ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Буряков В. А., Щербаков М. А. Оценка параметров длительности обработки информации в иерархической автоматизированной системе с повторным выполнением некачественно выполненных работ 3

Зинкин С. А. Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (базовый формализм и его расширения) 13

Дубинин В. Н., Ханиш Х.-М., Миссал Д. Интерпретация реверсивных частично маркированных *SNCES*-сетей 23

Волчихин В. И., Прошкина Е. Н. Математическая модель системы принятия решений по управлению качеством образования в вузе 35

Пальченков Ю. Д. Об одном подходе к аналоговой, цифровой и аналого-цифровой технологиям обработки 44

Сорокин С. В., Щербаков М. А. Реализация SD-ROM фильтра на основе концепции нечеткой логики. 56

Мещеряков В. А. Механизмы управления системой менеджмента качества государственного университета на основе процессного подхода 66

Мещеряков В. А., Мурашкина Т. И., Суровицкая Г. В. Оценка результативности процессов кафедры……...71

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Чувыкин Б. В., Шахов Э. К., Ашанин В. Н. ∑Δ-АЦП: анализ погрешности от краевых эффектов 80

Волков П. Ю., Демин С. Б., Регеда В. В. Моделирование электрогидравлического усилителя с магнитострикционным электромеханическим преобразователем 91

Воронов А. П., Юрков Н. К. Вакуумные емкостные делители напряжений для ИИС и АСУ ТП 97

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Кочкин С. В., Малёв Б. А. Метод измерения дисбаланса жестких роторов в режиме сферического циркуляционного движения 105

Трилисский В. О., Большаков Г. С. Расчет сил резания для инструмента со скругленной режущей кромкой 116

Виноградов С. Н., Метальникова О. К. Электроосаждение износостойкого и коррозионно-стойкого покрытия сплавом никель-хром 123

Малышев В. Н. Оценка упрочнения алюминиевых сплавов микродуговой обработкой по результатам статических и динамических испытаний 131

Казанцев И. А., Розен А. Е., Кривенков А. О., Чугунов С. Н. Коррозионная стойкость композиционных материалов на основе алюминия и его сплавов, формируемых микродуговым оксидированием 138

Андреев В. Г., Меньшова С. Б. Влияние агрегированности порошков на процессы структурообразования и свойства высокопроницаемых Mn-Zn ферритов 138

Тарнопольский А. В., Курносов С. Н. Повышение эффективности технологических процессов машиностроительных производств и теплотехнического оборудования при использовании вихревых гидравлических теплогенераторов 150

Аннотации 157

Сведения об авторах 163

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.03

В. А. Буряков, М. А. Щербаков

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ С ПОВТОРНЫМ ВЫПОЛНЕНИЕМ НЕКАЧЕСТВЕННО ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

Разработан метод оценки длительности обработки в иерархической системе с повторным выполнением некачественно выполненных работ, реализующий схему обработки с дискретными результатами контроля и сложными циклами, имеющими постоянные вероятности повторения. Данный метод, в отличие от классического метода критического пути, позволяет получать более точные результаты для рассматриваемого класса систем.

Сложные современные автоматизированные системы, как правило, строятся на иерархических принципах. В каждой из подсистем такой системы обработка информации выполняется лицом, принимающим решение (ЛПР), в соответствии с определенной схемой обработки, описывающей последовательность решения информационно-расчетных задач (ИРЗ), в том числе с учетом итеративного характера их решения.

Для решения ИРЗ ЛПР должно ввести необходимые данные, запустить задачу на выполнение, проанализировать полученные результаты. В случае обнаружения ошибки или неточности в расчетах необходимо скорректировать допущенные в исходных данных ошибки и повторить цикл решения.

Основная масса ошибок происходит на операциях, традиционно выполняемых человеком (ввод информации, принятие решений, установление связей между явлениями и т.д.), причем интенсивность их возникновения довольно высока (до 1–5% от общего объема короткого (время составления меньше 45 минут) документа) [1], что оказывает значительное влияние на длительность обработки информации в системе.

Особенностью иерархической системы обработки информации является то, что ошибка в результатах может быть обнаружена на одном из последующих этапов обработки, а выполнение части работ осуществляется в параллельных ветвях, которые для получения согласованного результата объединяются на одном из следующих уровней иерархии.

Оценка длительности обработки с помощью классических методов сетевого планирования и управления PERT (Programm Evaluation and Review Technique) не всегда приводит к требуемому результату, т.к. временные оценки работ, составляющих схему обработки, являются случайными вели-

чинами (в том числе из-за случайности возникновения ошибок), а сами работы выполняются в параллельных ветвях.

Метод критического пути для совокупности параллельных работ основывается на выборе наибольшей из длительностей их выполнения:

$$T_i^{par} = \max_{b=1,\ldots,B_i} T_i^b ,$$

где B_i – количество параллельных ветвей на i-м параллельном участке; T_i^b – среднее время выполнения b-й ветви i-го параллельного участка.

Этот метод дает значительно заниженную оценку по сравнению с получаемой с помощью имитационного моделирования. Это в первую очередь происходит из-за возможности возникновения повторной обработки в нескольких ветвях иерархической системы (т.е. вероятность возникновения ошибки хотя бы в одной из параллельных ветвей определяется как сумма вероятности совместных событий), в то время как в методе критического пути рассматривается только каждая из ветвей в отдельности.

Совокупная схема обработки, описывающая последовательность действий как внутри подсистем, так и при взаимодействии между подсистемами иерархической системы, является весьма сложной, что затрудняет прямой расчет параметров длительности обработки.

Аналитический способ оценки параметров, основанный на нахождении многомерного распределения вектора случайных длительностей обработки в параллельных ветвях, редко применяется из-за своей сложности.

Предлагается производить первоначальное упрощение схемы обработки в первую очередь на участках, где отсутствуют параллельные ветви.

Предположим, что в каждой подсистеме обработка информации осуществляется последовательно, т.к. основным элементом подсистемы является ЛПР, выполняющее сложные задания только последовательно (если обработка выполняется параллельно несколькими ЛПР, то их можно представить как отдельные подсистемы).

Кроме того, предполагается, что осуществляется обработка заявок только одного типа без приоритетов, а также не учитывается время, затрачиваемое на ожидание в очередях перед обслуживающими приборами, т.е. входные требования к системе низкие.

Простейшая схема обработки с исправлением ошибок приведена на рисунке 1. Каждый элемент схемы обработки может характеризоваться набором показателей: элементы обработки – длительностью выполнения, вероятностью q_i внесения ошибок; элементы контроля – вероятностью p_i пропуска ошибок и т.д. Для упрощения последующих выкладок предполагается, что длительности контроля и исправления ошибки входят в длительность обработки.

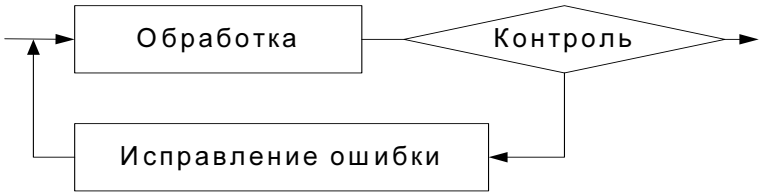


Рис. 1 Простейшая схема обработки данных с исправлением ошибок

Под обработкой понимается процесс решения с участием ЛПР какого-либо информационно-расчетного модуля, имеющего жесткий алгоритм, не допускающий частичного выполнения, поэтому при обнаружении ошибки соответствующий ей этап обработки полностью повторяется.

Тогда имеем схему обработки с постоянными вероятностями разветвления и дискретными результатами контроля. В таких схемах обработки значения вероятностей разветвления (q, $1-q$) не зависят ни от других элементов, ни от пути, по которому развивался технологический процесс до рассматриваемого логического элемента [2].

Процесс обработки единицы входных данных является процессом Бернулли (рис. 2), в котором q – вероятность возникновения ошибки при обработке единичного объема данных, а вероятность правильной обработки единичного объема $p=1-q$. Процесс контроля также является бернуллиевским, в котором f – вероятность обнаружения ошибки в единичном объеме данных и $e=1-f$ – вероятность пропуска ошибки. Предполагается, что вероятность принятия правильно обработанного единичного объема данных за ошибку равна нулю. Обнаруженные ошибки исправляются с вероятностью, равной единице.

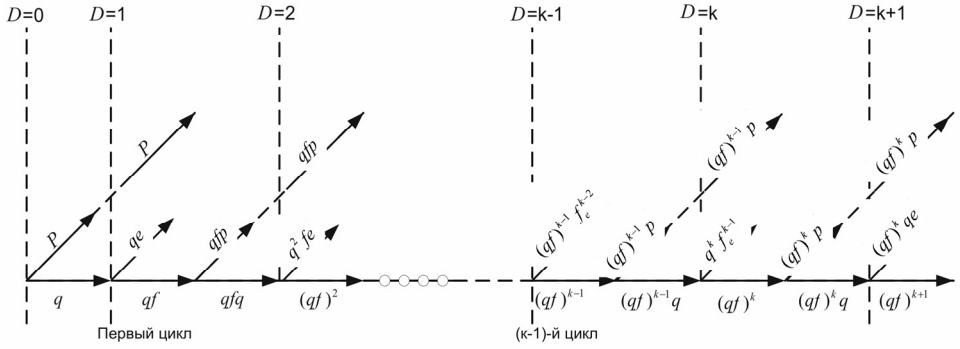


Рис. 2 Процесс функционирования схемы обработки с постоянными вероятностями разветвления и дискретными результатами контроля

Число циклов обработки единицы данных является случайным. Попытка обработки считается успешной, если в фазе обработки не произошло ошибки или же ошибка произошла, но не была обнаружена в фазе контроля. Попытка считается неуспешной, если в фазе обработки произошла ошибка, которая была обнаружена.

Обозначим через ξ число попыток, затрачиваемых на обработку единицы данных. Рассмотрим простейший случай, когда ошибки при обработке возникают независимо. Процесс обработки единицы данных может завершиться успехом на $(k+1)$-й попытке, если с вероятностью $(qf)^k p$ на k-й попытке не произошло ошибок, либо если с вероятностью $(qf)^k q(1-f)$ на k-й попытке не обнаружены ошибки. В противном случае процесс обработки рассматриваемых данных единичного объема не заканчивается, и они должны быть обработаны по крайней мере еще один раз. Вероятность этого

события равна $(qf)^{k+1}$ и случайная величина ξ имеет геометрическое распределение, т.е.

$$P(\xi = i) = (qf)^{i-1}(p + qe),\ i \geq 1.$$

Математическое ожидание M и дисперсия D для геометрического закона равны [3]:

$$M = \frac{1}{1-qf},\ D = \frac{qf}{(1-qf)^2}.$$

Схема обработки может включать в себя сложные циклы с постоянными вероятностями повторения (рис. 3). Циклом обработки (i, j) называется множество подэтапов, заключенных между j-й фазой контроля и i-й фазой обработки, к которой направлена обратная связь от j-й фазы контроля. Причиной возникновения циклов может являться, например, необходимость осуществления повторной обработки при возникновении ошибок. Длиной $d(i, j)$ цикла (i, j) называется число подэтапов обработки между j-й фазой контроля и i-й фазой обработки.

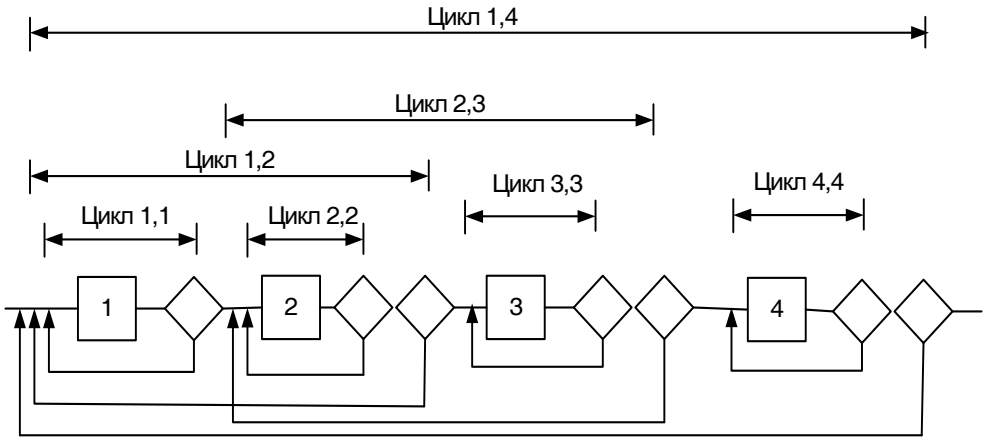


Рис. 3 Пример сложного цикла в схеме обработки

Среднее время $T(i, j)$ обработки единицы данных для сложного цикла (i, j) предлагается определять по следующему алгоритму.

Шаг 1. Определяется перечень циклов и их вложенность, т.е. строится граф вхождений $G(i, j)$ для цикла (i, j). Например, для типичной в иерархических системах схемы обработки, приведенной на рисунке 3, схема вхождений циклов меньшей длины в циклы большей длины соответствует приведенной на рисунке 4.

Шаг 2. $d = 1, T^{(d)}_{(k,m)} = 0$.

Шаг 3. Для всех циклов длиной d из графа $G(j,i)$ найти средние временные $T^*(k,m)$ затраты на единицу данных:

$$T^*(k,m) = \left(\sum T_{(k,m)}^{(\prec d)} + \tau_{km} + \theta_{km}\right)/(1 - q_{km} f_{km}) - T_{(k,m)}^{\cap};$$

$$D(k,m) = \sum D_{(k,m)}^{(\prec d)}/(1 - q_{km} f_{km}) + q_{km} f_{km}/(1 - q_{km} f_{km})^2,$$

где $T_{(k,m)}^{(\prec d)}$ – средние временные затраты на единицу данных для цикла, непосредственно входящего в цикл (k,m) в графе вхождений, с длиной, меньшей $d(k,m)$; $D_{(k,m)}^{(\prec d)}$ – дисперсия для цикла, непосредственно входящего в цикл (k,m) в графе вхождений, с длиной, меньшей $d(k,m)$; $T_{(k,m)}^{\cap}$ – средние временные затраты на единицу данных для подциклов, непосредственно входящих в подциклы, составляющие цикл (k,m), n раз, $n > 1$ (например, на рисунке 3 подцикл (2,2) входит в подциклы (1,2) и (2,3), составляющие цикл (1,4)); τ_{km} – время, затрачиваемое в фазе обработки на единицу данных; q_{km} – вероятность ошибки в единице данных на выходе фазы обработки; θ_{km} – время, затрачиваемое в фазе контроля для обнаружения и согласования ошибки в единице данных; f_{km} – вероятность обнаружения ошибки в единице данных.

