : TORUS PRESS Ltd., 2010. – P. 45.

References

1. Kablov E. N. *Nauka i zhizn'* [Science and life]. 2012, no. 11, pp. 16–21.
2. Ivanovskiy V. N. *Inzhenernaya praktika* [Engineering practice]. 2010, no. 6, pp. 4–14. Available at: http://glavteh.ru/files/InPraktika_6_2010-2_Ivanovsky.pdf/.
3. *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa: spravochnik: v 7 t*. [New reference book for chemists and technologists: in 7 volumes]. Ed. by B. P. Nikol'skiy. Saint Petersburg: Professional, 2009.
4. Shchukin A. B. *Nekotorye voprosy po realizatsii FTsP «Obespechenie yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti na 2008 god i na period do 2015 goda»* [Some problems of realization of the Federal target program “Ensuring nuclear and radiation safety in 2008 and for the period up to 2015”]. URL:http://www.rosatom.ru/nuclearindustry/ russainnuclearindustry/ (Zagl. s ekrana).
5. *Promyshlennaya ekologiya: ucheb. posobie* [Industrial ecology: tutorial]. Ed. by V. A. Grachev. Moscow: MarT; Rostov-on-Don: MarT, 2007, 555 p.
6. Rozenfel'd I. L. *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and protection of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 448 p.
7. Perelygin Yu. P., Rozen A. E., Los' I. S., Kireev S. Yu. *Korroziya: materialy, zashchita*. [Corrosion: materials, protection]. 2013, no. 5, pp. 7–10.
8. Los' I. S., Perelygin Yu. P., Rozen A. E., Kireev S. Yu. *Mnogosloynye korrozionnostoykie materialy: monogr.* [Multilayer corrosion-resistant materials: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2013, 112 p.

9. Los' I. S., Perelygin Yu. P., Rozen A. E., Kharina I. L. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering]. 2013, no. 6–7, pp. 7–10.
10. Kireev S. Yu., Los' I. S., Perelygin Yu. P., Rozen A. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 104–111.
11. International application for patent 2010/036139 Russian Federation MPK6 C23F13/00; V32V7/02. Multilayer material of enhanced corrosion resistance and production method thereof. Rozen A. E., Los' I. S., Perelygin Yu. P. et al.; applicant and patentee Scientific technical center "Investpatent" ltd. No. 2008/000620; appl. 2008-09-26; publ. 2010-04-01, 44 p.
12. Euroasian patent No. 016878 EAPV C23F 13/06; B 32B 7/02 Multilayer material of enhanced corrosion resistance (variants) and production methods thereof. Rozen A. E., Los' I. S., Perelygin Yu. P. et al. 2008-09-26.
13. Patent Ukrainian № 100188. Multilayer material of enhanced corrosion resistance (variants) and production methods thereof. Rozen A. E., Los' I. S., Perelygin Yu. P. et al. 2008-09-26.
14. Patent No. 10-1300674 KIPO *Multilayer material with enhanced corrosion resistance (variants) and methods for preparing same*. Reg. date: 2013-08-21, Filing date: 2011-04-11.
15. Muizemnek A. Yu., Denisov I. V., Pervukhina O. L., Rozen A. E., Los I. S., Gordopolov Yu. A. *Explosive Production of New Material: Science, Technology, Business, and Innovations*. Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2010, p. 45.

Лось Ирина Сергеевна
кандидат технических наук, доцент, кафедра сварочного, литейного производства и материаловедения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: silverelk@yandex.ru

Los' Irina Sergeevna
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of welding, foundry production and materials science, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Розен Андрей Евгеньевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного, литейного производства и материаловедения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aerozen@bk.ru

Rozen Andrey Evgenyevich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of welding, foundry production and materials science, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Первухин Леонид Борисович
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина» (Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2)

E-mail: bitrub@mail.ru

Pervukhin Leonid Borisovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of laboratory, Central research institute of ferrous metallurgy named after I. P. Bardina (building 2, 23/9 Radio street, Moscow, Russia)

Перелыгин Юрий Петрович
доктор технических наук, профессор, декан естественно-научного факультета, Пензенский педагогический институт имени В. Г. Белинского, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: pyp@pnzgu.ru

Perelygin Yuriy Petrovich
Doctor of engineering sciences, professor, dean of the faculty of natural sciences, Penza Pedagogical Institute named after V. G. Belinsky, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Усатый Сергей Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент, кафедра сварочного, литейного производства и материаловедения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nata2@sura.ru

Usatyy Sergey Gennad'evich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of welding, foundry production and materials science, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Крюков Дмитрий Борисович
кандидат технических наук, доцент, кафедра сварочного, литейного производства и материаловедения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kryukow@yahoo.com

Kryukov Dmitriy Borisovich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of welding, foundry production and materials science, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

E-mail: baron.cx@MAIL.RU

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

УДК 620.197 +621.791.13

Опыт разработки и сертификации многослойных коррозионно-стойких материалов с «протекторной питтинг-защитой» / И. С. Лось, А. Е. Розен, Л. Б. Первухин, Ю. П. Перелыгин, С. Г. Усатый, Д. Б. Крюков, А. А. Розен // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 117–130.

УДК 621.715.4

А. Н. Дудченко, Е. И. Колоколов, П. Д. Кравченко

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОПРАВКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является оправка для изготовления стальных высокоточных тонкостенных цилиндрических оболочек. Предметом исследования является процесс обоснования необходимых условий обеспечения качества конструктивно-технологической подготовки и изготовления оболочек. Целью работы является конструктивно-технологическая оптимизация всех основных элементов конструкции оправки для изготовления высокоточных стальных тонкостенных цилиндрических оболочек.

Материалы и методы. Процесс конструктивно-технологической оптимизации всех основных элементов оправки для изготовления высокоточных тонкостенных цилиндрических оболочек обоснован с применением теории упругости и общей теории оболочек.

Результаты. Обоснована доказательная модель конструктивно-технологической оптимизации стальной тонкостенной цилиндрической оправки с представлением практических примеров для использования их в производстве оправок различных размеров.

Выводы. Представленный процесс конструктивно-технологической оптимизации тонкостенных стальных цилиндрических оправок с использованием теории упругости и общей теории оболочек и практических примеров поиска конструктивных элементов оправок показал рациональный путь создания новых сложных элементов техники при достижении экономической эффективности их создания.

Ключевые слова: оптимизация, жесткая цилиндрическая оболочка.

A. N. Dudchenko, E. I. Kolokolov, P. D. Kravchenko

CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL OPTIMIZATION OF A MANDREL FOR MANUFACTURING HIGH-PRECISION CYLINDRICAL SHELLS

Abstract.

Background. The research object is a mandrel for manufacturing high-precision thin-walled cylinfrical shells. The research subject is the process of substantiation of the necessary conditions for quality ensurance in constructive-technological preparation and production of shells. The aim of the work is constructive-technological optimization of all primary elements of the mandrel construction for manufacturing high-precision thin-walled cylindrical shells.

Materials and methods. The process of constructive-technological optimization of all primary elements of a mandrel for manufacturing high-precision thin-walled cylindrical shells was substantiated using the theory of elasticity and the general theory of shells.

Results. The authors substantiated a demonstrative model of constructive-technological optimization of a steel thin-walled cylindrical mandrel introducing practical examples of application thereof in production of madrels of various sizes.

Conclusions. The presented process of constructive-technological optimization of thin-walled steel cylindrical mandrels using the theory of elasticity and the gen-

eral theory of shells and practical examples of searching of constructive elements of madrels showed a rational way of creation of new complex technological elements , as well as reaching economic efficiency of manufacturing thereof.

Key words: optimization, rigid cylindrical shell.

Введение

К цилиндрическим оболочкам, работающим в различных режимах нагружения, предъявляются высокие требования по геометрическим параметрам и прежде всего по отклонениям цилиндрической поверхности от идеальной формы. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что нижнее критическое напряжение, весьма чувствительное к начальным несовершенствам, для сжатой в радиальном или меридиональном направлениях оболочки в 3 раза меньше верхнего критического напряжения, вычисленного теоретически для идеальной оболочки, не имеющей начальной погиби. Указанная проблема особенно актуальна для подводных, летательных и космических аппаратов, сочетающих в себе высокую надежность и низкую материалоемкость.

1. Конструктивная схема

Для изготовления высокоточных композитных цилиндрических оболочек используется оправка, конструктивно-эскизная схема которой показана на рис. 1.

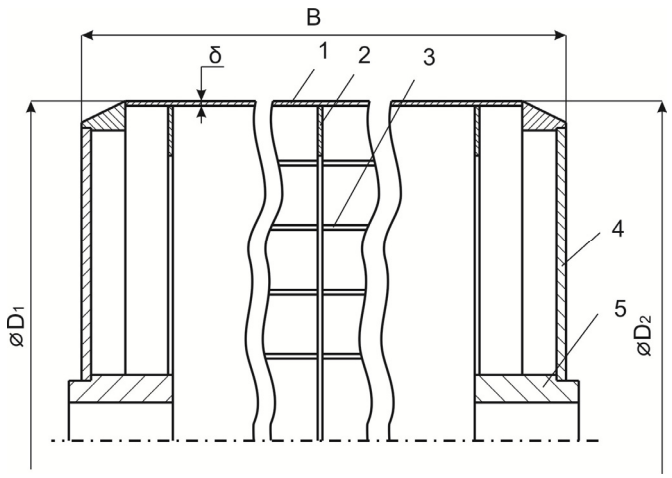


Рис. 1. Конструктивная эскизная схема тонкостенной оправки: D_1, D_2 – наружные диаметры; $D_2 = D_1 - 2$ мм ; δ – толщина стенки; *1* – цилиндрическая оправка; *2* – ребро шпангоута; *3* – ребро стрингерное; *4* – ребро торцевое; *5* – втулка

Оправка представляет собой слегка коническую тонкостенную оболочку с полированной поверхностью, подкрепленную поперечными кольцами жесткости (шпангоутами) и продольными ребрами жесткости (стрингерами). В рабочем режиме оправка, поддерживаемая опорной и приводной цапфами, вращается с малой угловой скоростью относительно продольной оси. Конусность обеспечивает сдвиг с поверхности оправки подложки с намотанной основой композитной оболочки.

2. Определение необходимых допущений

Для определения начальных несовершенств композитной оболочки, связанных с деформациями оправки, найдем перемещения для следующей расчетной схемы. С учетом малой конусности оправки принимаем ее тонкостенной цилиндрической оболочкой, усиленной ребрами жесткости, имеющими регулярную структуру в окружном и меридиональном направлениях. Данную ребристую оболочку заменяем ортотропной оболочкой, имеющей различную толщину в поперечном и продольном сечениях. Внешней нагрузкой, искажающей геометрию оправки, служит собственный вес обечайки и цапф. Расчет таких оболочек на нагрузки, не обладающих осевой симметрией, ведут на основе гипотез технической (полубезмоментной) теории, разработанной В. З. Власовым [1, 2]. В ней не учитываются крутящие и продольные изгибающие моменты, сдвиг и растяжение–сжатие в кольцевом направлении.

Согласно технической теории напряженное и деформируемое состояния раскладываются на два слагаемых [3]:

1) элементарное напряженно-деформированное состояние пустотелой балки, которая является основной статически неопределимой системой, раскрываемой известными методами сопротивления материалов;

2) дополнительное напряженно-деформированное состояние статически неопределимой оболочки, характеризующее в сочетании с первым состоянием действительную работу конструкции.