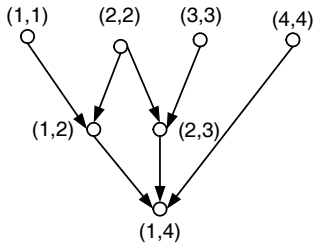


Рис. 4 Граф вхождений циклов меньшей длины в циклы большей длины

Шаг 4. $d = d + 1$; если $d \le d(i,j)$, то идти к шагу 3, иначе $T^*(k,m)$ и есть искомое $T(j,i)$.

В отличие от известных [2], данный алгоритм обеспечивает расчет параметров пересекающихся циклов (подциклы (1,2) и (2,3) на рисунке 3).

С помощью вышеприведенного алгоритма сложный цикл может быть представлен одним участком, эквивалентным циклу по математическому ожиданию и дисперсии длительности выполнения.

Общая длительность (математическое ожидание) обработки в *i*-й подсистеме будет являться суммой длительностей полученных эквивалентных $T_b^{\text{эквив}}$ и последовательных участков $T_{\text{a}}^{\text{послед}}$:

$$T_i^{\text{схемы}} = \sum_a T_a^{\text{послед}} + \sum_b T_b^{\text{эквив}},$$

а дисперсия соответственно:

$$D_i^{\text{схемы}} = \sum_a D_a^{\text{послед}} + \sum_b D_b^{\text{эквив}}.$$

Для расчета параметров упрощенной схемы обработки в иерархической системе предлагается использовать метод GERT (Graphical Evaluation and Review Technique), используемый для расчета параметров стохастических сетей [4].

Стохастическая сеть (и соответствующая ей схема обработки) может быть представлена в виде конечного ориентированного графа $G(\Omega, A)$, состоящего из множества событий Ω и дуг (i, j) (события i и $j \in \Omega$), определяемых матрицей смежности $A = \{p_{ij}\}$, где $0 \le p_{ij} \le 1$, p_{ij} – вероятность того, что операция (i, j) будет выполнена при условии, что операция i выполнена. Каждой дуге присваиваются параметры длительности обработки, значения которых могут быть получены в соответствии с приведенным выше способом оценки параметров фрагмента обработки, содержащего циклы.

Пусть время выполнения операции (i, j) есть случайная величина Y_{ij}, а f_{ij} – условная вероятность или плотность распределения времени выполнения операции (i, j). Условная производящая функция моментов случайной величины Y_{ij} определяется как $M_{ij}(s) = \int e^{sy_{ij}} f(y_{ij}) dy_{ij}$ – для непрерывной случайной величины, $M_{ij}(s) = \sum e^{sy_{ij}} f(y_{ij})$ – для дискретной случайной величины.

В частности $M_{ij}(s) = E[e^{sa}] = e^{sa}$ при $y_{ij} = a = \text{const}$. В таблице 1 описаны некоторые наиболее важные функции распределения и указаны соответствующие производящие функции моментов и первые (математические ожидания) и вторые моменты относительно начала координат [4].

Для случайной величины Y_{ij} определяется W-функция: $W_{ij}(s) = p_{ij} M_{ij}(s)$, которая полностью характеризует операцию (i, j) и соответствует коэффициенту пропускания соответствующей ей дуги.

Петлей считается связная последовательность ориентированных ветвей, каждый узел которых является общим ровно для двух ветвей. Петлю обычно называют петлей первого порядка, чтобы указать на то, что она не содержит других петель и что каждый узел можно достичь из любого другого узла. Петля порядка n: множество n не связанных между собой петель первого порядка.

Эквивалентный коэффициент пропускания для петли порядка n равен произведению коэффициентов пропускания n не связанных между собой петель первого порядка, т.е. $T(L_n) = \prod_{k=1}^{n} T_k$.

Топологическое уравнение для замкнутых графов, известное как правило Мэйсона, имеет следующий вид:

$$H = 1 - \sum T(L_1) + \sum T(L_2) + \ldots + (-1)^m \sum T(L_m) + \ldots = 0,$$

где $T(L_i)$ – сумма эквивалентных коэффициентов пропускания для всех возможных петель i-го порядка.

Таблица 1

Моменты и производящие функции моментов

Тип распределения	$M_E=(s)$	Математическое ожидание	Второй момент
Биномиальное (*B*)	$(pe^s+1-p)^n$	np	$np(np+1-p)$
Дискретное (*D*)	$\frac{p_1e^{sT_1}+p_1e^{sT_2}+...}{p_1+p_2+...}$	$\frac{p_1T_1+p_1T_2+...}{p_1+p_2+...}$	$\frac{p_1T_1^2+p_1T_2^2+...}{p_1+p_2+...}$
Экспоненциальное (*E*)	$\left(1-\frac{s}{a}\right)^{-1}$	$\frac{1}{a}$	$\frac{2}{a^2}$
Гамма (*GA*)	$\left(1-\frac{s}{a}\right)^{-b}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{b(b+1)}{a^2}$
Геометрическое (*GE*)	$\frac{pe^s}{1-e^s+pe^s}$	$\frac{1}{p}$	$\frac{2-p}{p^2}$
Отрицательное биномиальное (*NB*)	$\left(\frac{p}{1-e^s+pe^s}\right)'$	$\frac{r(1-p)}{p}$	$\frac{r(1-p)(1+r-rp)}{p^2}$
Нормальное (*NO*)	$e^{sm+(1/2)s^2\sigma^2}$	m	$m^2+\sigma^2$
Пуассона (*P*)	$e^{\lambda(e^s-1)}$	λ	$\lambda(1+\lambda)$
Равномерное (*U*)	$\frac{e^{sa}-e^{sb}}{(a-b)s}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{a^2+ab+b^2}{3}$

Для открытой сети необходимо ввести дополнительную дугу с функцией W_A, соединяющую сток с источником. Функция W_A эквивалентна функции для исходной сети: $W_A = 1/W_E$. Затем для модифицированной сети нужно найти все петли (вплоть до максимально возможного порядка) и получить топологическое уравнение сети. Из составленного топологического уравнения находится W_E, на основании которой определяются характеристики сети.

Так как $M_E(s)=1$ при $s=0$, то $M_E = W_E(s)/p_E = W_E(s)/W_E(0)$.

Вычисляя *j*-ю частную производную по *s* функции $M_E(s)$ и полагая $s=0$, находим *j*-й момент μ_{jE} относительно начала координат, т.е.

$$\mu_{jE} = \frac{\delta^j}{\delta s^j} M_E(s)\Big|_{s=0}.$$

В частности первый момент μ_{1E} – это математическое ожидание времени обработки, а $D=\mu_{2E}-\mu_{1E}^2$ дисперсия длительности обработки.

Для схемы обработки в иерархической системе, изображенной на рисунке 5, где подсистемы одного уровня аналогичны, получено следующее топологическое уравнение:

$$H = 1 - W_{0,0} - \sum_{i}^{3} W_{0,i}W_{i,0} - \sum_{i,j=1}^{i,j\le 3} W_{i,ij}W_{ij,i} - \sum_{i,j=1}^{i,j\le 3} \frac{W_{0,i}W_{i,tj}W_{ij,t}}{W_E} +$$

$$+ \sum_{\substack{i\ne j \\ i,j=1}}^{i,j\le 3} W_{0,i}W_{i,0}W_{j,jk}W_{jk,j} + \sum_{i<k}^{i,j,k,l\le 3} W_{i,ij}W_{ij,i}W_{k,kl}W_{kl,l} -$$

$$- \sum_{\substack{i\ne j \\ j\ne l \\ i\ne l \\ i,j,k,l,m=1}}^{i,j,k,l,m\le 3} W_{0,i}W_{i,0}W_{j,jk}W_{jk,j}W_{l,lm}W_{lm,m} -$$

$$- \sum_{\substack{i<k \\ k<m \\ i,j,k,l,m,n=1}}^{i,j,k,l,m,n\le 3} W_{i,ij}W_{ij,i}W_{k,kl}W_{kl,k}W_{m,mn}W_{mn,m} +$$

$$+ \frac{1}{W_e} \sum_{i<k}^{i,j,k,l\le 3} W_{0,i}W_{i,ij}W_{ij,t}W_{k,kl}W_{kl,k} -$$

$$- \frac{1}{W_e} \sum_{\substack{i<k \\ k<m \\ i,j,k,l,m,n=1}}^{i,j,k,l,m,n\le 3} W_{0,i}W_{i,ij}W_{ij,t}W_{k,kl}W_{kl,l}W_{m,mn}W_{mn,m} .$$

Предположим, что вероятность возникновения семантической ошибки $q = 0,05$, а вероятность определения ошибки при проверке $f = 0,8$. Предполагается также, что нагрузка на элементы системы сбалансирована, т.е. коэффициенты загрузки примерно равны за счет того, что время выполнения работ на различных уровнях должно быть примерно одинаково (например, $t = 30$ мин).

Определим значения параметров элементов сети и произведем замену переменных: $W_{0,0} = 0,04l^{TS} = A$, $W_{0,i} = 0,96l^{TS} = B$, $W_{i,0} = 0,04l^{TS} = A$, $W_{i,ij} = 0,96l^{TS} = B$, $W_{ij,i} = 0,05l^{TS} = C$, $W_{ij,t} = 0,05l^{TS} = D$, $t = 30$.

В результате упрощений получено следующее выражение:

$$H = 1 - A - 3AB - 9BC - \frac{9B^2D}{W_E} + 27B^3CD + 18B^2AC +$$

$$+ 27B^2C^2 - 27B^3AC^2 - 27B^3C^3 - \frac{27B^4DC^2}{W_E},$$

откуда

$$W_E = \frac{9B^2D - 27B^3CD + 27B^4DC^2}{1 - A - 3AB - 9BC + 27B^3CD + 18B^2AC + 27B^2C^2 - 27B^3AC^2 - 27B^3C^3}.$$

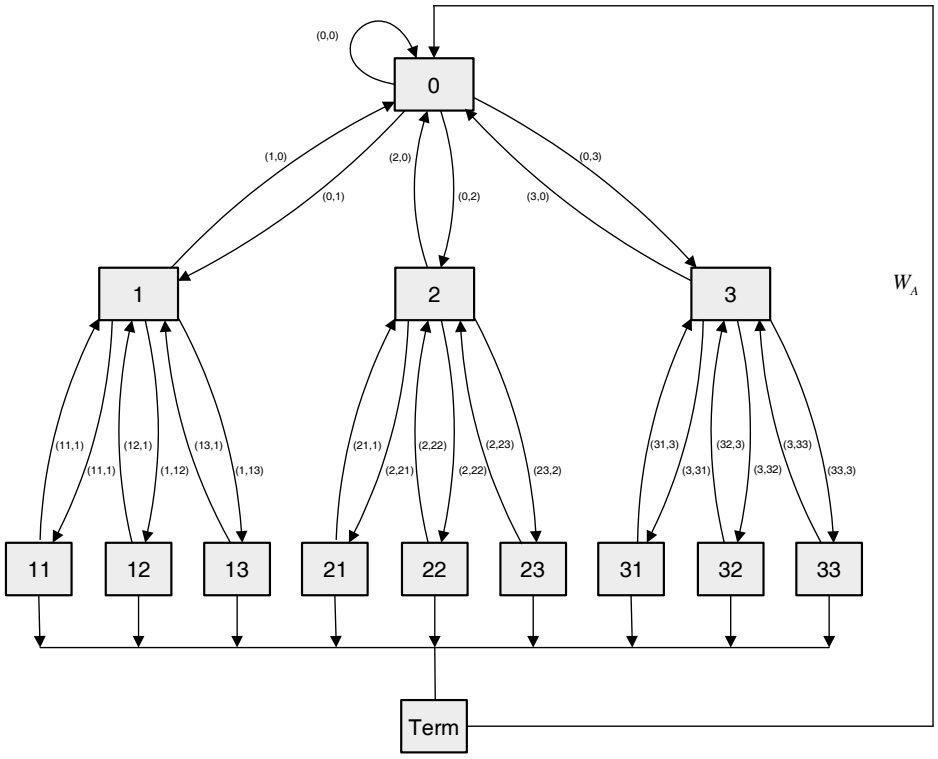


Рис. 5 Стохастическая сеть, описывающая обработку в иерархической системе

Математическое ожидание $T_{hier}^{\text{ож}}$ и среднеквадратическое отклонение σ_{hier} длительности обработки вычисляются аналитическим способом по формулам:

$$T_{hier}^{\text{ож}} = \left.\frac{\delta W_E(s)}{\delta s W_E(0)}\right|_{s=0} = 120{,}34 \text{ мин},$$

$$\sigma_{hier} = \sqrt{D_{hier}} = \sqrt{\left.\frac{\delta^2 M_E(s)}{\delta s^2 M_E(0)}\right|_{s=0}} = 48{,}58 \text{ мин}.$$

Для подтверждения результатов, полученных аналитическим путем, разработана имитационная модель на языке GPSS. В результате имитационного моделирования для данной иерархической системы получены $T_{hier}^{\text{имит}} = 121{,}81$ мин и $\sigma_{hier}^{\text{имит}} = 42{,}4$ мин.

Кроме того, часто необходимо определять гарантированное время выполнения всего объема работ в данных условиях с вероятностью $P_{\text{г}}$.

Так как схема обработки всей системы состоит из большого числа элементарных этапов обработки, то можно предположить, что общее время T обработки в иерархической системе распределено по нормальному закону:

$$P_{\text{реш}}(T) \approx \Phi^* \left(\frac{T - T_{hier}^{\text{ож}}}{\sqrt{D_{hier}}} \right) = \frac{1}{\sigma_{hier}\sqrt{2\pi}} \int_0^T e^{-0{,}5\left(\frac{t - T_{hier}^{\text{ож}}}{\sigma_{hier}} \right)} dt,$$

где Φ^* – интеграл вероятностей (функция Лапласа).

Гарантированная продолжительность обработки $T^{\text{г}}$ рассчитывается по формуле

$$T^{\text{г}} = T_{hier}^{\text{ож}} + k(P_{\text{г}})\sigma_{hier},$$

где k – коэффициент доверия, для нормального распределения

$$k(P_{\text{г}}) = \Phi^{-1}\left(\frac{P_{\text{г}} + 1}{2} \right),$$

$P_{\text{г}}$ – гарантированная вероятность своевременного выполнения обработки; Φ^{-1} – обратная функция нормального распределения вероятности.

Таким образом, разработан аналитический метод оценки параметров длительности обработки в иерархической системе, учитывающий параллельность обработки, случайную длительность отдельных работ, наличие сложных циклов с постоянными вероятностями повторения.

Использование данного метода позволяет на ранних стадиях разработки сложных автоматизированных систем более точно, по сравнению с методами сетевого планирования и управления, оценивать достигаемые параметры длительности обработки.

Список литературы

1. **Костогрызов, А. И.** Основы оценки, обеспечения и повышения качества выходной информации в АСУ организационного типа / А. И. Костогрызов, А. В. Петухов, А. М. Щербина. – М. : Вооружение. Политика. Конверсия, 1994. – 279 с.
2. **Мамиконов, А. Г.** Достоверность, защита и резервирование информации в АСУ / А. Г. Мамиконов, В. В. Кульба, А. Б. Шелков. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.
3. **Краснов, М. Л.** Вся высшая математика / М. Л. Краснов, Г. И. Макаренко, В. И. Заляпин. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – 5 т. – 296 с.
4. **Филлипс, Д.** Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 496 с.

УДК 681.324

С. А. Зинкин

СЕТИ АБСТРАКТНЫХ МАШИН ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ И СЕТЕЙ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ (БАЗОВЫЙ ФОРМАЛИЗМ И ЕГО РАСШИРЕНИЯ)

Рассматриваются проблемы интеграции формальных представлений распределенных процессов и объектов, взаимодействующих через общее структурированное пространство памяти. Предложен новый формализм для описания согласованных взаимодействий процессов и объектов в системах и сетях хранения и обработки данных, базирующийся на декларативном и процедурном подходах к представлению знаний о функционировании распределенных систем.

Введение

К настоящему времени разработан ряд технологий проектирования распределенных вычислительных систем, в том числе распределенных систем управления базами данных, систем управления промышленными объектами. Принципы построения программного обеспечения нередко скрыты от пользователя. Однако в последнее время наметилась тенденция создания такого сетевого программного обеспечения, в котором стираются грани между сетевой операционной системой, распределенной системой управления базой данных и распределенным приложением, а проект должен быть видим разработчику на всех этапах. Основным направлением решения поставленной задачи, расширяющим функциональность и улучшающим эксплуатационные характеристики проектируемой системы, является использование современных объектно- и агентно-ориентированных технологий и связанных с ними технологий согласования и координации объектов и процессов. На основе использования формальных методов в проектировании систем согласования и координации объектов и процессов в настоящей работе делается попытка создания методологии, которая позволила бы упростить переход к реализациям механизмов непосредственно исполняемых спецификаций систем хранения и обработки данных. Поставленная задача может быть решена путем создания сетевой операционной среды, адекватной решаемой задаче, т.е. сетевому приложению. Подобная среда должна обеспечить как обработку неструктурированной информации, так и выполнение операций над базами данных.

Определение базового формализма

При обсуждении принципов построения распределенных систем хранения и обработки данных рассматривается ряд парадигм, определяющих оригинальные методологии их логического проектирования. Среди известных принципов наиболее распространены нисходящее проектирование, функциональная декомпозиция, объектно-ориентированное программирование. Для концептуального представления принципов организации распределенных систем с целью выработки единых в концептуальном плане подходов в настоящей работе предлагается использовать формализм

сетей абстрактных машин, берущих свое начало от машин Колмогорова–Успенского–Шёнхаге [1–3] и Гуревича [4, 5]. При определении декларативной составляющей формализма используется понятие алгебраических систем (в смысле работ [6–9]) и логик высших порядков [10], а для представления процедурной составляющей используются некоторые элементы алгебры алгоритмов Глушкова [11, 12], в частности операции α-дизъюнкции и α-итерации для всюду определенных условий.

Сеть абстрактных машин (CeAM), или эволюционирующая многоосновная алгебраическая система (ЭМАС), определяется следующим набором:

$$N = \left(A_1, ..., A_n, \Sigma, F_{\mathrm{C}}, F_{\mathrm{Ob}}, P_{\mathrm{C}}, P_{\mathrm{Ob}}, I(t), I(t_0), \Sigma', F', P', J, \mu_a, U_{\mathrm{F}}, U_{\mathrm{P}}, M,\right.$$

$$\left.\Omega_{\mathrm{Top}}, \Omega_{\mathrm{Cop}}, L, \Omega_{\mathrm{Lop}}, \Phi, \mathrm{B}, \Omega_{\mathrm{B}}, \mu_{\mathrm{update}}, \mu_{\mathrm{test}}, \mu_{\mathrm{block}}, \mu_{\mathrm{B}}, \mu_{\mathrm{MB}}, \mu_{\mathrm{L}}, C, Q, W\right), \quad (1)$$

где $A_1, ..., A_n$ – непустые непересекающиеся множества (основы), на которых определены множества функций и предикатов, имена которых составляют «текущую» (с изменяющейся, или эволюционирующей, в процессе функционирования сети интерпретацией $I(t)$ функциональных и предикатных символов) и «статическую» (с неизменной интерпретацией) сигнатуры;

$A = \{A_1, \ ..., \ A_n\}$ – множество основ;

$\Sigma = F_{\mathrm{C}} \cup F_{\mathrm{Ob}} \cup P_{\mathrm{C}} \cup P_{\mathrm{Ob}} = F \cup P$ – каузально-объектная сигнатура $\left(F = F_{\mathrm{C}} \cup F_{\mathrm{Ob}}, P = P_{\mathrm{C}} \cup P_{\mathrm{Ob}}\right)$;

F_{C} – множество «каузальных» функций;

F_{Ob} – множество «объектных» функций;

P_{C} – множество «каузальных» предикатов;

P_{Ob} – множество «объектных» предикатов;

$I(t)$, $t \geq t_0$ – текущая интерпретация функциональных и предикатных символов, составляющих сигнатуру Σ;

$I(t_0)$, $t_0 \geq 0$ – начальная интерпретация функциональных и предикатных символов, составляющих сигнатуру Σ;

$\Sigma' = F' \cup P'$ – статическая сигнатура (с не изменяемой в процессе функционирования CeAM-интерпретацией функциональных символов из множества F' и предикатных символов из множества P');

J – интерпретация функциональных символов из множества F' и предикатных символов из множества P';

$\mu_a : (\Sigma \cup \Sigma') \to \{1, 2, ..., n_a\}$ – отображение арности, где $n_a = \mathrm{const}$; в процессе функционирования CeAM арности функций и предикатов остаются неизменными;

U_{F} – множество элементарных обновлений функций, сопоставленных функциональным символам из Σ;

U_{P} – множество элементарных обновлений предикатов, сопоставленных предикатным символам из Σ;

$U = U_{\mathrm{F}} \cup U_{\mathrm{P}}$ – система образующих алгебры модулей;

M – множество модулей CeAM, реализующих локальные преобразования (обновления) текущей интерпретации $I(t)$ сигнатуры Σ; под модулем

подразумевается СеАМ-выражение, не содержащее свободных вхождений предметных переменных;

Ω_{Top} – система темпоральных операций вида $\omega_{\text{Top}}: M \times M \to M$, принимающих значения в множестве модулей M;

Ω_{Cop} – система дополнительных операций вида $\omega_{\text{Cop}}: L \times M \times M \to M$ и $\omega'_{\text{Cop}}: L \times M \to M$ («управляющих конструкций» СеАМ), принимающих значения в множестве модулей M;

L – множество логических условий;

Ω_{Lop} – система логических операций вида $\omega_{\text{Lop}}: L \times L \to L$ и $\omega'_{\text{Lop}}: L \to L$, принимающих значения в множестве логических условий L;

Φ – множество атомарных формул (атомов) – система образующих алгебры логических условий;

B – множество блоков СеАМ;

Ω_{B} – множество операций, выполняемых в блоках модулей СеАМ;

$\mu_{\text{update}} : M \to \mathbf{P}(\Sigma) \setminus \varnothing$ – отображение, сопоставляющее каждому модулю подмножество функций и предикатов, которые им модифицируются, $\mathbf{P}$ – символ булеана;

$\mu_{\text{test}} : M \to \mathbf{P}(\Sigma) \setminus \varnothing$ – отображение, сопоставляющее каждому модулю подмножество функций и предикатов, которые им проверяются;

$\mu_{\text{block}} : M \to \mathbf{P}(\Sigma) \setminus \varnothing$ – отображение, сопоставляющее каждому модулю подмножество функций и предикатов, с которыми оперирует данный модуль, причем

$$(\forall m \in M)\left(\mu_{\text{block}}(m) = \mu_{\text{update}}(m) \cup \mu_{\text{test}}(m)\right)$$

(в общем случае для корректной работы сети функции и предикаты, с которыми оперирует конкретный модуль, должны быть временно заблокированы в целях недопущения нежелательных взаимоблокировок конкурирующих модулей);

$\mu_B : B \to \mathbf{P}(U_{\text{F}} \cup U_{\text{P}}) \setminus \varnothing$ – отображение, ставящее в соответствие каждому блоку подмножество совместимых элементарных обновлений сигнатуры Σ;

$\mu_{\text{MB}} : M \to \mathbf{P}(B) \setminus \varnothing$ – отображение, сопоставляющее каждому модулю СеАМ подмножество реализуемых им блоков;

$\mu_{\text{L}} : M \to \mathbf{P}(L) \setminus \varnothing$ – отображение, сопоставляющее каждому модулю подмножество проверяемых им логических условий;

C – отношение каузации, представленное областью истинности одноименного предиката. Этот предикат определяется следующим образом:

$$\text{C}\left(m_i, m_j\right) = p_{\text{inter}}\left(\mu_{\text{update}}(m_i), \mu_{\text{test}}(m_j)\right),$$

где

$$p_{\text{inter}}\left(\mu_{\text{update}}(m_i), \mu_{\text{test}}(m_j)\right) = \begin{cases} \text{true}, & \text{если} \quad \mu_{\text{update}}(m_i) \cap \mu_{\text{test}}(m_j) \neq \varnothing, \\ \text{false}, & \text{если} \quad \mu_{\text{update}}(m_i) \cap \mu_{\text{test}}(m_j) = \varnothing. \end{cases}$$

Для сети N может быть дополнительно задана следующая пара множеств:

Q – множество предикатов вида q: $M \to \{\text{true, false}\}$, характеризующих рабочее или нерабочее состояние модулей из множества M; данные предикаты не могут модифицироваться никакими модулями и используются только в формулах логических условий из множества L для проверки фактов исполнения некоторых модулей в текущий момент времени;

W – множество предикатов вида w: $M \to \{\text{true, false}\}$, используемых для «внешнего» или «внутреннего» управления текущей конфигурацией сети N: в процессе функционирования сети из нее могут исключаться некоторые модули либо они снова могут подключаться к сети; такие манипуляции с сетью могут осуществляться модулями с помощью включаемых в блоки правил обновления предикатов из множества W.

Примечание. Для удобства при описании операционной семантики сетей в дальнейшем мы будем использовать понятие S-пространства, объединяющего в одно множество $S = F \cup P$ множества функций F и предикатов P.

Для используемых в логико-алгебраических моделях функций вида

$$f : A_{i1} \times A_{i2} \times ... \times A_{in} \to A_j$$

и предикатов вида

$$p : A_{i1} \times A_{i2} \times ... \times A_{in} \to \{\text{true, false}\}$$

введем дополнительно следующие (статические) функции:

$f_a(q)$ – функция арности предикатного или функционального символа q;

$\sigma_f(f)$, $\sigma_p(p)$ – функции типов функционального f или предикатного p символов соответственно (в многосортных или многоосновных системах тип n-арного предикатного символа – это кортеж $(i_1, i_2, ..., i_n, j)$, а тип n-арного предикатного символа – это кортеж $(i_1, i_2, ..., i_n)$, где $i_1, i_2, ..., i_n, j$ – названия (сорта) для основ или носителей);

$\pi_i(p)$ – функция проекции по i-й предметной переменной в области истинности n-арного предиката p;

$\sigma_{fp}(f)$ – функция, ставящая в соответствие n-арной функции f $(n+1)$-арный предикат p.

Рассматриваемые нами абстрактные машины отличаются от других тем, что их память состоит не из элементарных ячеек, а из некоторых структур.

Известно, что при изучении алгебраических систем становится возможным сочетать как алгебраические, так и логические понятия и методы. При этом рассматривается язык $L(F, P)$, алфавит которого содержит счетное число переменных $x_1, x_2, ..., x_n, ...$ функциональные символы из F, предикатные символы из P, символ равенства, логические связки, кванторы всеобщности и существования. Формулы и термы составляются по известным в многосортном исчислении предикатов первого и высших порядков [6–10] правилам. Отличительной особенностью предлагаемого формализма является использование термов вида

$$(\tilde{\exists}!x \in X)p(x),\ (\tilde{\exists}!!x \in X)p(x),\ (\tilde{\forall}x \in X)p(x),\ (\tilde{\forall}!!x \in X)p(x) \qquad (2)$$

в блоках и в α-выражениях модулей СеАМ (т.е. в записи формул для логических условий в операциях α-дизъюнкции и α-итерации). Назовем данные операторы квантифицированными операторами выбора кортежей из областей истинности n-арных $(n \geq 1)$ предикатов. Например, в случае применения введенных операторов к бинарным предикатам соответствующие термы будем записывать в следующем виде:

$$\begin{gathered}\left(\tilde{\exists}!x \in X, y \in Y\right) q(x, y),\ \left(\tilde{\exists}!!x \in X, y \in Y\right) q(x, y), \\ \left(\tilde{\forall} x \in X, y \in Y\right) q(x, y),\ \left(\tilde{\forall}!!x \in X, y \in Y\right) q(x, y).\end{gathered} \tag{3}$$

Рассмотрим группу термов (2). Результатом выполнения оператора $\tilde{\exists}!$ является единственное значение предметной переменной x, выбранное произвольным образом из области истинности унарного предиката p. Оператор $\tilde{\exists}!!$ выбирает значение x при условии, что оно является единственным в области истинности унарного предиката p. Оператор $\tilde{\forall}$ позволяет выбрать все значения переменной x из области истинности предиката p. Оператор $\tilde{\forall}!!$ выбирает все значения переменной x из области истинности предиката p при условии, что эта область совпадает с областью определения данного предиката. Выбранные значения для обоих операторов составляют результирующие унарные отношения.