Усилия, напряжения и перемещения в пустотелой балке определяются по формулам сопротивления материалов

$$Q_0 = \sum y(F_{\text{атс}});\ M_0 = \sum m_{0j}(F_{\text{атс}});$$

$$\sigma_0 = \frac{M_0}{\pi R^2 \delta}\cos\beta;\ \tau_0 = \frac{Q_0}{\pi R \delta}\sin\beta;\ V_0 = \sum \int_e \frac{\overline{M}_0 M_{F_1 0}}{EI} dz,$$

где δ – толщина пустотелой балки в поперечном сечении; I – осевой момент инерции поперечного сечения; β – центральный угол, отсчитываемый от вертикальной оси; δ_0, τ_0, V_0 – нормальные и касательные напряжения и прогиб в сечении балки, расположенном между кольцами жесткости.

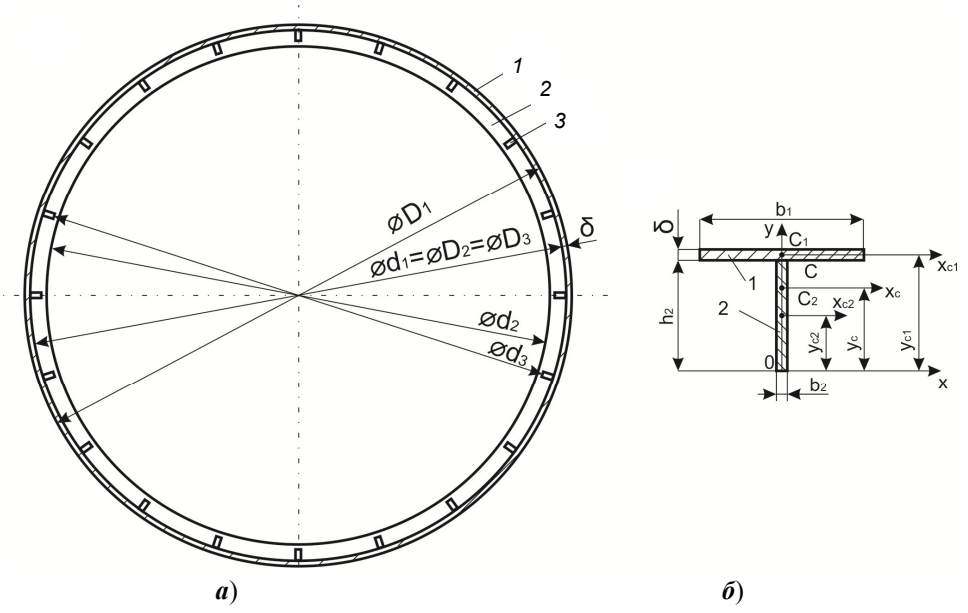
Усилия, напряжения и перемещения в окружном направлении оболочки находятся, как в кольце от заданной нагрузки, уравновешенной поверхностными касательными силами:

$$t = \frac{P}{\pi R}\sin\beta,$$

где P – равнодействующая внешней нагрузки на оболочку в рассматриваемом сечении (Н/м).

3. Определение геометрических характеристик пустотелой балки, ортотропной оболочки и цапф

На рис. 2 показаны поперечные сечения и фрагмент продольного сечения по длине отсека.



а) ***б***)

Рис. 2. Поперечное и продольное сечения оболочки: ***а*** – поперечное сечение; ***б*** – фрагмент продольного сечения; *1* – обечайка; *2* – шпангоут; *3* – стрингер

Площадь сечения продольного ребра с присоединенной частью обечайки равна

$$A = b_3 h_3 + a_s \delta ,$$

где $a_s = \dfrac{\pi D_{3,cp}}{n}$ – длина дуги между ребрами жесткости; n – число стрингеров.

Приведенная толщина ортотропной оболочки в поперечном сечении равна

$$t_z = \frac{A}{a_s}.$$

Координаты центра тяжести продольного сечения

$$y_c = \frac{\delta b_1 (h_2 + \delta / 2) + b_2 h_2^2 / 2}{\delta b_1 + b_2 h_2}.$$

Центральный момент инерции

$$I_{xc} = \delta b_1 (h_2 + \delta / 2 - y_c)^2 + b_2 h_2^3 / 12 + b_2 h_2 (h_2 / 2 - y_c)^2 .$$

Приведенная толщина ортотропной оболочки в продольном сечении

$$t_s = \sqrt[3]{12 I_{\text{кс}} / a_z} ,$$

где a_z – расстояние между кольцевыми ребрами жесткости.

Полярный момент инерции пустотелой балки с учетом продольных ребер (стрингеров)

$$I_p = \frac{\pi\delta D_{1,cp}^3}{4} + nb_3h_3(D_3/2 - h_3/2)^2 .$$

Осевой момент инерции пустотелой балки $I = I_p/2$.

Момент инерции поперечного сечения цапф находим, принимая средневзвешенный диаметр опорной и приводной цапф из условия равенства весов реальных цапф переменного сечения и условного цилиндра:

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{2(Q_{\text{оп}} + Q_{\text{пр}})}{l\pi\gamma}};\ I_{\text{ц}} = \pi D_{\text{ц}}^4/64,$$

где $Q_{\text{оп}}, Q_{\text{пр}}$ – вес опорный и приводной цапф; γ – удельный вес стали; l – длина цапфы.

4. Определение балочных деформаций (прогиб) оправки

На рис. 3,***а*** изображена расчетная схема балки, нагруженной собственным весом цапф q_1 и оправки q_2. На рис. 3,***б*** показана эпюра прогибов, из которой видно, что деформация происходит в основном на участках расположения цапф, а ось обечайки остается практически прямолинейной (стрела прогиба параболы *4* степени составляет всего 0,016 мм). Таким образом, балочные деформации не вносят существенных искажений в геометрию цилиндрической поверхности оправки.

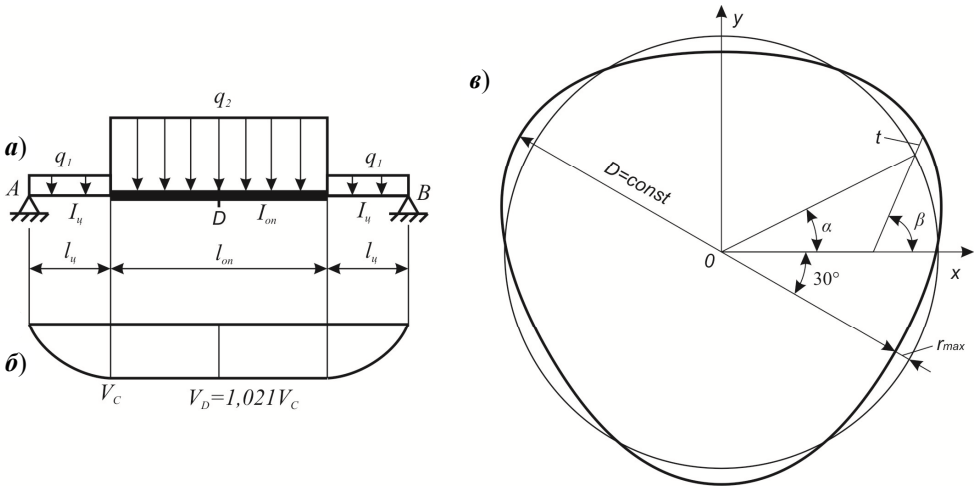


Рис. 3. Балочные деформации оправки:
а – расчетная схема; ***б*** – эпюра прогибов; ***в*** – искажение

5. Искажения формы сечения, вызванные изгибом

Решение задачи о чистом изгибе балки методами теории упругости рассмотрено ранее [4]. Получены формулы для прогибов и горизонтальных перемещений точек поперечного сечения

$$V = \frac{1}{2\rho}\left[z^2 + \mu(x^2 - y^2) \right];\ U = \frac{\mu}{\rho} xy\ ,$$

где ρ – радиус кривизны нейтральной плоскости: *x*, *y*, *z* – координаты точки сечения; μ – коэффициент Пуассона.

В среднем сечении оболочки ($M = M_{\max}; Q = 0$) наблюдается чистый изгиб. Располагая здесь начало координат, для кольца радиуса *R* получаем (рис. 3,***в***):

$$z = 0; z = R\cos\alpha; y = R\sin\alpha\ .$$

Горизонтальное перемещение произвольной точки сечения:

$$U = \frac{\mu R^2}{2\rho}\sin 2\alpha\ .$$

Вертикальное перемещение произвольной точки сечения:

$$V = \frac{\mu R^2}{2\rho}\cos 2\alpha\ .$$

Полное перемещение произвольной точки сечения:

$$t = \sqrt{U^2 + V^2} = \pm\frac{\mu R^2}{2\rho} = \text{const};$$

$$\cos\beta = \cos(u\hat{,}t) = \frac{u}{t} = \pm\sin 2\alpha\ .$$

Радиальное перемещение произвольной точки сечения:

$$r = t\cos(\beta - \alpha) = \pm\frac{\mu R^2}{2\rho}\cos[\arccos(\sin 2\alpha) - \alpha]\ .$$

Наибольшее радиальное перемещение находим из условия

$$\frac{dr}{d\alpha} = 0;\ \ \alpha_0 = \frac{\pi}{6}(2n \pm 1)\ ,\ n = 0,1...;$$

$$r_{\max} = t = \pm\frac{\mu R^2}{2\rho} = \pm\frac{\mu R^2 M}{2EI}\ .$$

Сечение обечайки принимает яйцевидную форму при неизменном расстоянии между двумя диаметрально расположенными точками. При заданных технических параметрах оправки получаем амплитуды вмятин цилиндрической поверхности порядка 0,002 мм, что составляет 4 % от изменения радиуса, вызванного конусностью оболочки.

6. Деформации ортотропной оболочки в поперечном сечении

На рис. 4.***а*** показано кольцо единичной ширины по срединной линии, выделенное из ортотропной оболочки двумя поперечными сечениями и нахо-

дящееся в равновесии под действием интенсивности собственного веса q и касательных реактивных сил t со стороны собственных частей: $t = 2q\sin\alpha$.