Одноименные операторы в термах, заданных выражениями (3), выполняют аналогичные действия над бинарными предикатами. В результате вычисления термов $\left(\tilde{\exists}!x \in X, y \in Y\right) q(x, y)$ и $\left(\tilde{\exists}!!x \in X, y \in Y\right) q(x, y)$ находятся по одному кортежу, а результатами вычисления термов $\left(\tilde{\forall} x \in X,\ y \in Y\right)\ q(x, y)$ и $\left(\tilde{\forall}!!x \in X, y \in Y\right) q(x, y)$ являются отношения. Результаты вычисления термов обеих групп используются в блоках согласованных обновлений интерпретации сигнатуры $\sum$. Аналогично определяются и n-арные квантифицированные операторы выбора.

В термах вида (2), если это специально оговорено, переменная x может пробегать по кортежам некоторого n-арного отношения, представленного областью истинности соответствующего предиката. Для выбора i-го элемента кортежа x в этом случае необходимо использовать операцию проекции $pr_i(x)$, $i = 1, 2, ..., n$.

Ю. Гуревичем [4, 5] предложено использовать в машинах абстрактных состояний специальные операции – элементарные обновления функций и предикатов. Элементарное правило обновления функции или предиката запишем в виде правила вывода

$$\frac{t_1, t_2, ..., t_k, t_{k+1}}{s(t_1, t_2, ..., t_k) \leftarrow t_{k+1}}, \tag{4}$$

где $t_1, t_2, ..., t_k$ – термы различных сортов, в том числе термы, определенные выражениями (2); 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} – булево выражение.

Расширение базового формализма

В отличие от модели Ю. Гуревича, мы допускаем использование в блоках согласованных обновлений операций реляционной алгебры, рассматривая каждое алгебраическое выражение как функцию, которая отображает множество отношений в одно отношение (отношения определены областями истинности одноименных предикатов с именами из $\sum$). Символы операторов реляционной алгебры в нашем случае являются сокращающими символами для обозначения множества согласованных обновлений интерпретации сигнатуры $\sum$. Другим отличием является возможность использования элементов исчисления предикатов высших порядков.

В отличие от обычных термов, используемых в многоосновном исчислении предикатов, значения термов с квантифицированными операторами выбора $\tilde{\exists}!$, $\tilde{\exists}!!$, $\tilde{\forall}$, $\tilde{\forall}!!$ не всегда могут быть вычислены, т.е. не удается осуществить выбор ни одного кортежа из области истинности некоторого предиката. В этом случае будем считать, что данный оператор выполняет «тождественное» обновление R^E, т.е. он не вносит ни одного изменения в интерпретацию сигнатуры $\sum$. Дадим попутно еще одно определение модуля как замкнутого выражения в алгебре модулей, все вхождения переменных в котором связаны обычными кванторами или квантифицированными операторами выбора.

Дополним сигнатуру $\sum$ выражениями следующего вида:

$$\varphi_i : D_{i_1} \times D_{i_2} \times ... \times D_{i_k} \to D_{i_{k+1}},$$
$$\psi_j : D_{j_1} \times D_{j_2} \times ... \times D_{j_r} \to \{\text{true}, \text{false}\},$$

где символами D_q с соответствующими индексами обозначены множества $A_q \in A$ или булеаны $\mathbf{P}(A_q)$, $q = 1, 2, ..., n$. Подобное дополнение позволяет более компактным образом представлять групповые связи между объектами в логико-алгебраических моделях дискретных систем.

Для обеспечения возможности изменения групповых связей множества правил U_{F} и $\mathrm{U_P}$ обновления интерпретации текущей сигнатуры $\sum$ необходимо дополнить правилами вида (4), где значениями некоторых термов могут быть элементы булеанов множеств $A_q \in A$, $q = 1, 2, ..., n$.

Данное расширение СеАМ особенно удобно использовать для спецификации групповых операций, выполняемых в сетях хранения и обработки данных. Для таких сетей характерны операции, затрагивающие множество узлов, сообщений, каналов передачи данных, баз данных.

Основные виды сетей абстрактных машин

Выражения для модулей абстрактных машин предлагается использовать в качестве основы для создания системы исполняемых спецификаций, реализуемых аппаратно или программно в сетевой среде. В зависимости от характеристик среды реализации сетевого приложения может быть выбрана различная сложность заданных с помощью формализма СеАМ спецификаций. В этой связи определим следующие разновидности СеАМ.

1. СеАМ I рода. В выражениях для модулей не используются квантифицированные операторы выбора; в блоках допускается лишь одна темпоральная операция «|» (возможно одновременное выполнение согласованных элементарных правил обновления интерпретации сигнатуры ЭМАС); $\Omega_{\mathrm{Top}} = \varnothing$, т.е. в явной форме темпоральные операции не вводятся (вместо них определены каузальные (причинно-следственные) связи модулей через общую часть интерпретации сигнатуры $\sum$); множество операций Ω_{Cop} содержит единственную тернарную операцию из алгебры алгоритмов Глушкова – «α-дизъюнкцию» вида $Op_1 : L \times M \times M \to M$.

2. СеАМ II рода. В отличие от сетей СеАМ I рода, здесь в выражениях для модулей могут использоваться квантифицированные операторы выбора.

3. СеАМ III рода отличаются от СеАМ II рода тем, что в блоках модулей разрешены 3 операции: упомянутая ранее операция «|», операция «$\uparrow$» – непосредственное следование правил обновления интерпретации сигнатуры, и операция «$\updownarrow$» неодновременного выполнения правил. Для удобства чаще будем использовать упрощенные обозначения для указанных в предыдущем предложении темпоральных операций: «,», «;» и «:» соответственно.

Во всех трех предыдущих разновидностях СеАМ темпоральные операции используются лишь в блоках, причем в блоках разрешено применение только элементарных правил обновления интерпретации сигнатуры $\sum$ и реляционных операторов. Использование выражений общего вида для модулей в блоках не допускается.

4. СеАМ IV рода допускают использование квантифицированных операторов выбора, множество Ω_{Top} содержит набор темпоральных операций. Данный набор при необходимости может быть расширен. Далее, $\Omega_{\mathrm{B}} = \Omega_{\mathrm{Top}} \cup \Omega_{\mathrm{Cop}}$, т.е. в блоках допустимы темпоральные и дополнительные операции над модулями в полном объеме. Множество Ω_{Cop} содержит, помимо α-дизъюнкции, бинарную операцию «α-итерация» из алгебры алгоритмов Глушкова: $Op_2 : L \times M \to M$. СеАМ IV рода назовем «расширенными» или «развитыми» (РСеАМ).

Использование основных идей из алгебры алгоритмов Глушкова, например суперпозиций темпоральных и дополнительных операторов, позволяет естественным образом проектировать сложные иерархические расширенные сети абстрактных машин (ИРСеАМ). В этой связи имеет смысл выделить два класса сетей абстрактных машин. В относительно простых сетях первого класса подсети, или модули РСеАМ, начиная с тривиальных подсетей – элементарных обновлений интерпретации текущей сигнатуры, составляющих систему образующих, участвуют в операциях однократно. В сложных сетях второго класса допускается многократное участие указанных подсетей – модулей РСеАМ в произвольных суперпозициях подсетей. В обоих случаях формируются иерархические сети.

В дальнейшем будет часто использоваться общая аббревиатура СеАМ для обозначения технологии или реализации сетей, если это не противоречит контексту; там же, где следует различать конкретные виды выражений, описывающих сети абстрактных машин, будем использовать аббревиатуры СеАМ, РСеАМ и ИРСеАМ.

На основании изложенного дадим следующие определения для сетей СеАМ и РСеАМ.

Определение 1. Модуль сети называется n-арным, если выражение, которым он описан, содержит по крайней мере один n-арный предикатный или функциональный символ, входящий в локальную сигнатуру этого модуля и других предикатных и функциональных символов более высокой арности нет.

Определение 2. Сеть называется n-арной, если она содержит по крайней мере один n-арный модуль и других модулей более высокой арности нет.

Определение 3. Сеть называется семафорной (унарной), если она содержит только унарные модули.

Определение 4. Сеть имеет n-й порядок, если при описании по крайней мере одного модуля используется логика n-го порядка и логика более высоких порядков не используется.

Определение 5. Сеть является n-сортной, или n-основной, если $|A| = n$, где A – множество основ (основных множеств).

Определение 6. Модуль – это абстрактная СеАМ(РСеАМ)-машина, интерпретирующая замкнутое СеАМ(РСеАМ)-выражение (выражение, не содержащее свободных предметных переменных) и модифицирующая локальные функции и предикаты, составляющие текущую интерпретацию некоторого подмножества символов из сигнатуры Σ .

Определение 7. Сеть называется сетью первого класса, если при ее формировании допускается лишь однократное участие ее компонент в операциях из $\Omega_{\text{Top}} \cup \Omega_{\text{Cop}} \cup \Omega_{\text{B}}$ (темпоральных операциях из множества Ω_{Top}, дополнительных операциях из множества Ω_{Cop} и блочных операциях из множества Ω_{B}).

Определение 8. Сеть называется сетью второго класса, если при ее формировании допускается многократное участие подсетей в заданных операциями Ω_{Top}, Ω_{Cop} и Ω_{B} в произвольных суперпозициях подсетей.

Примечание. Определения 1–6 относятся к сетям СеАМ, а определения 1–8 – к сетям РСеАМ.

Сети абстрактных машин и логика высших порядков

Выше рассмотрены сети абстрактных машин, выражения для модулей которых основаны на исчислении первого порядка. Кванторы в таком исчислении и введенные нами квантифицированные операторы выбора могут связывать только предметные переменные, но не могут связывать функторы или предикаты. В логике предикатов второго порядка дополнительно вводятся переменные, пробегающие по признакам индивидов – их свойствам и отношениям между ними. Данные переменные можно связывать кванторами, получая выражения вида $(\forall p \in P)A$ – «для всякого свойства p верно, что A», $(\exists r \in P)A$ – «существует отношение r такое, что A». В логике предикатов третьего порядка используется квантификация по признакам признаков индивидов и т.д. [10].

Расширим выразительные возможности формализма СеАМ путем допущения квантификации по признакам и признакам признаков индивидов, что позволяет осуществить более гибкое управление взаимодействием моду-

лей через общую сигнатуру $\sum$. Например, при реализации модуля СеАМ ВП (высшего порядка)

$$m_{\text{ВП}} = \left[(\tilde{\exists}!x \in X)\, p(x)\right]\left(\left[(\tilde{\exists}!y \in Y)\, q(y)\right]\left(\left[(\tilde{\exists}!s \in \Sigma)\, s(x, y)\right]\right.\right.$$
$$\left.\left.\left(\{\ldots s(x, y) \leftarrow \text{false} \ldots\} \vee R^E\right) \vee R^E\right) \vee R^E\right) \tag{5}$$

сначала выбирается некоторое значение x_i предметной переменной x из области истинности унарного предиката p, затем аналогичным образом выбирается значение y_j предметной переменной y. На последнем этапе интерпретации выражения (5) в сигнатуре $\sum$ отыскивается такое отношение s, что имеет место $s\left(x_i, y_j\right)$, а затем в блоке модуля (запись в фигурных скобках) эта связь между объектами x_i и y_j аннулируется. В выражении (5) три оператора «подчеркивания» подразумеваются по умолчанию, т.к. логические α-выражения (α-условия) содержат только подчеркнутые термы. Поскольку в выражении (5) первые два квантифицированные оператора выбора не зависят друг от друга, выражение (5) может быть записано в следующем эквивалентном виде:

$$m_{\text{ВП}} = \left[\underline{(\tilde{\exists}!x \in X)\, p(x)}\ \&\ \underline{(\tilde{\exists}!y \in Y)\, q(y)}\right]\left(\left[(\tilde{\exists}!s \in \Sigma) s(x, y)\right]\right.$$
$$\left.\left(\{\ldots s(x, y) \leftarrow \text{false} \ldots\} \vee R^E\right) \vee R^E\right). \tag{6}$$

В последнем выражении (6) операторы «_» позволяют «сформировать» пару атомарных формул, объединенных в первое α-условие символом конъюнкции. На выполнение операций поиска значений предметных переменных x и y операторы «_» не влияют.

Выводы

1. На основе интеграции формальных представлений распределенных процессов и объектов, взаимодействующих через общее структурированное пространство памяти, предложен новый формализм для описания согласованных взаимодействий процессов и объектов, базирующийся на декларативном и процедурном подходах к представлению знаний о функционировании распределенных систем.

2. Данный формализм может быть положен в основу технологии проектирования распределенных систем хранения и обработки данных, а сами формальные представления могут непосредственно интерпретироваться в узлах вычислительной сети.

3. Предложен алгебраический подход к определению операционной семантики распределенных систем хранения и обработки данных, основанный на описании данных систем сетями абстрактных машин, при определении которых используется логика предикатов высших порядков. Данный подход дает возможность построения сложных иерархических сетей абстрактных машин и при необходимости позволяет использовать мощные аппараты алгебры алгоритмов и эволюционирующих алгебраических систем.

Список литературы

1. **Gurevich, Y.** On Kolmogorov machines and related issues. The logic in computers science column / Y. Gurevich // Bulletin of Europian Assoc. for Theor. Comp. Science. – 1998. – № 35. – P. 71–82.
2. **Dexter, S.** Gurevich abstract state machines and Shönhage storage modification machines / S. Dexter, P. Doyle, Y. Gurevich // Journal of Universal Comp. Science. – 1997. – V. 3. – № 4. – P. 279–303.
3. **Григорьев, Д. Ю.** Алгоритмы Колмогорова сильнее машин Тьюринга / Д. Ю. Григорьев // Зап. науч. семинаров Ленинград. отд. матем. ин-та АН. – 1979. – № 88. – С. 15–18.
4. **Gurevich, Y.** Evolving Algebras 1993: Lipari Guide, Specification and Validation Methods, ed. E. Börger / Y. Gurevich // Oxford University Press. – 1995. – P. 9–36.
5. **Gurevich, Y.** Draft of the ASM Guide / Y. Gurevich // University of Michigan EECS Department Technical Report CSE-TR-336-97. – 1997. – May. – P. 1–27.
6. **Плоткин, Б. И.** Универсальная алгебра, алгебраическая логика и базы данных / Б. И. Плоткин. – М. : Наука, 1991. – 448 с.
7. **Плесневич, Г. С.** Логические модели / Г. С. Плесневич // Искусственный интеллект : в 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы : справочник / под ред. Д. А. Поспелова. – М. : Радио и связь, 1990. – С. 14–28.
8. **Ершов, Ю. Л.** Математическая логика / Ю. Л. Ершов, Е. А. Палютин. – М. : Наука, 1979. – 320 с.
9. **Артамонов, В. А.** Общая алгебра / В. А. Артамонов, В. Н. Салий, Л. А. Скорняков [и др.]. – М. : Наука, 1991. – 480 с.
10. **Маркин, В. И.** Логика предикатов / В. И. Маркин // Новая философская энциклопедия : в 4-х т. – М. : Мысль, 2000. – 2 т.
11. **Глушков, В. М.** Алгебра. Языки. Программирование / В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, Е. Л. Ющенко. – Киев : Наукова думка, 1978. – 320 с.
12. **Глушков, В. М.** Методы символьной мультиобработки / В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, Е. Л. Ющенко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 252 с.

УДК 519.7

В. Н. Дубинин, Х.-М. Ханиш, Д. Миссал

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕВЕРСИВНЫХ ЧАСТИЧНО МАРКИРОВАННЫХ *SNCES*-СЕТЕЙ

В данной работе предлагаются методы интерпретации реверсивных частично маркированных безопасных *NCES*-сетей (*RsNCES*-сетей), основанные на представлении сетевых моделей в виде булевых функций и их последующей минимизации. Приведен алгоритм построения графа достижимости для *RsNCES*-сетей.

Введение

Первоначально *NCES*-сети (*Net Condition/Event Systems*) были определены в работе [1]. Они представляют расширенные сети Петри [2], ориентированные на моделирование дискретных событийных систем, в которых взаимодействие основано на обмене сигналами. В *NCES*-сетях возможно моделирование сигналов как в виде импульса, так и в виде потенциала. Наиболее важным расширением в *NCES*-сетях являются событийные дуги, участвующие в определении множеств переходов, называемых шагами, в которых переходы срабатывают одновременно. Таким образом, в отличие от классических сетей Петри, в *NCES*-сетях допускается как асинхронное, так и синхронное срабатывание переходов.

В работе [3] было предложено обратное срабатывание шагов в *NCES*-сетях для синтеза контроллеров, ряд проблем в этой области также исследовался в [4]. В работе [5] неформально рассмотрены некоторые вопросы обратного срабатывания шагов в безопасных *NCES*-сетях (*sNCES*-сетях). Дальнейшее развитие принцип обратного срабатывания в *sNCES*-сетях получил в работе [6], в которой формально были определены реверсивные частично маркированные *sNCES*-сети (*RsNCES*-сети). В отличие от прежних работ [3–5], в которых отдельно рассматриваются *NCES*-сети и обратный поиск в них, в данной работе соответствующие сетевые модели выделены в особый класс, имеющий собственные правила функционирования. Основные методы исследования *NCES*-сетей изложены в работе [7]. В ней проработаны вопросы структурного анализа, поиска *P*- и *T*-инвариантов, а также построения графа достижимости.

Настоящая работа выполнена в рамках разработки методов исследования *RsNCES*-сетей. В ней предлагаются методы интерпретации *RsNCES*-сетей класса *A*2*B*2 (как наиболее общего класса), которые могут использоваться, например, для построения графа достижимости. Под интерпретацией *RsNCES*-сетей в данной работе понимается имитация их функционирования (обычно на каком-либо вычислительном устройстве). Основной задачей в процессе интерпретации является вычисление маркировок и шагов. Как показано в данной статье, интерпретация *RsNCES*-сетей во многом основывается на представлении сетевых моделей в виде булевых функций и их последующей минимизации.

1. Вычисление минимального покрывающего множества маркировок

Нахождение минимальных покрывающих множеств является одной из важных задач при интерпретации *RsNCES*-сетей. При этом используется два

вида этой задачи: 1) нахождение минимального покрывающего множества переходов (при вычислении усеченных допустимых шагов); 2) нахождение минимального покрывающего множества маркировок (МПММ) (при вычислении минимальных запрещающих контекстных маркировок (ЗКМ), а также множества достижимых маркировок). В данном разделе рассматривается второй тип задачи как наиболее общий.

Пусть задано множество маркировок $SM = \{m_1, m_2, \ldots, m_q\}$, описывающее некоторую ситуацию. Необходимо найти МПММ для множества *SM*. Сведем задачу нахождения МПММ для множества *SM* к задаче минимизации соответствующей булевой функции. Для этого представим множество маркировок *SM* в виде ДНФ булевой функции. Имеется два близких подхода для представления некоторой маркировки (в общем случае – частичной) в виде булевой функции. Согласно первому подходу каждая определенно маркированная позиция p_i представляет булеву переменную, а согласно второму – высказывание вида $ZP_i = [m(p_i) = 1]$ [5]. Маркировка $m(p_i) = 0$ позиции p_i соответствует высказыванию с отрицанием ($\overline{ZP_i}$ или ZP_i^0), а $m(p_i) = 1$ – без отрицания (ZP_i или ZP_i^1). Неопределенно маркированные позиции (т.е. позиции с маркировкой, равной *) при построении булевой функции не учитываются.

Каждая маркировка m_j представляется в виде конъюнкта вида $ZM_j = ZP_{k_1}^{\sigma_1} \,\&\, ZP_{k_2}^{\sigma_2} \,\&\, \ldots \,\&\, ZP_{k_n}^{\sigma_n}$, где n – число определенно маркированных позиций в маркировке m_j, $\sigma_i \in \{0,1\}$, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Для представления всех маркировок из множества *SM* используется булева функция $ZSM = ZM_1 \vee ZM_2 \vee \ldots \vee ZM_q$. Истинность этой функции интерпретируется как факт нахождения системы в ситуации, описанной множеством маркировок *SM*. Иными словами, если функция *ZSM* истинна, то соответствующая маркировка *RsNCES*-сети принадлежит множеству маркировок *SM*.

Полученную булеву функцию *ZSM* можно минимизировать одним из известных методов [8, 9]. Результирующая функция в виде ДНФ будет представлять МПММ. Это утверждение довольно очевидно и не требует доказательств. Каждый конъюнкт в данной минимальной ДНФ будет представлять отдельную минимальную покрывающую маркировку. Следует заметить, что множество минимально конкретизированных маркировок и МПММ, соответствующие некоторому множеству маркировок, в общем случае не совпадают.

2. Вычисление допустимых шагов для триггерного перехода

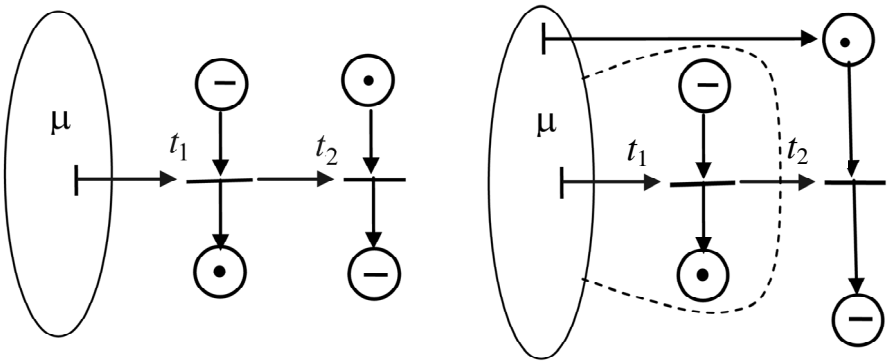
Нахождение конфигураций допустимых шагов при заданной маркировке предполагает решение следующих двух задач: 1) нахождение всех усеченных допустимых шагов (УДШ); 2) нахождение всех минимальных запрещающих контекстных маркировок (ЗКМ) для заданного шага. Предлагается трехэтапное построение всех УДШ для триггерного перехода. На первом этапе строятся все полные допустимые шаги (ПДШ), на втором этапе из полученных полных шагов удаляются граничные несущественные переходы и, таким образом, строятся не полностью усеченные допустимые шаги (НПУДШ), на третьем этапе строятся собственно УДШ.

2.1 Вычисление полных и не полностью усеченных допустимых шагов

Основная идея метода построения всех ПДШ для триггерного перехода заключается в последовательном расширении некоторого начального ПДШ.

Переход t может быть добавлен в новый допустимый шаг μ', если он обладает следующими свойствами: 1) если он является допустимым в шаге μ'; 2) не принадлежит предыдущему шагу μ; 3) не является конфликтным и/или взаимоисключающим с переходами предыдущего шага μ; 4) если это *AND*-переход, то все его входные переходы должны принадлежать предыдущему шагу μ. Если это *OR*-переход, то хотя бы один из его входных переходов должен принадлежать предыдущему шагу μ; 5) если он не принадлежит множеству безусловно допустимых переходов (при маркировке m), за которыми следуют недействительные переходы.

На рисунке 1,а представлен пример перехода t_1, который не может быть включен в допустимый шаг, поскольку переход t_2 является недействительным. В то же время переход t_1 на рисунке 1,б может быть включен в допустимый шаг, т.к. переход t_2 не относится к классу недействительных переходов из-за того, что его входная позиция является граничной.



а) б)

Рис. 1 Допустимый шаг μ не может (а) и может (б) быть расширен переходом t_1

Важным условием для того, чтобы полученный шаг оказался допустимым, является наличие среди переходов шага хотя бы одного безусловно допустимого перехода.

Для определения НПУДШ среди ПДШ, вычисленных на предыдущем этапе, используется следующая процедура:

$$R2 = \varnothing;\ \forall \mu \in R1:\ \text{ЕСЛИ}\ \forall t \in \mu_F\ [\text{permitted2}(t)],\ \text{ТО}\ R2 = R2 \cup \{\mu\},$$

где $R1$ – множество ПДШ; $R2$ – множество НПУДШ.

НПУДШ определяются путем анализа множества $\mu_F \subseteq \mu$, представляющего граничные переходы допустимого шага μ, все выходные событийные дуги которых ведут за пределы шага. Если все переходы t этого множества являются безусловно допустимыми (permitted2(t)), то рассматриваемый шаг добавляется к множеству $R2$.

В качестве примера рассмотрим построение ПДШ для *RsNCES*-сети, приведенной на рисунке 2. В представленной сетевой модели переход t_1 является триггерным. Переход t_4 имеет ИЛИ-логику. Все возможные ПДШ представлены ниже: $\mu_1 = \{t_1\}$; $\mu_2 = \{t_1,t_2\}$; $\mu_3 = \{t_1,t_2,t_4\}$; $\mu_4 = \{t_1,t_2,t_4,t_5\}$; $\mu_5 = \{t_1,t_2,t_4,t_5,t_6\}$; $\mu_6 = \{t_1,t_2,t_4,t_6\}$; $\mu_7 = \{t_1,t_3\}$; $\mu_8 = \{t_1,t_3,t_4\}$; $\mu_9 = \{t_1,t_3,t_4,t_6\}$; $\mu_{10} = \{t_1,t_3,t_4,t_9\}$ и $\mu_{11} = \{t_1,t_3,t_9\}$. Из них НПУДШ являются μ_1, μ_4, μ_5, μ_6 и μ_9.

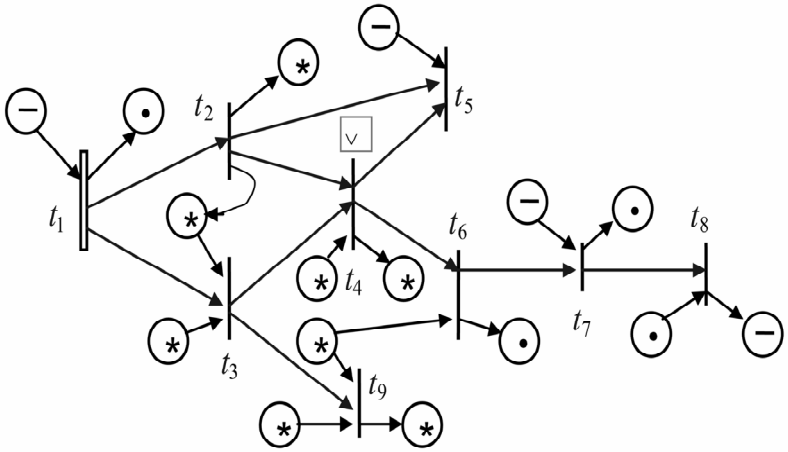


Рис. 2 Пример *RsNCES*-сети для построения допустимых шагов

Граф достижимых шагов изображен на рисунке 3. Вершины данного графа представляют достижимые ПДШ, а дуги представляют отношение непосредственной достижимости шагов. Дуги помечены переходами. Если дуга (μ_i, μ_j) помечена переходом t_k, то это означает, что шаг μ_j получается из шага μ_i путем добавления к нему перехода t_k. Граф достижимых шагов является ациклическим. Путь из начального (пустого) шага μ_0 до искомого определяет искомый шаг единственным образом. Объединение переходов, помечивающих дуги пути графа, образует собственно шаг. Например, путь в графе из вершины μ_0 до вершины μ_4 определяет шаг $\{t_1,t_2,t_4,t_5\}$. НПУДШ в графе отмечены двойными окружностями.