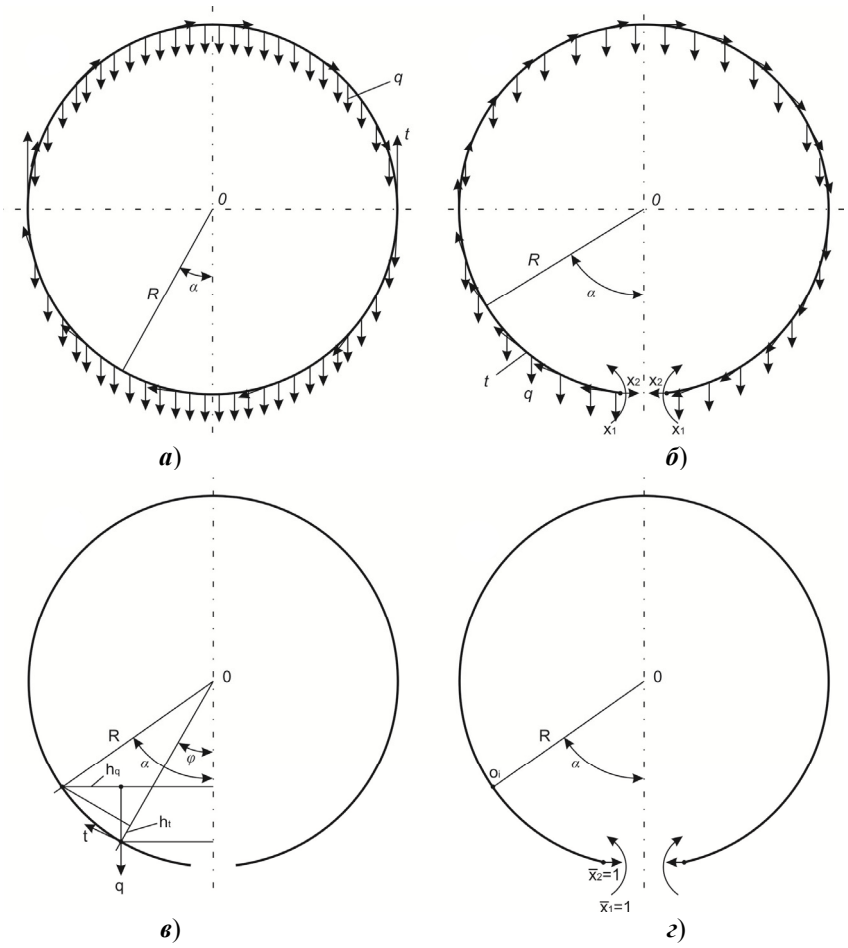


Рис. 4. Кольцо ортотропной оболочки: ***а*** – исходная схема; ***б*** – эквивалентная система; ***в*** – грузовое состояние основной системы; ***г*** – единичные состояния основной системы

Определим изменение диаметра в вертикальной и горизонтальной плоскостях, вызванные действием указанных нагрузок. Кольцо, как замкнутый контур, в общем случае 3 раза статически неопределимо. На рис. 4,***б*** показана симметричная эквивалентная система метода сил с двумя лишними неизвестными x_1 и x_2.

Для определения податливостей основной системы δ_{ij} и перемещений Δ_{iF} рассмотрим грузовое единичное состояние основной системы (рис. 4,***в***,***г***). Вычислим изгибающие моменты в произвольном сечении:

$$M_F = -\int_0^{\alpha} (qh_q + th_t)ds =$$

$$= -qR^2 \int_0^{\alpha} [\sin\alpha - \sin\varphi + 2\sin\alpha(1-\cos(\alpha-\varphi))]d\varphi = -qR^2(1-\cos\alpha);$$

$$\overline{M}_1 = 1; \overline{M}_2 = R(1-\cos\alpha).$$

Коэффициенты канонических уравнений методом сил:

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI}\int_0^{\pi} \overline{M}_1^2 ds = \frac{\pi R}{EI}; \delta_{22} = \frac{1}{EI}\int_0^{\pi} \overline{M}_2^2 ds = \frac{3\pi R^3}{2EI};$$

$$\delta_{12} = \frac{1}{EI}\int_0^{\pi} \overline{M}_1 \overline{M}_2 ds = \frac{\pi R^2}{EI};$$

$$\Delta_{1F} = \frac{1}{EI}\int_0^{\pi} \overline{M}_1 \overline{M}_F ds = -\frac{\pi q R^3}{EI}; \Delta_{2F} = \frac{1}{EI}\int_0^{\pi} \overline{M}_2 \overline{M}_F ds = -\frac{3\pi q R^4}{2EI}.$$

Система уравнений относительно лишних неизвестных

$$\frac{\pi R}{EI}x_1 + \frac{\pi R^2}{EI}x_2 - \frac{\pi q R^3}{EI} = 0;$$

$$\frac{\pi R^2}{EI}x_1 + \frac{3\pi R^3}{2EI}x_2 - \frac{3\pi q R^4}{2EI} = 0$$

имеет решение $x_1 = 0; x_2 = qR$.

Суммарный изгибающий момент в произвольном сечении:

$$M = \overline{M}_1 x_1 + \overline{M}_2 x_2 + M_F \equiv 0.$$

Таким образом, исходное кольцо под действием собственного распределенного веса и касательных реактивных сил не испытывает деформаций изгиба. Следовательно, кольцо и ортотроная оболочка не будут изменять своей формы и размеров. Диаметральное сближение любых двух точек оболочки:

$$\Delta = \int_0^{2\pi} \frac{\overline{M}M}{EI} ds = \int_0^{2\pi} \frac{\overline{M}0}{EI} ds \equiv 0.$$

Общая деформация оправки будет совпадать с балочными деформациями: в статистическом состоянии исходная идеальная цилиндрическая поверхность превращается в торообразную поверхность яйцевидного поперечного сечения с выпуклостями и впадинами. При вращении будут пробегать волны деформации в окружном и меридиональном направлениях.

7. Оптимизация формы сечения и числа колец жесткости

Из полученных выше результатов анализа деформированного состояния оправки следует, что отпадает необходимость постановки шпангоутов и

стрингеров. Экономичнее незначительно увеличить толщину обечайки и ограничиться торцевыми кольцами жесткости с втулками для цапф. При этом исчезнет необходимость борьбы с остаточными температурными напряжениями от сварки, сильно изменяющими исходную форму обечайки.

Полагая, что кольца жесткости спроектированы из иных соображений, чем ограничения деформаций, решим следующую задачу: оптимизируем форму поперечного сечения колец и их число, исходя из эквивалентности толщины ортотропной оболочки в продольном сечении при различных сечений шпангоутов. В данном случае предполагается не столько оптимальная по весу, сколько конструктивно-технологическая оптимизация путем замены колец, изготовляемых из листа стали 4×4 м, на гнутые кольца из прокатных профилей, что является более рациональным.

Прототип оправки имеет пролет отсека $a_z = 333$ м и ребра прямоугольного сечения 209×18 мм. Найдем эквивалентные сечения из парных уголков, парных швеллеров и одиночных двутавров (рис. 5) при различном числе кольцевых ребер.

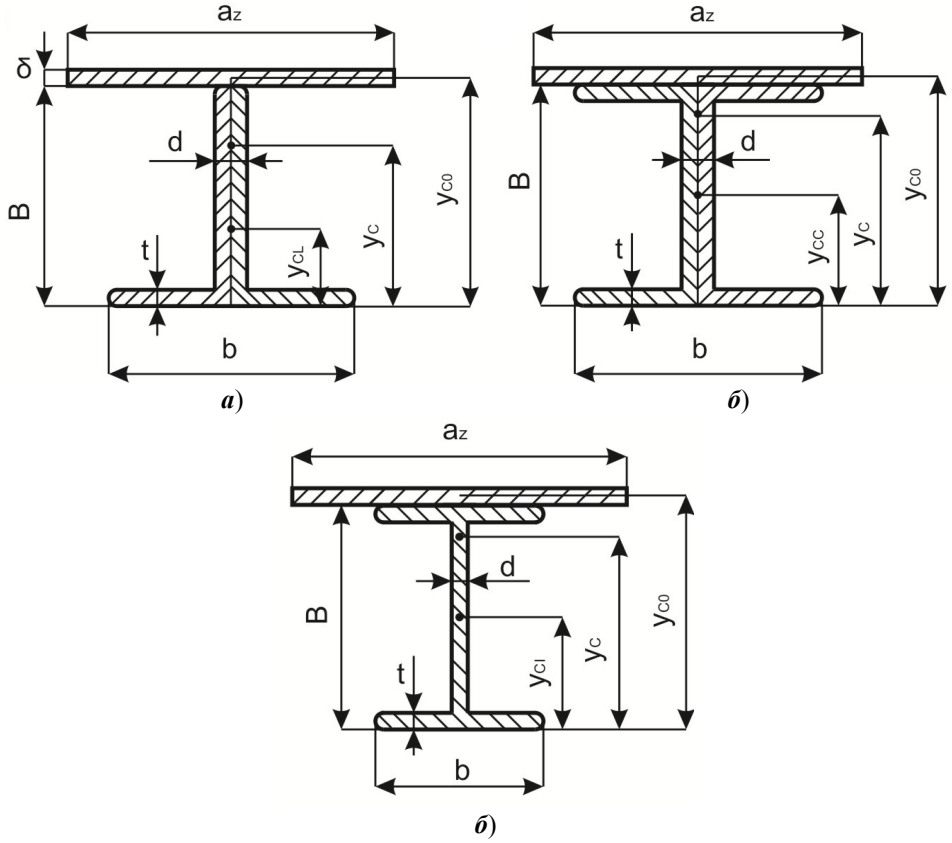


Рис. 5. Шпангоуты из гнутых профилей:
а – два уголка; ***б*** – два швеллера; ***в*** – двутавр

Учитывая, что необходимо получить целочисленное решение как по числу колец *n*, так и по номеру прокатного профиля (N_L^0, N_C^0, N_I^0), задачу

решим методом подбора. За основное неизвестное принимаем число ребер на одной секции оправки длиной 2 м. В табл. 1 приведены результаты расчетов.

Таблица 1

Оптимизация ребер жесткости

Параметры		NN фигур	Размер, мм				Геометрические характеристики, мм			
n	a_z, мм^2		B	b	d	t	$A_\Phi \cdot 10^{-3}$	$I_{x,\Phi} \cdot 10^{-6}$	$I_{xc} \cdot 10^{-6}$	t_s
3	560	2LN16/10	160	200	24	12	6,00	15,6	63	111
		2CN20	200	152	10,4	9	4,68	30,4	66	112
		IN24	240	115	5,6	9,5	3,48	27,9	76	117
4	420	2LN16/10	160	200	18	9	4,56	12,1	49	112
		2CN18a	180	148	10,2	9,3	4,44	23,8	50	112
		IN22	220	110	5,4	8,7	3,06	25,5	55	116
5	336	2LN16/10	160	200	18	9	4,56	12,1	48	120
		2CN18	180	140	10,2	8,7	4,14	21,8	44	116
		IN20	200	100	5,2	8,4	2,68	18,4	39	111

Заключение

Сравнительный анализ таблицы показывает, что наиболее экономичными являются гнутые кольца из прокатных двутавров при числе ребер $n = 3$. По отношению к кольцам прямоугольного сечения экономия по весу нетто составляет 45 % и в десятки раз больше по весу заготовки.

Список литературы

1. **Власов, В. З.** Общая теория оболочек / В. З. Власов. – М. : ГИТТЛ, 1949. – 784 с.
2. **Иммерман, А. Г.** Расчет ортотропной цилиндрической оболочки на поперечную нагрузку / А. Г. Иммерман // Расчет пространственных конструкций : сб. – Вып. III. – М. : Госстройиздат, 1955. – С. 323–373.
3. Справочник проектировщика / под ред. А. А. Уманского. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1973.
4. **Тимошенко, С. П.** Курс теории упругости / С. П. Тимошенко. – Киев : Наукова думка, 1972. – 508 с.