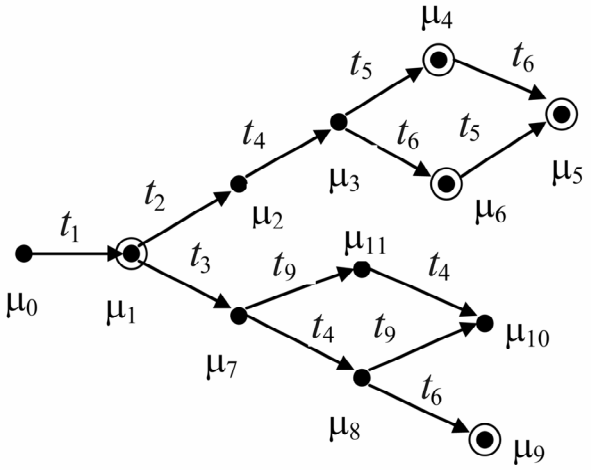


Рис. 3 Граф достижимых шагов для *RsNCES*-сети, представленной на рисунке 2

После выполнения двух первых этапов построения допустимые шаги могут содержать внутренние несущественные переходы. Например, переход t_2 на рисунке 4 является внутренним несущественным и может быть без ущерба удален из допустимого шага $\{t_1,t_2,t_3,t_4\}$, поскольку он не влияет на срабатывание остальных переходов этого шага.

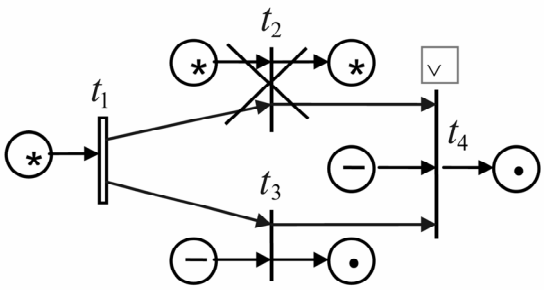


Рис. 4 Внутренний несущественный переход t_2 может быть удален из шага $\{t_1,t_2,t_3,t_4\}$

2.2 Вычисление усеченных допустимых шагов

Ниже предлагается метод построения УДШ на основе НПУДШ. Суть метода заключается в построении минимального покрывающего множества для неопределенных переходов НПУДШ.

Пусть выделено множество неопределенных переходов T_u^{μ} допустимого шага μ. Покрывающим множеством для данного множества T_u^{μ} называется такое его подмножество, которое образует некоторый допустимый шаг со всеми безусловно допустимыми переходами шага μ. Минимальным покрывающим множеством для данного множества T_u^{μ} называется такое покрывающее множество, что удаление его любого элемента выводит это множество из класса покрывающих множеств.

Данный метод реализуется на основе представления событийного графа для НПУДШ в виде соответствующей булевой функции с последующей ее минимизацией. Ниже представлена методика построения УДШ.

Шаг 1. Построить событийный граф для НПУДШ. В него войдут только переходы этого шага и событийные дуги между этими переходами. Формальное определение событийного графа можно найти в работе [10]. На рисунке 5,б приведен событийный граф для вычисления УДШ на основе НПУДШ $\{t_1,t_2,t_3,t_4,t_5\}$ в *RsNCES*, представленной на рисунке 5,а.

Шаг 2. Представить каждый неопределенный переход t_i в виде булевой функции, причем входные переходы перехода t_i принимаются как булевы аргументы без отрицания. К каждой функции добавляется один логический аргумент x_i, определяющий признак вхождения перехода t_i в искомое решение. Выполняемая логическая операция соответствует типу перехода (∨ или &) (рис. 6).

Каждый безусловно допустимый переход представляется аналогичным образом, но дополнительный аргумент x_i не используется. Для триггерного перехода булева функция не составляется.

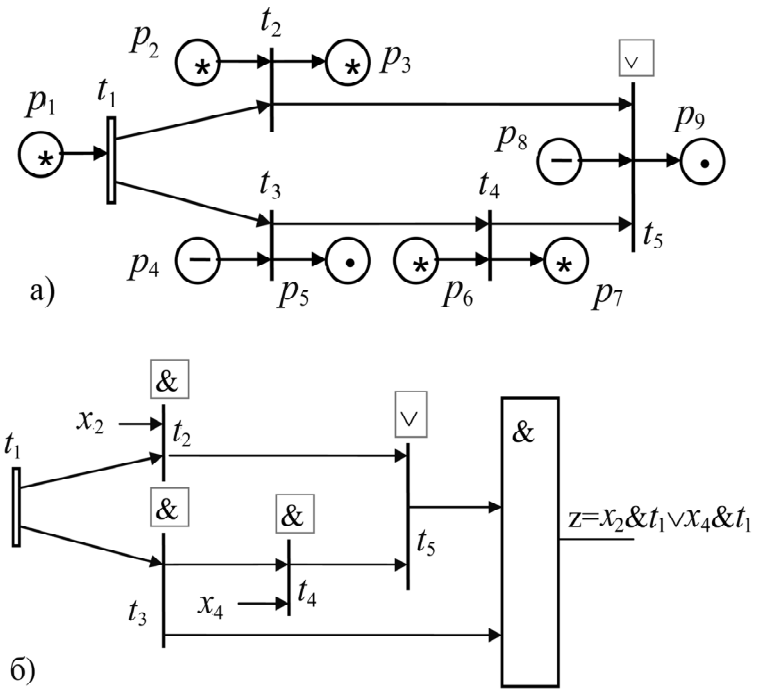


Рис. 5 Событийный граф (б) для вычисления УДШ на основе НУПДШ $\{t_1,t_2,t_3,t_4,t_5\}$ в *RsNCES*-сети (а)

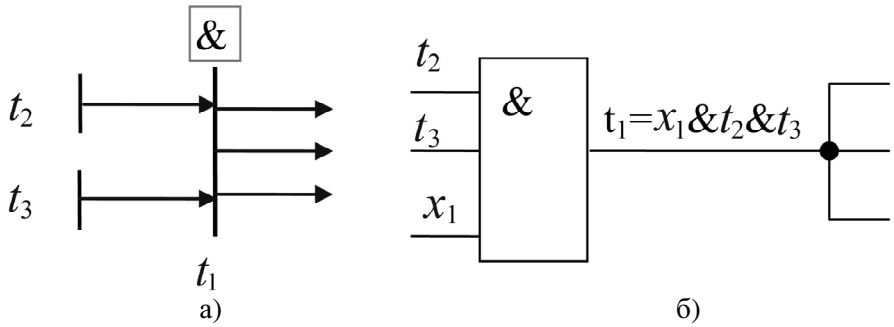


Рис. 6 Представление неопределенного перехода (а) в виде логического элемента и булевой функции (б)

Для событийного графа, соответствующего сетевой модели на рисунке 5,б, набор булевых функций будет следующим: $t_2 = x_2t_1$; $t_3 = t_1$; $t_4 = x_4t_3$; $t_5 = t_2 \vee t_4$.

Шаг 3. Ввести целевую функцию z, представляющую конъюнкцию всех безусловно допустимых переходов, входящих в шаг. Эти переходы должны войти в шаг в обязательном порядке. Для примера на рисунке 5,б это будет функция $z = t_3 \,\&\, t_5$. Истинность данной функции свидетельствует о том, что все задействованные безусловно допустимые переходы при заданных условиях действительно образуют шаг в соответствии с определением.

Шаг 4. По набору булевых функций, полученному на шагах 1–3, путем подстановок аргументов построить развернутую целевую функцию. Для примера на рисунке 5,б это будет функция $z = t_1\&(x_2\&t_1 \vee x_4\&t_3) = t_1\&(x_2\&t_1 \vee x_4\&t_1)$.

Произвести упрощение полученной формулы с использованием законов алгебры логики.

Шаг 5. Произвести минимизацию развернутой целевой функции и представить ее в виде ДНФ. Для примера на рисунке 5,б это будет функция $z = x_2 \& t_1 \vee x_4 \& t_1$. Следует отметить, что в данном конкретном случае целевая функция не минимизируется.

Шаг 6. По полученной минимизированной целевой функции в виде ДНФ произвести построение усеченного допустимого шага (шагов) в соответствии со следующими правилами. Каждый конъюнкт в целевой функции представляется в виде $t_t x_{k1} x_{k2} \ldots x_{kn}$, где t_t – это триггерный переход – источник сигнала. Данный конъюнкт определяет, что неопределенные переходы t_{k1}, t_{k2}, …, t_{kn} должны быть включены в шаг. Наличие нескольких конъюнктов говорит о том, что имеется несколько вариантов построения шага. Таким образом, исходный шаг может распадаться на несколько усеченных шагов. В отношении нашего примера исходный НПУДШ $\{t_1,t_2,t_3,t_4,t_5\}$ порождает два УДШ $\mu_1 = \{t_1,t_2,t_3,t_5\}$ и $\mu_2 = \{t_1,t_3,t_4,t_5\}$ (рис. 7).

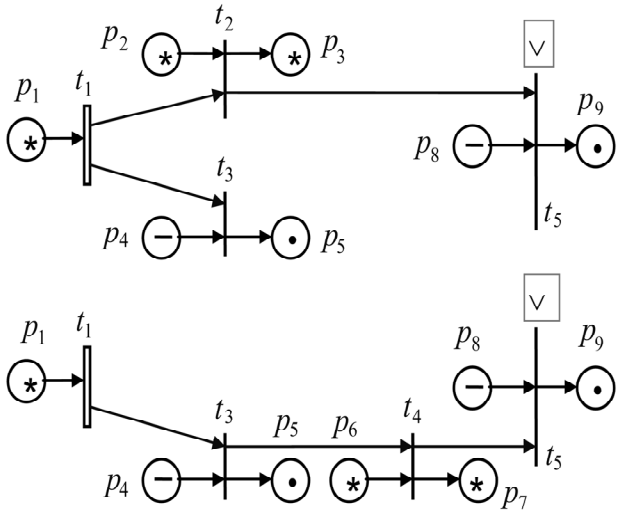


Рис. 7 УДШ, полученные на основе НПУДШ, представленного на рисунке 5,а

Наличие в конъюнкте перехода, отличного от триггерного перехода t_t, свидетельствует о некорректности построения шага. В этом случае необходимо проверить результаты вычислений предыдущих шагов. Следует отметить, что после проведения последней (третьей) фазы построения УДШ, возможно, потребуется проведение нормализации полученного множества шагов путем удаления дублирующих множеств.

3. Вычисление минимальных запрещающих контекстных маркировок

Ниже предлагается метод построения минимальных ЗКМ на основе представления условия запрета недействительных переходов максимального разрешенного дополнения (МРД) шага в виде некоторой булевой функции с последующей ее минимизацией. Это прямой путь вычисления минимальных ЗКМ, поэтому он является наиболее эффективным. Эффективность метода определяется в основном лежащим в его основе методом минимизации булевых функ-

ций. Методы минимизации булевых функций теоретически хорошо обоснованы и изучены. В настоящее время разработано несколько эффективных методов минимизации булевых функций, среди которых метод Закревского для карт Карно [9], методы Квайна, Квайна–Мак-Класки, а также другие методы [8].

Ниже описывается методика вычисления минимальных ЗКМ на основе предлагаемого подхода. Методика иллюстрируется на примере, приведенном на рисунке 8.

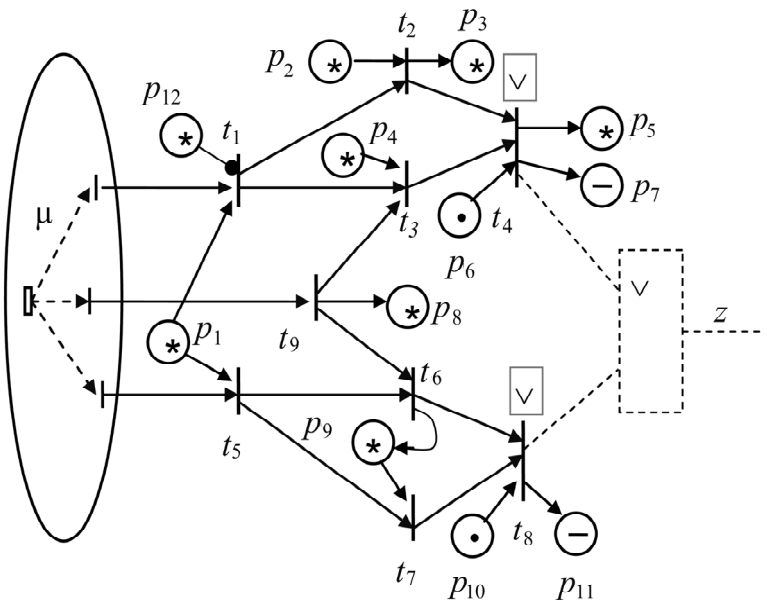


Рис. 8 Допустимый шаг μ и его максимальное разрешенное дополнение

Шаг 1. Построить МРД заданного шага μ.

МРД может быть построено на основе понятия событийных графов сети *sNCES* [10]. Методика построения МРД на основе концепции событийных графов сводится к построению цепочки графов на основе их последовательных преобразований:

$$G1 \rightarrow G2 \rightarrow G3 = GB_0 \rightarrow GA_0 \rightarrow GB_1 \rightarrow GA_1 \rightarrow GB_2 \rightarrow \ldots \rightarrow GA_{n-1} \rightarrow GB_n = G4.$$

Начальным графом цепочки является событийный граф триггерного перехода, определяемый как

$$G1 = (tt, T1, E1),$$

где $tt \in T$ – триггерный переход, являющийся источником сигнала; $T1 = \left\{ t' \middle| (tt, t') \in EV^+ \right\} \cup \{tt\}$ – множество переходов, достижимых из перехода tt по событийным связям; EV^+ – транзитивное замыкание отношения EV; $E1 \subseteq T1 \times T1 \cap EV$ – множество дуг графа.

Конечным графом является $G4$ – событийный граф разрешенного дополнения шага. Графы GA_i и GB_i ($I = 1, \ldots, n-1$) являются промежуточными. Преобразования совершаются, пока $GA_i \neq GB_i$. Пример шага и его МРД приведен на рисунке 8.