References

1. Vlasov V. Z. *Obshchaya teoriya obolochek* [General theory of shells]. Moscow: GITTL, 1949. – 784 p.
2. Immerman A. G. *Raschet prostranstvennykh konstruktsiy: sb.* [Calculation of spatial constructions: collection]. Issue III. Moscow: Gosstroytzdat, 1955. – pp. 323–373.
3. *Spravochnik proektirovshchika* [Designer's reference book]. Ed. A. A. Umansokgiy. Moscow: Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1973.
4. Timoshenko S. P. *Kurs teorii uprugosti* [The course of the elasticity theory]. Kiev: Naukova dumka, 1972. – 508 p.

Дудченко Анатолий Николаевич
кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт Национального научно-исследовательского ядерного университета «МИФИ»
(Россия, Ростовской область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94)

E-mail: krapa21@yandex.ru

Dudchenko Anatoliy Nikolaevich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of mechanical engineering and applied mechanics, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology of the National Research Nuclear University "MIFI" (73/94 Lenina street, Volgodonsk, Rostov-on-Don region, Russia)

Колоколов Евгений Иванович
кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт Национального научно-исследовательского ядерного университета «МИФИ»
(Россия, Ростовской область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94)

E-mail: krapa21@yandex.ru

Kolokolov Evgeniy Ivanovich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of mechanical engineering and applied mechanics, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology of the National Research Nuclear University "MIFI" (73/94 Lenina street, Volgodonsk, Rostov-on-Don region, Russia)

Кравченко Павел Давидович
доктор технических наук, профессор, кафедра машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт Национального научно-исследовательского ядерного университета «МИФИ»
(Россия, Ростовской область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94)

E-mail: krapa21@yandex.ru

Kravchenko Pavel Davidovich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of mechanical engineering and applied mechanics, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology of the National Research Nuclear University "MIFI" (73/94 Lenina street, Volgodonsk, Rostov-on-Don region, Russia)

УДК 621.715.4
Дудченко, А. Н.
Конструктивно-технологическая оптимизация оправки для изготовления высокоточных цилиндрических оболочек / А. Н. Дудченко, Е. И. Колоколов, П. Д. Кравченко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 131–141.

УДК 621.7-982

Ю. П. Тарасенко, Л. А. Кривина, Я. А. Фель

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НИТРИДА ТИТАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются плунжера различной конфигурации из стали Р6М5 производственных партий, используемые в составе плунжерных пар автомобильных топливных насосов. Предметом исследования является наноструктурированное ионно-плазменное покрытие нитрида титана, нанесенное на рабочие зоны детали пары трения – плунжера. Целью работы является повышение ресурса плунжерных пар автомобильных топливных насосов, используемых в машиностроительной области.

Материалы и методы. Износостойкое покрытие нитрида титана нанесено методом ионно-плазменного напыления. Анализ структуры покрытия проведен методами оптической металлографии, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Механические свойства исследованы по ГОСТ 9450–76 с использованием микротвердомера ПМТ-3, исследования фрикционных свойств проводили на установке «Эхо».

Результаты. Разработаны наноструктурированные покрытия нитрида титана (~60 нм), обеспечивающие повышение микротвердости рабочей поверхности плунжера примерно в 2 раза и снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания примерно в 1,8 и 4 раза соответственно. Разработанное покрытие внедрено для повышения износостойкости плунжерной пары трения топливных насосов автомобилей КАМАЗ, МАЗ.

Выводы. Разработанное ионно-плазменное покрытие нитрида титана показало эффективное повышение износостойкости стальной поверхности и внедрено для повышения ресурса плунжерной пары трения в машиностроительной отрасли.

Ключевые слова: пара трения, наноструктурированное ионно-плазменное покрытие, нитрид титана, интенсивность изнашивания.

Yu. P. Tarasenko, L. A. Krivina, Ya. A. Fel'

USAGE OF A NANOSTRUCTURED ION-PLASMOUS TITANIUM NITRIDE COATING FOR IMPROVING WEAR RESISTANCE OF FUEL PUMPS' PLUNGER PAIRS

Abstract.

Background. The research object is the plungers of various configurations made of P6M5 steel of production batches, used in the structure of plunger pairs of automobile fuel pumps. The research subject is a nanostructured ion-plasmous titanium nitride coating applied to the working areas of a part of a tension pair – a plunger. The aim of the work is to improve the life time of plunger pairs of automobile fuel pumps, used in the field of machine buidling.

Materials and methods. The wear-resistant titanium nitride coating is applied using ion-plasmous evaporation. The coating structure analysis was carried out using

the methods of optical metallography, electronic microscopy and X-ray structural analysis. Mechanical properties were researched according to the GOST 9450–76 standard using a PMT-3 microdurometer; frictional properties were researched on an “Eco” plant.

Results. The authors developed nanostructured titanium nitride coatings (~60 nanometers), providing microhardness improvement of the working surface of plungers approximately 2 times and decrease of the friction coefficient and wear intensity aproximatel 1,8 and 4 times, respectively. The developed coating has been implemented for wear resistance improvement of plunger pairs of fuel pumps in KAMAZ and MAZ automobiles.

Conclusions. The developed ion-plasmous titanium nitride coating displayed effective wear resistance improvement of the steel surface and has been implemented in to the field of machine building for life time improvement of plunger friction pairs.

Key words: friction pair, nanostructured ion-plasmous coating, titanium nitride, wear intensity.

Предмет, тема, цель работы

Объектом исследования являлись плунжера различной конфигурации из стали Р6М5 производственных партий, используемые в составе плунжерных пар автомобильных топливных насосов.

Предметом исследования является наноструктурированное ионно-плазменное покрытие нитрида титана, нанесенное на рабочие зоны детали пары трения – плунжера.

Целью работы является повышение ресурса плунжерных пар автомобильных топливных насосов, используемых в машиностроительной области.

Метод и методология проведения работы

Износостойкое покрытие TiN наносили методом ионно-плазменного напыления на установке ВУ-2МБС на рабочую зону плунжеров по режиму: парциальное давление азота в рабочей камере $P_{N_2} = 0{,}04$ Па, ток дуги $I_{\text{д}} = 140$ А, напряжение смещения $U_{\text{см}} = 140$ В. Очистка и активация поверхности деталей проводились методом ионной бомбардировки Ti^+ в циклическом режиме 5 с (обработка) плюс 5 с (пауза) до полного прекращения дугового разряда на поверхности. Нанесение подслоя α-Ti проводилось в течение 5 мин, нанесение покрытия TiN – 60 мин. Выбранный режим является оптимальным для формирования износостойкого покрытия на данной установке [1, 2]. Температуру нагрева деталей в вакуумной камере контролировали пирометром Optris CT.

Фазовый состав покрытий определяли рентгеновским методом с применением дифрактометра «Дрон-3М» (Cu-Kα-излучение).

Микроструктуру исследовали методами оптической металлографии (микроскоп «Неофот 32») и электронной микроскопии (растровый микроскоп VEGA//TESKAN).

Микротвердость (H_{μ}) измеряли на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450–76. Поскольку толщина покрытия сравнима с глубиной индентирования, то проводили теоретические расчеты микротвердости покрытия по формуле [3], учитывающей влияние подложки на процесс измерения:

$$H_{\text{покр}} = H_{\text{к}} + \left(H_{\text{к}} - H_{\text{подл}}\right) / \left[2t/h + 3(t/h)^2\right], \quad (1)$$

где $H_{\text{покр}}$ – микротвердость покрытия; $H_{\text{к}}$ – микротвердость композиции; $H_{\text{подл}}$ – микротвердость подложки; t – толщина покрытия; h – глубина индентирования.

Шероховатость контролировали на профилометре Tester TR200 по параметру R_a в соответствии с ГОСТ 2789–73.

Исследование фрикционных свойств проводили на лабораторной установке трения при сухом скольжении индентора из стали ШХ-15 с нагрузкой 1 Н.

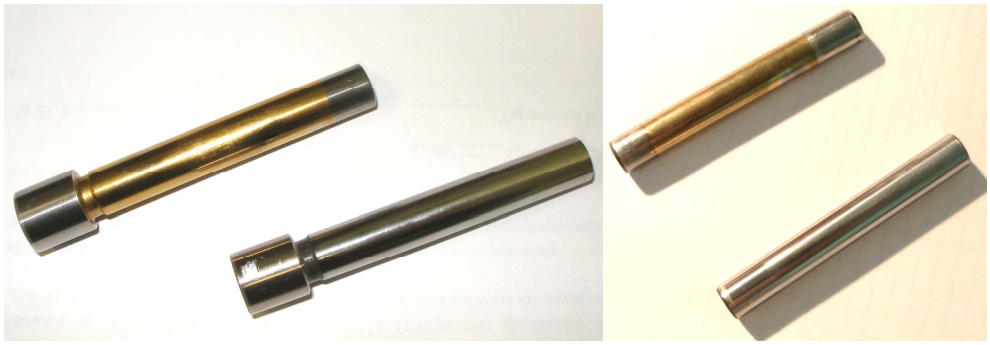
Испытания износостойкости проводили на установке «Эхо» при сухом поперечном контакте вращающегося стального стержня У10 ($H_{\text{м}}^{200} = 1000$ кг/мм^2) диаметром ~8 мм с нагрузкой N = 3 Н. Геометрические размеры пятна износа определяли на микроскопе МБС-9. Интенсивность изнашивания и удельный износ материала (Р6М5, TiN) рассчитывали соответственно по формулам [4, 5]:

$$I = U / L; \quad W = V / (PL), \quad (2)$$

где U – глубина износа; L – длина пути трения; V – объем удаленного при износе материала; P – нагрузка на индентор.

Результаты работы и область применения

На рис. 1 представлены несколько видов исследуемых плунжеров из стали Р6М5 в штатном исполнении и после нанесения покрытия нитрида титана на рабочую поверхность.



а) ***б***)

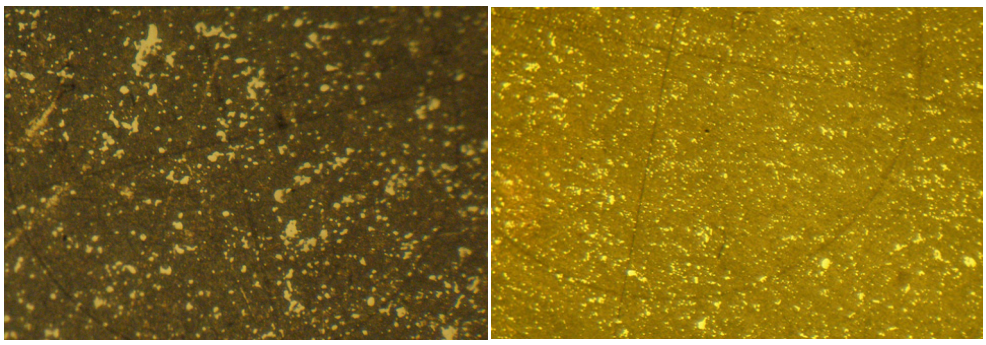
Рис. 1. Внешний вид плунжеров исходных и с покрытием TiN:
а, ***б*** – плунжера различной конфигурации

Для контроля отпуска и усадки основного материала плунжеров проводилось измерение температуры деталей в вакуумной камере установки во время всего процесса нанесения ионно-плазменного покрытия. Средняя температура составила $T = 240 \pm 10$ °С.