Шаг 2. Представить каждый переход МРД в виде элементарной булевой функции, причем внутренние входные позиции с неопределенной маркировкой выступают в роли булевых аргументов без отрицания, внутренние выходные позиции с неопределенной маркировкой рассматриваются как булевы аргументы с отрицанием, входные переходы принимаются за булевы аргументы без отрицания. Позиции с определенной маркировкой (0 или 1), а также граничные позиции переходов МРД не рассматриваются. Между группой аргументов-позиций и группой аргументов-переходов выполняется операция конъюнкция, а между аргументами-переходами в группе выполняемая операция соответствует типу перехода ($\vee$ или &). Истинность логической функции для перехода говорит о разрешенности данного перехода как со стороны его входных и выходных позиций, так и со стороны входных переходов (событийных дуг).

Пример представления перехода в виде элементарной булевой функции и логического элемента приведен на рисунке 9. Для примера, представленного на рисунке 8, набор элементарных булевых функций будет следующим (знак конъюнкции для упрощения опущен):

$$t_1 = p_1 p_{12}\,;\; t_2 = p_2 \overline{p}_3 t_1\,;\; t_3 = p_4 t_1 t_9\,;\; t_4 = \overline{p}_5 (t_2 \vee t_3)\,;$$

$$t_5 = p_1\,;\; t_6 = \overline{p}_9 t_5 t_9\,;\; t_7 = p_9 t_5\,;\; t_8 = t_6 \vee t_7\,;\; t_9 = \overline{p}_8\,.$$

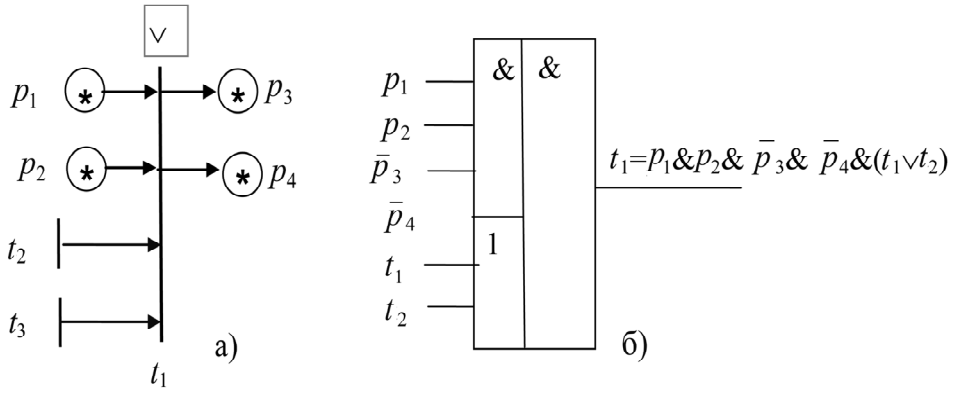


Рис. 9 Представление перехода (а) в виде логического элемента и булевой функции (б)

Шаг 3. Найти недействительные переходы в МРД.

Определение недействительных переходов в *RsNCES* приведено в [6]. Для примера, представленного на рисунке 8, недействительными переходами будут переходы t_4 и t_8.

Шаг 4. Построить целевую булеву функцию, определяющую срабатывание одного из недействительных переходов. Если в МРД имеется несколько недействительных переходов, которые необходимо запретить, то вводится новая функция дизъюнкции, аргументами которой будут недействительные переходы. Для примера на рисунке 8 это будет функция $z = t_4 \vee t_8$.

Шаг 5. По набору булевых функций, полученному на шагах 2 и 4, путем подстановок аргументов построить развернутую целевую функцию. Для примера на рисунке 8 это будет функция

$$z = p_1 p_2 \overline{p}_3 \overline{p}_5 p_{12} \vee p_1 p_4 \overline{p}_5 \overline{p}_8 p_{12} \vee p_1 \overline{p}_8 \overline{p}_9 \vee p_1 p_9\,.$$

Истинность этой функции означает, что при заданных условиях хотя бы один недействительный переход сработает.

Шаг 6. Получить отрицание развернутой целевой функции z и минимизировать его. Результат представляется в виде ДНФ. Для примера на рисунке 8 это будет функция

$$\bar{z} = \bar{p}_1 \vee \bar{p}_2 p_8 \bar{p}_9 \vee p_3 p_8 \bar{p}_9 \vee p_5 p_8 \bar{p}_9 \vee p_8 \bar{p}_9 \bar{p}_{12}.$$

Истинность этой функции означает, что при заданных условиях ни один из недействительных переходов не сможет сработать.

Шаг 7. По полученной на предыдущем шаге ДНФ построить минимальные ЗКМ. Каждой конъюнкции в ДНФ соответствует одна минимальная ЗКМ. Причем, если аргумент-позиция стоит без отрицания, то ей соответствует маркировка, равная 1, если с отрицанием, то 0. Маркировка позиций, отсутствующих в конъюнкции, остается неопределенной. Например, конъюнкту $p_8 \bar{p}_9 \bar{p}_{12}$ соответствует (частичная) маркировка $\{m(p_8) = 1, m(p_9) = 0, m(p_{12}) = 0\}$. Эта маркировка является запрещающей, поскольку соответствующий конъюнкт $p_8 \bar{p}_9 \bar{p}_{12}$ и, следовательно, вся функция $\bar{z}$ являются истинными. Это означает, что все недействительные переходы заблокированы. Данная маркировка является минимальной, поскольку соответствующий конъюнкт входит в минимальную ДНФ и из него не может быть вычеркнута ни одна позиция.

Для примера на рисунке 8 по булевой функции, полученной на шаге 7, можно построить пять ЗКМ: $\omega_1 = \{m(p_1)=0\}$; $\omega_2 = \{m(p_2) = 0, m(p_8) = 1, m(p_9) = 0\}$; $\omega_3 = \{m(p_3) = 1, m(p_8) = 1, m(p_9) = 0\}$; $\omega_4 = \{m(p_5) = 1, m(p_8) = 1, m(p_9) = 0\}$; $\omega_5 = \{m(p_8) = 1, m(p_9) = 0, m(p_{12}) = 0\}$.

На рисунке 10 представлены маркировки МРД, выводимые при срабатывании конфигураций ψ_i (i = 1, …, 5) допустимого шага μ в *RsNCES*-сети, представленной на рисунке 8, ЗКМ входят в них как составные части.

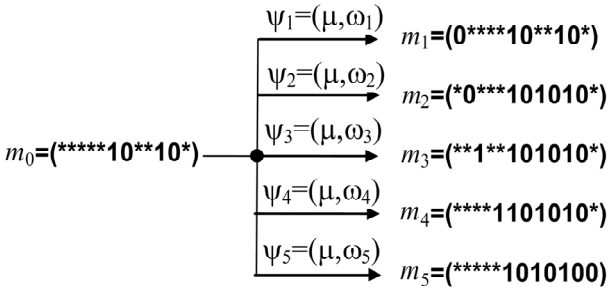


Рис. 10 Маркировки МРД, выводимые из начальной, при срабатывании допустимого шага μ в *RsNCES*, представленной на рисунке 8

4. Алгоритм построения графа достижимости

Ниже представлен алгоритм построения графа достижимости с учетом отношения покрываемости между маркировками. В представленном алгоритме используются следующие обозначения: *RM* – текущее множество достигнутых маркировок; *RA* – текущее множество дуг графа достижимости; m – текущая маркировка; m' – новая маркировка; Ξ^m – множество всех допустимых шагов

при маркировке m; $\Omega^{\mu,m}$ – множество ЗКМ для допустимого шага μ при маркировке m; Ψ^m – множество всех конфигураций допустимых шагов, возможных при маркировке m; $\Theta^m = ((\mu_1^m, \omega_1^{\mu 1}), (\mu_1^m, \omega_2^{\mu 1}), \ldots, (\mu_2^m, \omega_1^{\mu 2}), (\mu_2^m, \omega_2^{\mu 2}), \ldots, (\mu_n^m, \omega_1^{\mu k}), (\mu_n^m, \omega_2^{\mu k}), \ldots)$ – кортеж, составленный их всех конфигураций из Ψ^m.

Алгоритм:

$RM = \varnothing$; $RA = \varnothing$;

Вычислить Θ^{m0}.

Втолкнуть в стек (m_0, Θ^{m0})

Пока стек не пуст **Делать**

$m\left[\left(\mu_i, \omega_j^{\mu i}\right)\right] > m'$ – получить новую маркировку m' из текущей при срабатывании самой левой конфигурации допустимого шага в Θ^m

$\Theta^m = \Theta^m - \left\{\left(\mu_i, \omega_j^{\mu i}\right)\right\}$ – удалить конфигурацию $\left(\mu_i, \omega_j^{\mu i}\right)$ из Θ^m.

Если m' не покрывается никакой другой маркировкой из *RM*, **то**

Делать

$RM = RM \cup \{ m' \}$.

Вычислить $\Theta^{m'}$

Втолкнуть в стек $\left(m', \Theta^{m'}\right)$.

Конец

$RA = RA \cup \{(m,\ m')\}$

Если $\Theta^m = \varnothing$, **то** Вытолкнуть $\left(m, \Theta^m\right)$ из стека

Конец

Заключение

В данной работе рассмотрены методы интерпретации *RsNCES*-сетей, предложенных в работе [6]. Использование булевых функций при интерпретации сетевых моделей данного класса позволяет легко выполнить аппаратную поддержку их реализации. Направлением дальнейших исследований является применение *RsNCES*-сетей в синтезе супервизорного управления для дискретно-событийных систем.

Список литературы

1. **Hanisch, H.-M.** Netz-Condition/Event Systeme. 4. Fachtagung Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA'95) / H.-M. Hanisch, M. Rausch. – Braunschweig : Tagungsband. – 1995. – Mai. – S. 55–71.
2. **Котов, В. Е.** Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
3. **Hanisch, H.-M.** A modular plant modeling technique and related controller synthesis problems / H.-M. Hanisch, A. Luder, J. Thieme // IEEE Int. Conf. On Systems, Man, and Cybernetics .– 1998. – October. – V. 1. – P. 686–691.
4. **Luder, A.** Formaler Steuerungsentwurf mit modularen diskreten Verhaltensmodellen : PhD thesis / A. Luder. – Halle-Wittenberg : Martin-Luther-Universitaet, 2000.
5. **Missal, D.** Synthesis of distributed controllers by means of a monolithic approach / D. Missal, H. M. Hanisch // Proceedings of the 11th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'2006). – Prague, 2006. – P. 356–363.

6. **Дубинин, В. Н.** Реверсивные частично-маркированные sNCES-сети / В. Н. Дубинин, Х.-М. Ханиш, Д. Миссал // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 22–31.
7. **Starke, P. H.** Analysing Signal-Net Systems, Informatik–Bericht 162 / P. H. Starke, S. Roch // Humboldt-Universitaet zu Berlin, Institut fuer Informatik, September, 2002. – 136 p.
8. **Яблонский, С. В.** Введение в дискретную математику / С. В. Яблонский. – М. : Высшая школа, 2003. – 384 с.
9. **Райцин, М. А.** Программный комплекс «Карно» для минимизации булевых функций методом Закревского [Электронный ресурс] / М. А. Райцин, П. С. Сухотюк. – Режим доступа: http://miraj.net.ru/cgi-bin/download.cgi?id=30
10. **Dubinin, V.** Event graph-based approach to interpretation of NCES models / V. Dubinin, H.-M. Hanisch, D. Missal // Новые информационные технологии и системы (НИТиС, 2006) : труды VII Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2006. – 1 ч. – С. 172–186.

УДК 519.816

В. И. Волчихин, Е. Н. Прошкина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ОБРАЗОВАНИЯ В ВУЗЕ

Предлагается математическая модель системы принятия решений по управлению качеством образования. Модель разработана на основе метода вербального анализа решений. В статье рассматриваются математические аспекты реализации модели в среде MathCAD.

Введение

Необходимость принимать решения, для которых не удается полностью учесть предопределяющие их условия, а также последующее их влияние, встречается во всех областях техники, экономики, социальных наук. В связи с этим необходимо стремиться к оптимальному использованию имеющейся информации, чтобы, взвесив все возможные варианты решения, постараться найти наилучший.

Теоретический анализ

Под принятием решения понимается особый процесс человеческой деятельности, направленный на выбор наилучшего варианта из нескольких возможных. В процессе принятия решений Г. Саймон [1] выделяет три этапа: поиск информации, поиск и нахождение альтернатив и выбор лучшей альтернативы. На первом этапе собирается вся доступная на момент принятия решения информация: фактические данные, мнения экспертов. Там, где это возможно, строятся математические модели, проводятся социологические опросы. Второй этап связан с определением того, что можно, а чего нельзя делать в имеющейся ситуации, т.е. с определением вариантов решений (альтернатив). И уже третий этап включает в себя сравнение альтернатив и выбор наилучшего варианта (или вариантов) решения.

В современной науке о принятии решений центральное место занимают многокритериальные задачи выбора. Считается, что учет многих критериев приближает постановку задачи к реальной жизни [2]. Традиционно принято различать три основные задачи принятия решений:

1) упорядочение альтернатив;

2) распределение альтернатив по классам решений;

3) выделение лучшей альтернативы.

Выбор метода решения задачи напрямую зависит от степени ее структуризованности. В хорошо структуризованных проблемах существенные зависимости между основными характеристиками могут быть выражены количественно [2]. Для решения подобного рода задач можно использовать минимаксный критерий, критерий Байеса–Лапласа, критерий Гурвица, критерий Сэвиджа, методы исследования операций, человекомашинные процедуры, методы, основанные на многокритериальной теории полезности, метод аналитической иерархии.

Неструктуризованные проблемы характеризуются тем, что в их описании преобладают качественные факторы, трудно поддающиеся формализа-

ции, а количественные зависимости между этими факторами обычно не определены [2]. К данному виду можно отнести проблемы принятия решений о качестве образования.

Выделим общие черты неструктуризованных проблем:

– они являются проблемами уникального выбора;

– они связаны с неопределенностью в оценке альтернативных вариантов решения, что обусловлено нехваткой информации на момент решения проблемы;

– оценки альтернативных вариантов решения проблемы имеют качественный характер;

– оценки альтернатив по отдельным критериям могут быть получены только от руководителя или экспертов.