В исходном состоянии основной материал плунжера имел высокую микротвердость $H_{\text{м}}^{200} = 940-980$ кг/мм^2. Однако микротвердость рабочей

поверхности составляет ~1100 кг/мм^2, что может быть обусловлено такими причинами, как механический наклеп, дополнительная термообработка и т.п. В результате нагрева во время напыления покрытия происходит отпуск основного материала и выравнивание твердости по всему объему. При этом среднее значение микротвердости стали Р6М5 после нанесения покрытия TiN соответствует техническим требованиям для данной марки стали ($H_{\mu}^{200} = 800$ кг/мм^2). Наблюдается незначительная усадка основного материала плунжера по диаметру примерно на 1–3 мкм.

На рис. 2 приведена структура основного материала плунжера в исходном состоянии и после нанесения ионно-плазменного покрытия TiN. Данная структура типична для стали Р6М5, состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидной фазы. В исходном состоянии (рис. 2,***а***) в основном наблюдаются крупные карбиды, которые имеют неправильную вытянутую форму, и небольшое количество мелких округлых карбидов. После процесса нанесения покрытия в основном материале плунжера происходит улучшение гомогенности в распределении карбидной фазы.



а) ***б***)

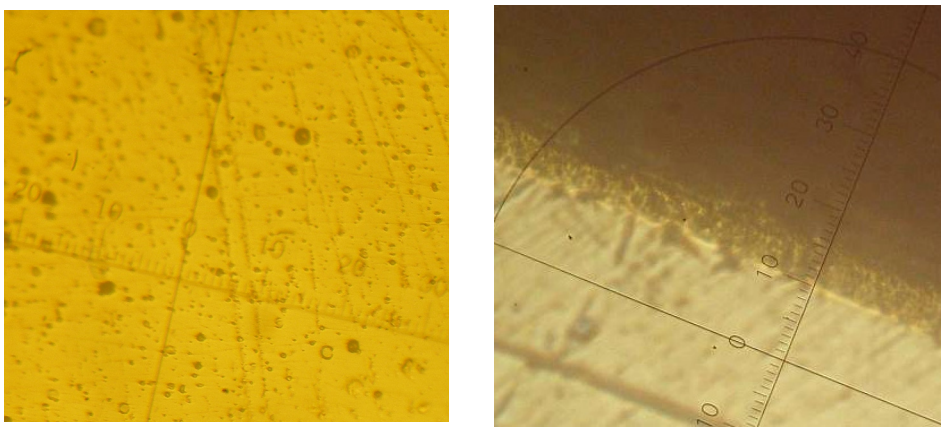
Рис. 2. Структура основного материала (Р6М5) плунжера:
а – в исходном состоянии; ***б*** – после напыления покрытия

На рис. 3 представлены микрофотографии ионно-плазменного покрытия нитрида титана с поверхности и на поперечном шлифе. Покрытие плотное, с низким содержанием пористости и капельной фазы α–Ti. Фазовый состав покрытия представляет собой δ-TiN с кубическим типом кристаллической решетки [2].

Методом электронной микроскопии установлено, что в процессе напыления формируется наноструктурированное покрытие со столбчатой структурой зерен TiN (рис. 4). Поперечный размер зерен составляет ~60 нм. Средняя микротвердость наноструктурированного ионно-плазменного покрытия нитрида титана составляет $H_{\mu}^{50} = 1800$ кг/мм^2.

Нанесение покрытия TiN приводит к незначительному увеличению параметра шероховатости R_a поверхности в пределах исходного класса обработки (10–11 класс).

Нанесение покрытия TiN приводит к уменьшению коэффициента трения рабочей поверхности стального плунжера примерно в 2 раза. Коэффициент трения контактной пары «TiN-ШХ15» после притирки покрытия 0,041.



а) ×250 ***б***) ×400

Рис. 3. Микрофотографии покрытия нитрида титана:
а – с поверхности; ***б*** – на поперечном шлифе

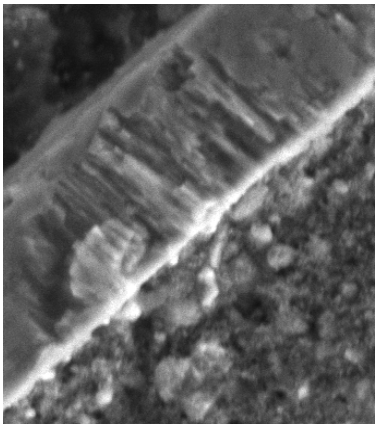


Рис. 4. Покрытие TiN, напыленное по технологическому режиму:
давление газа в камере p = 0,04 Па, ток дуги I = 140 А,
опорное напряжение U = 140 В (×10 000)

На рис. 5 приведены зависимости интенсивности изнашивания и удельного объема износа основного материала плунжера (сталь Р6М5) и ионно-плазменного покрытия нитрида титана в контакте с поверхностью стального стержня в условиях сухого трения в зависимости от времени испытания при постоянной нагрузке на исследуемые детали.

Нанесение покрытия приводит к уменьшению интенсивности изнашивания, а также удельного объема износа соответственно примерно в 4 и 10 раз. Из приведенных на рис. 5 графиков видно, что интенсивность изнашивания и удельный объем износа поверхностей штатного плунжера и плунжера с TiN покрытием с течением времени испытания выходит практически на постоянные значения.

Разработанное ионно-плазменное покрытие показало эффективное повышение износостойкости стальной поверхности и внедрено для повышения износостойкости плунжера плунжерной пары трения в машиностроительной отрасли.

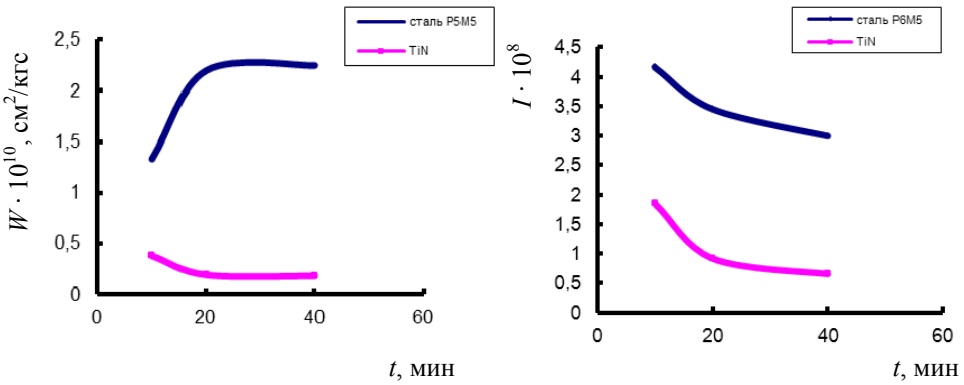


Рис. 5. Зависимости интенсивности изнашивания
и удельного объема от времени испытания

Заключение

Разработаны наноструктурированные покрытия нитрида титана (~60 нм), обеспечивающие повышение микротвердости рабочей поверхности плунжера примерно в 2 раза и снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания примерно в 1,8 и 4 раза соответственно.

Разработанные ионно-плазменные покрытия внедрены для повышения ресурса плунжерных пар трения в машиностроительной отрасли.

Список литературы

1. **Тарасенко, Ю. П.** Оптимизация режима вакуумного ионно-плазменного напыления покрытия на основе нитрида титана / Ю. П. Тарасенко, В. А. Сорокин, Л. А. Кривина // Материаловедение и металлургия : тр. НГТУ. – Н. Новгород, 2008. – Т. 68. – С. 118–122.
2. **Тарасенко, Ю. П.** Оптимизация технологии нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана на малогабаритные тонкостенные детали / Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царева, Л. А. Кривина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3 (27), ч. 2. – С. 170–174.
3. **Тарасенко, Ю. П.** Субструктура, механические и фрикционные свойства ионно-плазменных покрытий нитрида титана, полученных при разных парциальных давлениях азота / Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царева, И. Г. Романов // Известия Академии наук. Сер. Физическая. – 2002. – Т. 66, № 8. – С. 1223–1225.
4. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
5. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. Книга 1. – М. : Машиностроение, 1978. – 400 с.

References

1. Tarasenko Yu. P., Sorokin V. A., Krivina L. A. *Materialovedenie i metallurgiya: tr. NGTU* [Materials science and metallurgy: proccedings of NNSTU]. Nizhny Novgorod, 2008, vol. 68, pp. 118–122.
2. Tarasenko Yu. P., Tsareva I. N., Krivina L. A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of Samara State Aerospace University]. 2011, no. 3 (27), part 2, pp. 170–174.
3. Tarasenko Yu. P., Tsareva I. N., Romanov I. G. *Izvestiya Akademii nauk. Ser. Fizicheskaya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Series: Physics]. 2002, vol. 66, no. 8, pp. 1223–1225.

4. Kragel'skiy I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basic friction and wear calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p.
5. *Trenie, iznashivanie i smazka. Spravochnik. Kniga 1* [Friction, wear and lubrication. Reference book. Book 1]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 400 p.

Тарасенко Юрий Павлович
кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией плазменных технологий и полифункциональных покрытий, Институт проблем машиностроения Российской академии наук (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85)

E-mail: tribonikanpc@mail.ru

Tarasenko Yuriy Pavlovich
Candidate of physical and mathematical sciences, head of laboratory of plasmous technologies and multifunctional coatings, Institute of mechanical engineering problems of the Russian Academy of Sciences (85 Belinskogo street, Nizhny Novgorod, Russia)

Кривина Людмила Александровна
научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85)

E-mail: tribonikanpc@mail.ru

Krivina Lyudmila Aleksandrovna
Research officer, Institute of mechanical engineering problems of the Russian Academy of Sciences (85 Belinskogo street, Nizhny Novgorod, Russia)

Фель Яков Абрамович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения Российской академии наук (Россия, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85)

E-mail: tribonikanpc@mail.ru

Fel' Yakov Abramovich
Candidate of physical and mathematical sciences, Institute of mechanical engineer ing problems of the Russian Academy of Sciences (85 Belinskogo street, Nizhny Novgorod, Russia)

УДК 621.7-982
Тарасенко, Ю. П.
Использование наноструктурированного ионно-плазменного покрытия нитрида титана для повышения износостойкости плунжерных пар топливных насосов / Ю. П. Тарасенко, Л. А. Кривина, Я. А. Фель // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 142–148.

УДК 621.787:539.319

В. Ф. Павлов, В. С. Вакулюк,
В. П. Сазанов, В. Б. Иванов, Н. Н. Микушев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ СПЛОШНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 45 ПО ОСТАТОЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ ОБРАЗЦА-СВИДЕТЕЛЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Выявление связи между остаточными напряжениями образца-свидетеля и пределом выносливости упрочненной одновременно детали является весьма актуальной задачей, решение которой позволит значительно сократить дорогостоящие и долговременные испытания на усталость.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели в исследовании была изучена возможность использования образцов-свидетелей в виде втулок диаметром 51,5×45 мм при прогнозировании приращения предела выносливости сплошных образцов из стали 45 различного диаметра (10–50 мм) с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса 0,3 мм, подвергнутых гидродробеструйной обработке.

Результаты. По результатам экспериментального измерения остаточных напряжений образцов-свидетелей определялись первоначальные деформации, по которым рассчитывались остаточные напряжения в гладких образцах, а затем в образцах с надрезами, нанесенными на них после поверхностного упрочнения.

Выводы. С использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений установлено, что расчетные значения приращений пределов выносливости при изгибе в случае симметричного цикла упрочненных образцов с надрезами отличаются от экспериментальных не более чем на 16 %. Полученный результат указывает на то, что для прогнозирования предела выносливости упрочненных гидродробеструйной обработкой деталей из стали 45 диаметром 10–50 мм можно использовать образцы-свидетели и критерий среднеинтегральных остаточных напряжений.

Ключевые слова: гидродробеструйная обработка, образец-свидетель, остаточные напряжения, первоначальные деформации, образцы с надрезами, предел выносливости.

V. F. Pavlov, V. S. Vakulyuk,
V. P. Sazanov, V. B. Ivanov, N. N. Mikushev

ENDURANCE LIMIT FORECASTING FOR SURFACE HARDENED SOLID CYLINDRICAL SPECIMENS MADE OF STEEL 45 USING RESIDUAL STRESS OF REFERENCE SPECIMEN

Abstract.

Background. The discovery of connection between residual stresses of a reference specimen and the endurance limit of a simultaneously hardened part is an extremely topical task; its solution will make it possible to reduce expensive and prolonged fatigue tests.

Materials and methods. To achieve the set task, the authors examined the possibility of using reference specimens, having a bush form with the diameter of

51,5×45 mm, in forecasting of the endurance limit of solid specimens made of steel 45 of various diameters (10–50 mm) with circular cuts of 0,3 mm radius and subject to hydro blasting treatment.

Results. According to experimental measuring of residual stresses of reference specimens the authors determined initial deformations, which were used to calculate residual stresses in smooth specimens and then in specimens with cuts made after surface hardening.

Conclusions. Using the average integral residual stresses criterion it is established that the calculated values of endurance limits increments under bending in case of a symmetric cycle of hardened specimens with cuts differ from the experimental ones less than 16 %. This result shows that reference specimens and the average integral residual stresses criterion can be used for endurance limit prediction for the parts made of steel 45 with the diameters 10–50 mm, hardened by hydro blasting treatment.

Key words: hydroblasting, reference specimen, residual stresses, initial deformations, specimens with cuts, endurance limit.

Для повышения сопротивления усталости деталей машин в настоящее время широкое применение на практике нашли различные методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). После обработки ППД в тонком поверхностном слое деталей наводятся сжимающие остаточные напряжения, изменяется структура и увеличивается твердость материала. Многочисленными исследованиями [1–8] установлено, что основную роль в повышении характеристик сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей играют сжимающие остаточные напряжения.

Для оценки влияния ППД на предел выносливости поверхностно упрочненных деталей используются обычно два критерия: осевые остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали $\sigma_z^{\text{пов}}$ [9–13] и среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ [4, 14, 15], вычисленные по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Проведенные эксперименты [2–4, 6] показывают, что наиболее точно связь между приращением предела выносливости упрочненных деталей и остаточными напряжениями отражает критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, предложенный в работе [1], так как этот критерий учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины, но и характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на приращение предела выносливости детали $\Delta\sigma_{-1}$ при изгибе в случае симметричного цикла с использованием критерия $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ производится по следующей зависимости:

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma \left|\bar{\sigma}_{\text{ост}}\right|, \qquad (1)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$,

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi}\int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}}\,d\xi; \qquad (2)$$

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя y; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от поверхности опасного сечения детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в опасном сечении упрочненной детали при работе на пределе выносливости (рис. 1).

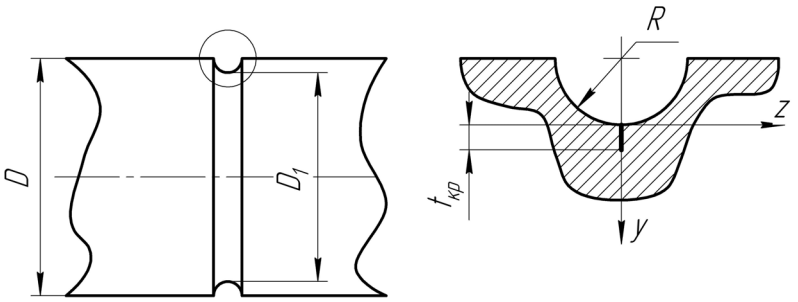


Рис. 1. Цилиндрический образец и нераспространяющаяся трещина усталости

Из формул (1) и (2) видно, что для определения расчетным путем приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ необходимо знать коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости, а также распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости.

На основании многочисленных экспериментальных данных для образцов и деталей с различными концентраторами напряжений в работах [16, 17] было установлено, что коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ зависит только от степени концентрации напряжений и вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \tag{3}$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Из приведенных в исследованиях [2–4, 6] результатов испытаний на усталость поверхностно упрочненных образцов и деталей следует, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации, асимметрии цикла напряжений и определяется только размерами опасного поперечного сечения. Для сплошных цилиндрических образцов и деталей зависимость для $t_{кр}$ имеет следующий вид [2, 6]:

$$t_{кр} = 0,0216D_1, \tag{4}$$

где D_1 – диаметр опасного сечения образца или детали (рис. 1).

Для вычисления приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ поверхностно упрочненной детали по формуле (1) необходимо знать достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверх-

ностного слоя, которое можно получить только на образцах, вырезанных из обработанной ППД детали.

Экспериментальные исследования показывают, что характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения оказывает существенное влияние на предел выносливости упрочненных деталей, особенно в условиях концентрации напряжений [1–8, 12–15]. В связи с этим при экспериментальном измерении остаточных напряжений наилучшими являются такие методы, которые позволяют определять их распределение по толщине упрочненного поверхностного слоя.

В настоящее время известно достаточно большое количество методов измерения остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от способов воздействия на исследуемые деталь или образец их разделяют на механические и физические методы. Механические методы основаны на принципе упругой разгрузки детали или образца при последовательном удалении поверхностных слоев с остаточными напряжениями. Измерив деформации, возникающие после разгрузки, по формулам теории упругости вычисляются остаточные напряжения. К механическим методам относятся метод полосок, метод колец и полосок, метод обтачивания или растачивания, метод снятия части поверхности, метод отверстий, метод канавок, метод коротких столбиков и ряд других методов. Физические методы основаны на измерении изменений физических свойств материалов в зависимости от степени упругого деформирования. В отличие от механических, физические методы не связаны с обязательным разрушением деталей и образцов, однако необходимо отметить, что достаточно точное распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя можно получить только лишь с помощью механических методов.

Сохранить исследуемую деталь и получить распределение остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя в любом ее сечении позволяет расчетно-экспериментальный метод с использованием образцов-свидетелей и современных расчетных комплексов, реализующих метод конечных элементов в форме перемещений, причем при определении остаточных напряжений в этом случае разрушению подвергается только образец-свидетель. На практике образцы-свидетели традиционно используются для контроля качества упрочнения деталей различными методами поверхностного пластического деформирования. Образец-свидетель, имеющий определенные размеры и форму, проходит весь технологический цикл упрочняющей обработки вместе со штатной деталью.

В основе расчетно-экспериментального метода определения остаточных напряжений лежит известная гипотеза о том, что обрабатываемые совместно деталь и образец-свидетель при ППД получают одинаковые первоначальные деформации. Однако во всех случаях практического применения эта гипотеза требует проведения тщательной экспериментальной и расчетной проверки. Именно с этой целью были проанализированы результаты испытаний на усталость и экспериментального определения остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя нескольких партий сплошных цилиндрических образцов из стали 45 диаметром в гладкой части D = 10 мм, D = 15 мм, D = 25 мм и D = 50 мм (рис. 1) [6]. Исследуемая сталь 45 имела следующие механические характеристики: $\sigma_в$ = 710 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 422 МПа, δ = 19,7%, ψ = 41,4%, S_k = 1079 МПа.

Все образцы перед испытаниями подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) стальной дробью диаметром 2 мм при давлении масла 0,28 МПа в течение 8 мин. В качестве образца-свидетеля при проведении исследований вышеуказанных партий образцов использовалась втулка с наружным диаметром 51,5 мм и внутренним диаметром 45 мм, в которой определялись остаточные напряжения по толщине упрочненного поверхностного слоя методом колец и полосок [18].

Расчетная часть исследований выполнялась методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса PATRAN/ NASTRAN. Конечно-элементные модели гладких образцов в осесимметричной постановке представляли собой четверть сечения цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Для моделирования использовался плоский треугольный элемент типа 2D-Solid с шестью узлами. Моделирование остаточных напряжений по толщине упрочненного поверхностного слоя гладких образцов было выполнено методом термоупругости [19–24].

При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

– все исследуемые образцы и образец-свидетель (втулка) при упрочнении получали одинаковые первоначальные деформации;

– первоначальные деформации являлись изотропными;

– деформации сдвига малы и при определении первоначальных деформаций они не учитывались.

Расчеты проводились в следующей последовательности:

– определение первоначальных деформаций в образце-свидетеле (втулке) с наружным 51,5 мм и внутренним 45 мм диаметрами;

– расчет распределения остаточных напряжений в гладких образцах различного диаметра по полученным значениям первоначальных деформаций образца-свидетеля (втулки);

– сравнение расчетных распределений остаточных напряжений в гладких образцах различного диаметра с экспериментальными распределениями.

При определении первоначальных деформаций в конечно-элементной модели образца-свидетеля в качестве исходных данных использовалось экспериментальное распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине *a* упрочненного поверхностного слоя втулки (рис. 2), полученное методом колец и полосок.

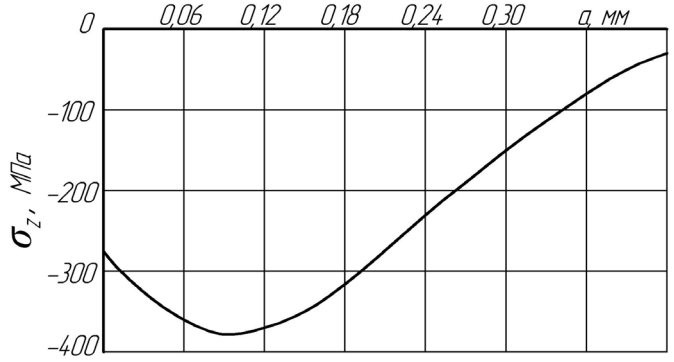


Рис. 2. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образце-свидетеле (втулка диаметром 51,5×45 мм) после ГДО

Следующий этап расчета выполнялся на конечно-элементных моделях исследуемых гладких образцов различного диаметра по первоначальным деформациям образца-свидетеля (втулки). При оценке приращения предела выносливости поверхностно упрочненных деталей определяющими являются осевые σ_z остаточные напряжения, поэтому сравнение расчетных и экспериментальных распределений остаточных напряжений для исследуемых гладких образцов выполнялось по осевой компоненте. На рис. 3 приведены экспериментальные [6] и расчетные распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя *a* для исследуемых гладких образцов различного диаметра.

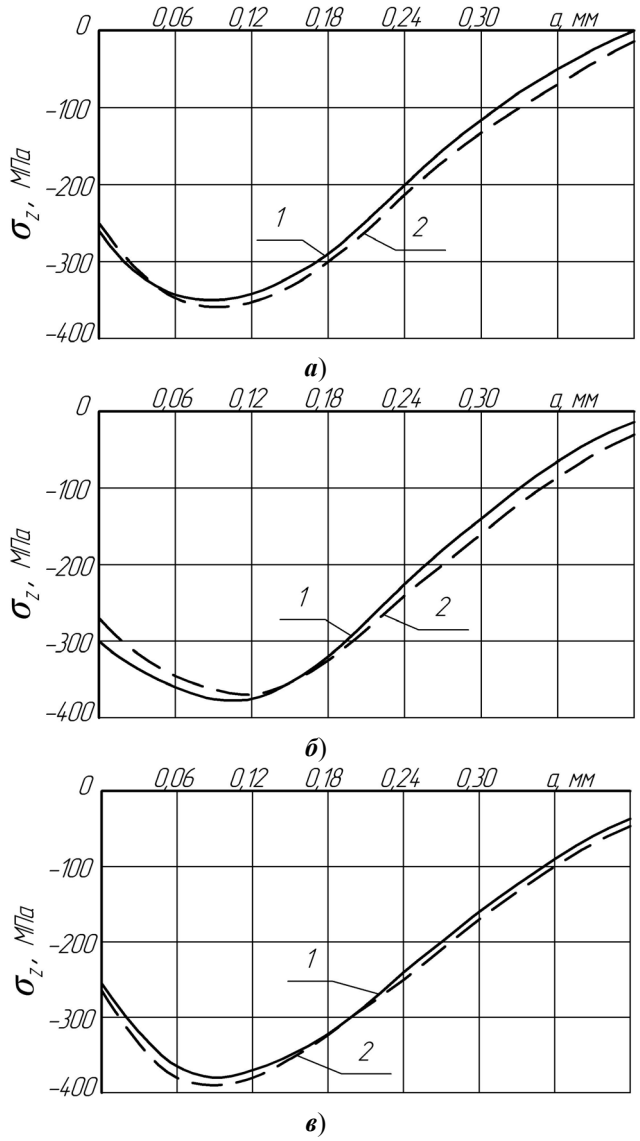
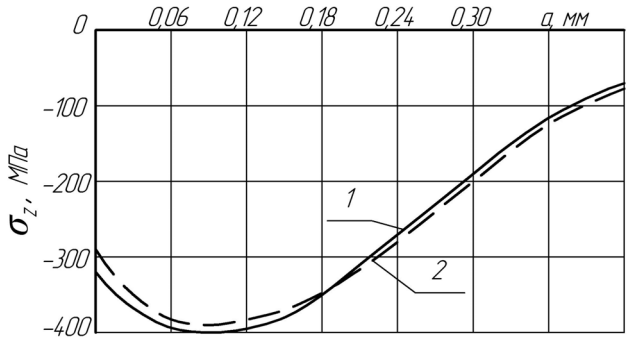


Рис. 3. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений после ГДО, определенных экспериментальным (*1*) и расчетным (*2*) методами в гладких образцах диаметром: ***а*** – D = 10 мм; ***б*** – D = 15 мм; ***в*** – D = 25 мм; ***г*** – D = 50 мм



г)

Рис. 3. Окончание

Из приведенных на рис. 3 данных видно, что расчетные распределения осевых σ_z остаточных напряжений в гладких образцах незначительно отличаются от экспериментальных – по максимальным сжимающим остаточным напряжениям различие не превышает 6 % (образец диаметром 50 мм). Этот результат указывает на то, что в сплошных цилиндрических деталях из стали 45 диаметром 10–50 мм остаточные напряжения после гидродробеструйной обработки можно определять расчетным методом по первоначальным деформациям образца-свидетеля, упрочненного одновременно с гладкими образцами.

Полученные расчетным методом распределения осевых остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки в гладких образцах диаметром D = 10 мм, D = 15 мм, D = 25 мм и D = 50 мм использовались для расчета распределения остаточных напряжений в образцах с круговыми надрезами полукруглого профиля радиуса R = 0,3 мм, нанесенными на гладкие образцы после упрочнения ГДО, т.е. после опережающего поверхностного пластического деформирования. Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись как сумма дополнительных напряжений, возникающих за счет перераспределения остаточных усилий гладких образцов при нанесении надрезов, и остаточных напряжений гладких образцов. Дополнительные остаточные напряжения рассчитывались двумя методами: аналитическим [25] и численным с использованием программного комплекса PATRAN/NASTRAN [21]. Необходимо отметить, что остаточные напряжения в образцах с надрезами, определенные двумя методами, были практически одинаковыми. На рис. 4 приведены экспериментальные [6] и расчетные эпюры осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами после опережающего поверхностного пластического деформирования. Можно видеть, что распределения сжимающих остаточных напряжений, полученные по экспериментальным и расчетным эпюрам гладких образцов, отличаются по наибольшим значениям не более 5 % (рис. 4,***а***: D = 10 мм).

Значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ вычислялись по формуле (2) по толщине поверхностного слоя опасного сечения образцов с надрезами, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. При расчете критерия $\overline{\sigma}_{ост}$ использовались распределения осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезами

R = 0,3 мм, приведенные на рис. 4. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости определялась по зависимости (4). Значения критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и глубины трещины $t_{кр}$ содержатся в табл. 1.

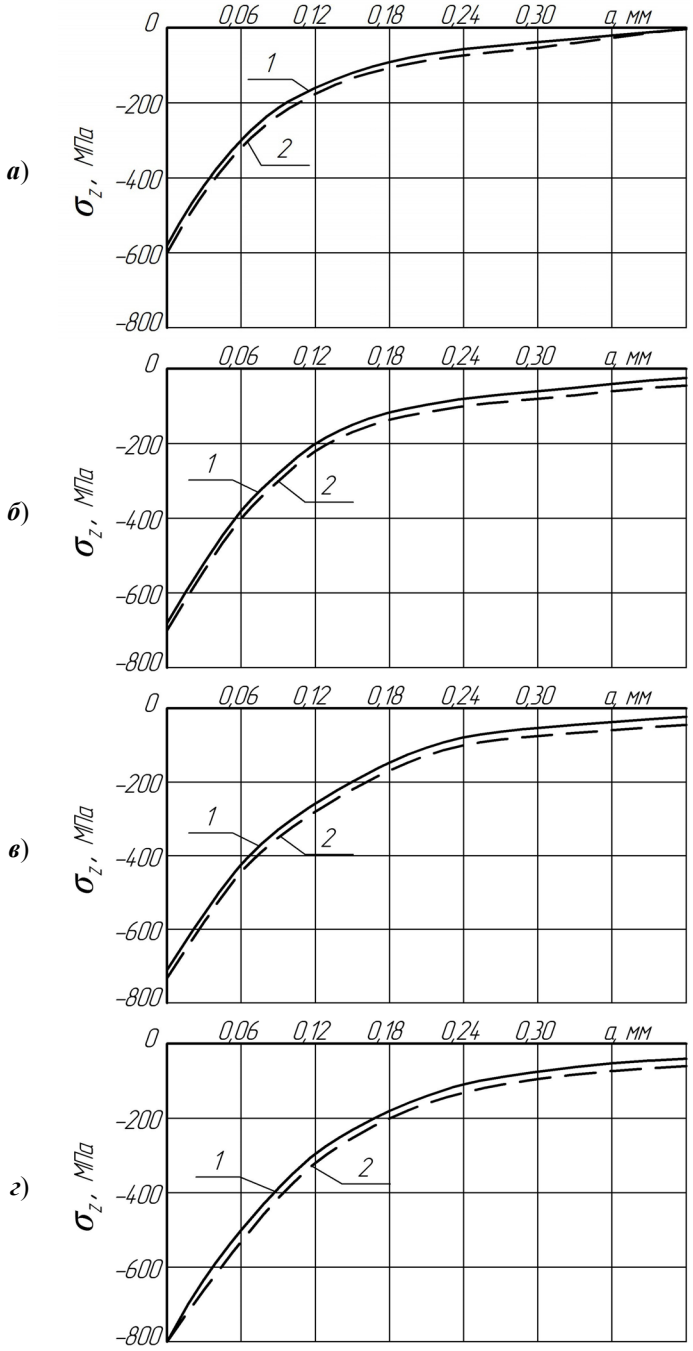


Рис. 4. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений в образцах с надрезами R = 0,3 мм, вычисленных по экспериментальным (*1*) и по расчетным (*2*) данным: ***а*** – D = 10 мм; ***б*** – D = 15 мм; ***в*** – D = 25 мм; ***г*** – D = 50 мм

Из данных табл. 1 видно, что, несмотря на увеличение осевых σ_z сжимающих остаточных напряжений в надрезанных образцах, с увеличением их диаметра среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ уменьшаются. Эта закономерность объясняется тем, что с увеличением диаметра опасного сечения образца увеличивается критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости и это влечет за собой, в соответствии с формулой (2), уменьшение критерия $\bar{\sigma}_{ост}$.

Таблица 1

Результаты расчетного и экспериментального определения пределов выносливости образцов с надрезами

D, мм	D_1, мм	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	α_σ	$\bar{\psi}_\sigma$	$(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$, МПа	$(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, МПа	Расхождение, %
10	9,4	0,203	–211	2,7	0,393	82,9	70	16
15	14,4	0,311	–162	2,8	0,385	62,4	57,5	8
25	24,4	0,453	–116	2,9	0,377	43,7	42,5	3
50	49,4	1,067	–68	3,1	0,361	24,6	25	2

Значения коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ рассчитывались по формуле (3). При этом величина теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ образцов с надрезами определялась по данным справочника [26]. Коэффициенты α_σ и $\bar{\psi}_\sigma$ представлены в табл. 1.

После вычисления критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ по формуле (1) рассчитывались расчетные значения приращений пределов выносливости $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ упрочненных гидродробеструйной обработкой образцов с надрезами радиуса R = 0,3 мм (табл. 1) и сравнивались с экспериментальными значениями $(\Delta\sigma_{-1})_{эксп}$, приведенными в работе [6].

Из данных табл. 1 видно, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями приращений пределов выносливости за счет ГДО не превышает 16 %. Следовательно, используя результаты определения остаточных напряжений в образцах-свидетелях, возможно прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочненных деталей из стали 45 различного диаметра (10–50 мм) в условиях концентрации напряжений с достаточной для многоцикловой усталости точностью. Кроме того, использование образцов-свидетелей позволит назначать наиболее оптимальные, по сопротивлению усталости, режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы, что приведет к значительному сокращению длительных и дорогостоящих испытаний на усталость.

Выводы

1. Апробированный в исследовании метод расчета остаточных напряжений в сплошных цилиндрических образцах диаметром 10–50 мм из стали 45 после гидродробеструйной обработки по первоначальным деформациям образца-свидетеля показал, что расхождение между расчетными и эксперимен-

тальными значениями остаточных напряжений в гладких образцах не превышает 6 %, в образцах с надрезами – 5 %.

2. При оценке влияния поверхностного упрочнения гидродробеструйной обработкой на сопротивление усталости при изгибе в случае симметричного цикла сплошных цилиндрических образцов из стали 45 с надрезами установлено, что использование рассчитанных по первоначальным деформациям образца-свидетеля распределений остаточных напряжений позволяет прогнозировать приращение предела выносливости образцов в условиях концентрации напряжений с точностью до 16 %.

3. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали, что применение образцов-свидетелей позволит назначать оптимальные по сопротивлению многоцикловой усталости режимы и методы поверхностного пластического деформирования деталей сложной формы без проведения испытаний на усталость натурных деталей. Поэтому предлагаемый в настоящем исследовании метод прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям образца-свидетеля приведет к существенному сокращению длительных и дорогостоящих испытаний на многоцикловую усталость.

4. Для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненной детали с концентраторами напряжений вначале необходимо определить первоначальные деформации образца-свидетеля, обработанного одновременно с упрочняемой деталью. По первоначальным деформациям образца-свидетеля производится расчет остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали. Критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости вычисляется по формуле (4), критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ – по формуле (2), коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}$ влияния упрочнения на предел выносливости – по зависимости (3). После определения значений критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ и коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$ по формуле (1) рассчитывается приращение предела выносливости $\Delta\sigma_{-1}$ поверхностно упрочненной детали с концентратором напряжений.

Список литературы

1. **Павлов, В. Ф.** О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29–32.
2. **Павлов, В. Ф.** Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22–26.
3. **Павлов, В. Ф.** Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37–40.
4. **Иванов, С. И.** Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, Г. В. Коновалов, Б. В. Минин. – М. : Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации» МАП, 1992. – 192 с.
5. **Радченко, В. П.** Методика расчета предела выносливости упрочненных цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных вы-

держках в условиях ползучести / В. П. Радченко, О. С. Афанасьева // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. – 2009. – № 2 (19). – С. 264–268.
6. **Павлов, В. Ф.** Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям / В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. С. Вакулюк. – Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
7. **Вакулюк, В. С.** Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочненного слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В. С. Вакулюк // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3 (34). – С. 172–176.
8. **Кирпичев, В. А.** Остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов с V-образными надрезами из стали ВНС40 / В. А. Кирпичев, М. Н. Саушкин, В. П. Сазанов, О. Ю. Семенова // Вестник СГАУ. – 2012. – № 5 (36), ч. 1. – С. 95–99.
9. **Кравченко, Б. А.** Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б. А. Кравченко, К. Ф. Митряев. – Куйбышев : Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 131 с.
10. **Серенсен, С. В.** К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочненных образцов с учетом кинетики остаточной напряженности / С. В. Серенсен, С. П. Борисов, Н. А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – № 2. – С. 3–7.
11. **Туровский, М. Л.** Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали / М. Л. Туровский, Н. М. Шифрин // Вестник машиностроения. – 1970. – № 11. – С. 37–40.
12. **Иванов, С. И.** Влияние остаточных напряжений и наклепа на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25–27.
13. **Иванов, С. И.** Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов, А. А. Прохоров // Проблемы прочности. – 1988. – № 5. – С. 31–33.
14. **Павлов, В. Ф.** Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в условиях концентрации напряжений / В. Ф. Павлов, А. А. Прохоров // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 43–46.
15. **Кирпичев, В.А.** Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных гладких деталей / В. А. Кирпичев, А. С. Букатый, А. В. Чирков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 102–107.
16. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В. А. Кирпичев, А. П. Филатов, О. В. Каранаева, А. В. Чирков, О. Ю. Семенова // Прочность материалов и элементов конструкций : тр. Межд. науч.-техн. конф. – Киев : ИПП им. Г. С. Писаренко НАНУ, 2011. – С. 678–685.
17. **Кирпичев, В. А.** Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений / В. А. Кирпичев, А. С. Букатый, А. П. Филатов, А. В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 81–85.
18. **Иванов, С. И.** К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С. И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев : КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32–42.
19. **Биргер, И. А.** Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
20. **Стружанов, В. В.** Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос / В. В. Стружанов // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. 2010. – № 5 (21). – С. 55–63.

21. **Сазанов, В. П.** Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В. П. Сазанов, А. В. Чирков, В. А. Самойлов, Ю. С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – № 3 (27), ч. 3. – С. 171–174.
22. **Павлов, В. Ф.** Расчет остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В. Ф. Павлов, А. К. Столяров, В. С. Вакулюк, В. А. Кирпичев. – Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 124 с.
23. **Вакулюк, В. С.** Исследование влияния толщины упрочненного слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций / В. С. Вакулюк // Вестник СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. – 2010. – № 1 (20). – С. 222–225.
24. **Саушкин, М. Н.** Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии поверхностного упрочнения / М. Н. Саушкин, В. П. Радченко, В. Ф. Павлов // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 2. – С. 173–182.
25. **Иванов, С. И.** Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С. И. Иванов, М. П. Шатунов, В. Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций : межвуз. сб. – Куйбышев : Изд-во КуАИ, 1974. – Вып. 3. – С. 88–95.
26. **Петерсон, Р. Е.** Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Е. Петерсон. – М. : Мир, 1977. – 304 с.

References

1. Pavlov V. F. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [University proceedings. Mechanical engineering]. 1986, no. 8, pp. 29–32.
2. Pavlov V. F. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [University proceedings. Mechanical engineering]. 1988, no. 8, pp. 22–26.
3. Pavlov V. F. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [University proceedings. Mechanical engineering]. 1988, no. 12, pp. 37–40.
4. Ivanov S. I., Pavlov V. F., Konovalov G. V., Minin B. V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i soprotivlenie ustalosti aviatsionnykh rez'bovykh detaley* [Technological residual stresses and fatigue resistance of aircraft thread pieces]. Moscow: Otraslevaya biblioteka «Tekhnicheskiy progress i povyshenie kvalifikatsii» MAP, 1992, 192 p.
5. Radchenko V. P., Afanas'eva O. S. *Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.-mat. nauki* [Bulletin of SamSTU. Series: Physical and mathematical sciences]. 2009, no. 2 (19), pp. 264–268.
6. Pavlov V. F., Kirpichev V. A., Vakulyuk V. S. *Prognozirovanie soprotivleniya ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detaley po ostatochnym napryazheniyam* [Forecasting fatigue resistance of parts with hardened surface using residual stresses]. Samara: Izd-vo SNTs RAN, 2012, 125 p.
7. Vakulyuk V. S. *Vestnik SGAU* [Bulletin of SSAU]. 2012, no. 3 (34), pp. 172–176.
8. Kirpichev V. A., Saushkin M. N., Sazanov V. P., Semenova O. Yu. *Vestnik SGAU* [Bulletin of SSAU]. 2012, no. 5 (36), part 1, pp. 95–99.
9. Kravchenko B. A., Mitryaev K. F. *Obrabotka i vynoslivost' vysokoprochnykh materialov* [Treatment and endurance of high-strength materials]. Kuybyshev: Kuybyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1968, 131 p.
10. Serensen S. V., Borisov S. P., Borodin N. A. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 1969, no. 2, pp. 3–7.
11. Turovskiy M. L., Shifrin N. M. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering]. 1970, no. 11, pp. 37–40.
12. Ivanov S. I., Pavlov V. F. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 1976, no. 5, pp. 25–27.

13. Ivanov S. I., Pavlov V. F., Prokhorov A. A. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 1988, no. 5, pp. 31–33.
14. Pavlov V. F., Prokhorov A. A. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 1991, no. 5, pp. 43–46.
15. Kirpichev V.A., Bukatyy A. S., Chirkov A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 3 (23), pp. 102–107.
16. Kirpichev V. A., Filatov A. P., Karanaeva O. V., Chirkov A. V., Semenova O. Yu. *Prochnost' materialov i elementov konstruktsiy: tr. Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Strength of materials and structural elements: proceedings of the International scientific and technical conference]. Kiev: IPP im. G. S. Pisarenko NANU, 2011, pp. 678–685.
17. Kirpichev V. A., Bukatyy A. S., Filatov A. P., Chirkov A. V. *Vestnik UGATU* [Bulletin of USATU]. 2011, vol. 15, no. 4 (44), pp. 81–85.
18. Ivanov S. I. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stress]. Kuybyshev: KuAI, 1971, iss. 53, pp. 32–42.
19. Birger I. A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stress]. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p.
20. Struzhanov V. V. *Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.-mat. nauki* [Bulletin of SamSTU. Series: Physical and mathematical sciences]. 2010, no. 5 (21), pp. 55–63.
21. Sazanov V. P., Chirkov A. V., Samoylov V. A., Larionova Yu. S. *Vestnik SGAU* [Bulletin of SSAU]. 2011, no. 3 (27), part 3, pp. 171–174.
22. Pavlov V. F., Stolyarov A. K., Vakulyuk V. S., Kirpichev V. A. *Raschet ostatochnykh napryazheniy v detalyakh s kontsentratorami napryazheniy po pervonachal'nym deformatsiyam* [Calculation of residual stress in parts with stress concentrators using initial deformations]. Samara: Izd-vo SNTs RAN, 2008, 124 p.
23. Vakulyuk V. S. *Vestnik SamGTU. Ser. Fiz.-mat. nauki* [Vulletin of Sam STU. Series: Physical and mathematical sciences]. 2010, no. 1 (20), pp. 222–225.
24. Saushkin M. N., Radchenko V. P., Pavlov V. F. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied mechanics and technical physics]. 2011, vol. 52, no. 2, pp. 173–182.
25. Ivanov S. I., Shatunov M. P., Pavlov V. F. *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsiy: mezhvuz. sb.* [Problems of aircraft structural elements' strength: international collection]. Kuybyshev: Izd-vo KuAI, 1974, iss. 3, pp. 88–95.
26. Peterson R. E. *Koeffitsienty kontsentratsii napryazheniy* [Stress concentration coefficients]. Moscow: Mir, 1977, 304 p.

Павлов Валентин Федорович
доктор технических наук, профессор,
Самарский государственный
аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева,
Национальный исследовательский
университет (Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34)

E-mail: sopromat@ssau.ru

Pavlov Valentin Fedorovich
Doctor of engineering sciences, professor,
Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolev,
National Research University
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

Вакулюк Владимир Степанович
кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева, Национальный исследовательский университет (Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)

E-mail: sopromat@ssau.ru

Vakulyuk Vladimir Stepanovich
Candidate of engineering sciences, associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev, National Research University (34 Moscow highway, Samara, Russia)

Сазанов Вячеслав Петрович
кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева, Национальный исследовательский университет (Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)

E-mail: sopromat@ssau.ru

Sazanov Vyacheslav Petrovich
Candidate of engineering sciences, associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev, National Research University (34 Moscow highway, Samara, Russia)

Иванов Всеволод Борисович
кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева, Национальный исследовательский университет (Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)

E-mail: sopromat@ssau.ru

Ivanov Vsevolod Borisovich
Candidate of engineering sciences, associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev, National Research University (34 Moscow highway, Samara, Russia)

Микушев Николай Николаевич
аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева, Национальный исследовательский университет (Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)

E-mail: mikushev.nn@gmail.com

Mikushev Nikolay Nikolaevich
Postgraduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev, National Research University (34 Moscow highway, Samara, Russia)

УДК 621.787:539.319

Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных сплошных цилиндрических образцов из стали 45 по остаточным напряжениям образца-свидетеля / В. Ф. Павлов, В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, В. Б. Иванов, Н. Н. Микушев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 149–162.

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 полуторный 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 подрисуночными 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 (841-2) 56-34-96, тел.: 36-82-06, 56-47-33; E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку на первое полугодие 2015 г. можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Ивестия вузов». Подписной индекс – 36949.

– –

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 2015 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 «____» _________________ 2014 г.