Методы вербального анализа решений позволяют сохранить качественное описание проблемы на всех этапах ее анализа. В них применяются качественные способы измерений и порядковые шкалы оценок по критериям.

С помощью методов вербального анализа решений могут быть решены следующие задачи:

– ранжирование многокритериальных альтернатив [3];

– выбор лучшей альтернативы из группы заданных многокритериальных альтернатив на основе их парного сравнения [4, 5];

– порядковая классификация многокритериальных альтернатив [6–9].

Таким образом, большое количество методов вербального анализа решений позволяет решать неструктуризованные задачи в качественном виде с учетом предпочтений руководителя. В методах на всех этапах используются вербальные переменные, понятные руководителю и экспертам. Методы не требуют какой-либо предварительной подготовки от руководителя.

Методика

Задачу принятия решения о качестве образовательных услуг можно отнести к задачам порядковой классификации альтернатив, обладающих совокупностью многих признаков. Использование большого количества показателей качества не позволяет руководителю сформулировать четкое правило оценки качества образовательных услуг, предоставляемых отдельной кафедрой, факультетом и вузом в целом. Для решения данной задачи на первом этапе необходимо получить представление о цели, которую преследует руководитель, а именно «повышение качества образования». Качество образования и качество вуза – понятия многомерные и многоаспектные, а потому необходимо четко определить критерии, имеющие шкалы оценок, упорядоченных от лучшей (первой) к худшей (последней).

Поскольку заранее неизвестно, какие именно характеристики будут иметь оцениваемые объекты, нужно определить правила принятия решений для объектов, характеризуемых любыми комбинациями.

Рассмотрим задачу порядковой классификации в следующей постановке:

T – свойство, отвечающее целевому критерию задачи («качество образования»);

$K_1, K_2, ..., K_N$ – критерии, по которым оценивается качество образования (средний балл студента, рейтинг преподавателя, критерии оценки удовлетворенности потребителей и т.д.);

$X_q = \{x_q^k\}$ – множество оценок (шкала) критерия K_q, упорядоченных по убыванию характерности свойства T; $|X_q| = S_q$, S_q – число значений оценок на шкале q-го критерия;

$Y = X_1 \times X_2 \times ... \times X_N$ – декартово произведение шкал критериев, определяющее множество всех возможных описаний объектов, подлежащих классификации;

$C = \{C_1, C_2, ..., C_M\}$ – множество классов решений, упорядоченных по убыванию выраженности свойства T («высокое качество образования», «приемлемое качество образования», «низкое качество образования»).

Каждый объект описывается набором оценок по критериям $K_1, K_2, ..., K_N$ и представляется в виде вектора вида $y_j = \left(y_{j1}, y_{j2}, ..., y_{jN}\right)$, где $y_{jq} \in X_q$, $j = 1, ..., S$ и $S = |Y| = \prod_{q=1}^{N} S_q$. Некоторые сочетания оценок по критериям являются недопустимыми. Поэтому будем рассматривать множество $Y^a \subseteq Y$ векторных оценок допустимых объектов.

Требуется, основываясь на предпочтениях руководителя, построить отображение множества допустимых объектов Y^a во множество классов C: $F: Y^a \to C$, которое должно быть полным и непротиворечивым.

Введем дополнительные понятия. На множестве критериальных оценок X_q $(q = 1, ..., N)$ определим отношение порядка $Q_q = \left\{\left(x_q^i, x_q^k\right) \mid i \le k\right\}$, а на множестве классов C – отношение порядка $Q_C = \left\{\left(C_g, C_h\right) \mid g \le h\right\}$, которые являются линейными рефлексивными асимметричными транзитивными отношениями. Введем на множестве возможных комбинаций оценок Y рефлексивное асимметричное транзитивное отношение доминирования: $Q = \left\{(y_i, y_j) \mid (y_{iq}, y_{jq}) \in Q_q,\ \forall q \in \{1, ..., N\}\right\}$ и антирефлексивное асимметричное транзитивное отношение строгого доминирования: $P = \{(y_i, y_j) \mid (y_i, y_j) \in Q,\ \exists q:\ y_{iq} \ne y_{jq}\}$. Сформулируем теперь требования к отображению F множества допустимых объектов Y^a во множество классов C. Отображение F должно быть полным $\forall y \in Y^a\ \exists k:\ F(y) = C_k$, т.е. $y \in Y_k$ и непротиворечивым $y_i \in Y_i,\ y_j \in Y_j, (y_i, y_j) \in Q \Rightarrow (C_i, C_j) \in Q_C \Rightarrow i \le j$.

Упорядоченность классов решений $C = \{C_1, C_2, ..., C_M\}$ позволяет построить процедуру опроса руководителя путем предъявления ему относительно небольшой части всех векторных оценок из множества Y для формирования полной классификации этого множества. Обозначим через G_i множество допустимых номеров классов для векторной оценки y_i. До начала опроса руководителя каждый вектор оценок y_i может принадлежать любому классу и, значит, для каждого вектора $y_i \in Y$ множество $G_i = \{1, 2, ..., M\}$. Пусть руководитель

отнес векторную оценку y_i к классу Y_m $(1 \le m \le M)$. Естественно предположить, что в этом случае и любая другая векторная оценка, компоненты которой не менее характерны для свойства T, не может принадлежать менее предпочтительному классу. Аналогично, векторная оценка, компоненты которой не более характерны для свойства T, чем у векторной оценки y_i, не может принадлежать более предпочтительному классу. Следовательно, непосредственная классификация только одной векторной оценки из Y может привести к косвенной классификации некоторых других оценок. Число косвенно классифицированных векторных оценок зависит от того, какая векторная оценка предъявляется руководителю, и от того, к какому классу он ее отнесет. Для определения, насколько информативной, в указанном смысле, будет та или иная векторная оценка при предъявлении ее руководителю, можно подсчитать число косвенно классифицируемых векторных оценок для каждого возможного ответа.

Показатель p_{im}, оценивающий возможность отнесения векторной оценки y_i к классу Y_m, можно ассоциировать с близостью этой векторной оценки к представителям класса Y_m.

Таким образом, для каждой векторной оценки можно определить оценку ее информативности при каждом возможном ответе руководителя и оценку ее близости к каждому из допустимых для нее классов, характеризующую возможность ее отнесения к соответствующему классу. Используя эти два показателя, можно построить единый количественный индекс информативности Φ_i каждой еще не классифицированной векторной оценки $y_i \in Y$, определив его как $\Phi_i = \sum_{m \in G_i} p_{im} g_{im}$, где g_{im} – число векторных оценок из множества Y, принадлежность которых к некоторому классу Y_m становится известной, если руководитель отнесет вектор y_i к этому классу.

Введем меру близости векторной оценки y_i к некоторому классу Y_m, которая будет характеризовать «вероятность» отнесения руководителем вектора y_i к классу Y_m. Назовем центром непустого класса Y_m векторную оценку $c_m = (c_{m1}, c_{m2}, ..., c_{mN})$, каждая из N компонент которой равна округленному среднему арифметическому значению соответствующих компонент векторных оценок из класса Y_m и определяется формулой

$$c_{mq} = \left[\sum_{y_i \in Y_m} y_{iq} \Big/ |Y_m| \right], \; q = 1, ..., N . \qquad (1)$$

Определим расстояние d_{im} от векторной оценки $y_i \in Y$ до центра класса C_m следующим выражением:

$$d_{im} = \sum_{q=1}^{N} \left| y_{iq} - c_{mq} \right| . \qquad (2)$$

Обозначим через $d_{\max}$ максимально возможное расстояние между двумя векторными оценками, принадлежащими множеству Y:

$$d_{\max} = \sum_{q=1}^{N} (S_q - 1), \tag{3}$$

где S_q – число градаций на шкале критерия K_q.

Назовем мерой близости p_{im} вектора $y_i \in Y$ к классу Y_m величину

$$p_{im} = \frac{d_{\max} - d_{im}}{|G_i| d_{\max} - \sum_{s \in G_i} d_{is}}. \tag{4}$$

Отсюда $0 \le p_{im} \le 1$ и $\sum_{m \in G_i} p_{im} = 1$.

На очередной итерации руководителю предъявляется векторная оценка y_i, для которой $\Phi_i = \max_{y_k \in Y_g} \Phi_k$, $Y_g = \{y_k \mid |G_k| > 1\}$.

После того как руководитель классифицирует векторную оценку y_i, множества G_j для $y_j \in Y_g$ таких, что либо $(y_i, y_j) \in P$, либо $(y_j, y_i) \in P$, преобразуются в зависимости от класса, в который ЛПР отнес эту векторную оценку. Затем вновь определяется множество Y_g. Если $Y_g \neq 0$, то для $y_i \in Y_g$ пересчитываются значения Φ_i и процедура повторяется. Если $Y_g = 0$, то разбиение множества Y на требуемые классы решений $C = \{C_1, C_2, ..., C_M\}$ построено.

Данная процедура позволяет уменьшить число обращений к руководителю. Для оценки ее эффективности было проведено статистическое моделирование в среде MathCAD.

Экспериментальная часть

Для генерации исходного разбиения множества векторов на классы был использован следующий алгоритм. Задаем число критериев *N*, число значений на шкале каждого критерия $S_q (q = 1, ..., N)$ и число классов *M*. Формируем множество векторов, представляющих все возможные сочетания оценок по критериям (рис. 1).

Известно, что вектор, имеющий первые оценки по всем критериям, принадлежит классу C_1, вектор, имеющий последние оценки по всем критериям, – классу C_M. Затем определяется вектор $y_i \in Y$, который должен быть предъявлен руководителю для классификации: для каждого вектора $y_i \in Y$ вычисляются показатели p_{im} и g_{im} (рис. 2, 3).

По показателям p_{im} и g_{im} вычисляется индекс информативности Φ_i и определяется вектор, который следует предъявить руководителю (рис. 4).

Ответ руководителя моделируется с помощью датчика псевдослучайных чисел. В соответствии с отношением доминирования P корректируются множества допустимых номеров классов G_j для всех векторов $y_j \in Y$, принадлежность которых к некоторому классу не была еще определена. Далее пересчитываются координаты центров классов (рис. 5).

```
y :=  for q ∈ 0,1..(N − 1)
        v_q ← 1
      for i ∈ 0,1..(K − 1)
        if i > 0
          k ← 1
          for q ∈ N − 1, N − 2..0
            if k = 1
              v_q ← v_q + k
              k ← 0
              if v_q > S_0,q
                v_q ← 1
                k ← 1
        for q ∈ 0,1..(N − 1)
          y_i,q ← v_q
      y
```

Рис. 1

```
g(y,G) :=  for i ∈ 0,1..(K − 1)
             for m ∈ 0,1..(M − 1)
               g_i,m ← 0  if i = 0
               g_i,m ← 0  if i = K − 1
               otherwise
                 g_i,m ← 0
                 for j ∈ 1,2..(K − 2)
                   g_i,m ← Class_end(y,g,i,m,j)  if m = M − 1
                   g_i,m ← Class_home(y,g,i,m,j)  if m = 0
                   g_i,m ← Class_middle(y,g,i,m,j)  otherwise
                   g_i,m
                 g_i,m
             g_i,m
           g
```

Рис. 2

$$
\begin{aligned}
p(c,y) := \;& dmax \leftarrow \sum_{q=0}^{N-1} \left(S_{0,q} - 1\right) \\
& \text{for } i \in 0,1..(K-1) \\
& \quad Gi \leftarrow \sum_{m=0}^{M-1} G_{i,m} \\
& \quad \text{for } m \in 0,1..(M-1) \\
& \quad\quad d_{i,m} \leftarrow \sum_{q=0}^{N-1} \left|y_{i,q} - c_{m,q}\right| \\
& \quad\quad p_{i,m} \leftarrow \frac{\left(dmax - d_{i,m}\right)}{\left(Gi \cdot dmax - \sum_{s=0}^{M-1}\sum_{q=0}^{N-1} \left|y_{i,q} - c_{s,q}\right|\right)} \\
& p
\end{aligned}
$$

Рис. 3

```
Number(Φ, y) :=  j ← 0
                 Pr ← 0
                 for i ∈ 0,1..(K − 1)
                   if Φ_i > Pr ∧ y_i,N = 0
                     j ← i
                     Pr ← Φ_i
                 j
```

Рис. 4

```
zentr(y) := | for m ∈ 0,1..M − 1
            |   col ← 0
            |   for q ∈ 0,1..(N − 1)
            |     c_{m,q} ← 0
            |   for i ∈ 0,1..(K − 1)
            |     c ← Count_c(y,c,i,m,col) if y_{i,N} = m + 1
            |   for q ∈ 0,1..(N − 1)
            |     c_{m,q} ← c_{m,q} / col if col > 0
            | for m ∈ 0,1..M − 1
            |   col ← 0
            |   for q ∈ 0,1..(N − 1)
            |     col ← col + 1 if c_{m,q} = 0
            |   if col = N
            |     h ← m
            |     s ← poisk_s(c,m)
            |     t ← poisk_t(c,m)
            |     for q ∈ 0,1..(N − 1)
            |       c_{h,q} ← (c_{t,q} + c_{s,q}) / (t − s)
            |   c_{h,q}
            | c
```

Рис. 5

Процедура повторяется до тех пор, пока для каждой векторной оценки из множества Y не будет определена принадлежность к одному из заданных классов.

Результаты

Число обращений к датчику псевдослучайных чисел характеризует число вопросов к руководителю для построения данного разбиения на основе предложенной процедуры опроса. При этом среднее число векторов, предъявленных руководителю для классификации, при $N = 4$ и $S = (3 \;\; 3 \;\; 3 \;\; 3)$ равно 8 при мощности $S = 81$ множества Y. Это означает, что предложенная процедура значительно уменьшает число предъявлений по сравнению с мощностью множества Y.

На основе рассмотренной процедуры был разработан прототип системы принятия решений по управлению качеством образования. С его помощью была решена задача классификации факультетов университета по результатам мониторинга удовлетворенности преподавателей.

Решение задачи состояло в том, чтобы на основе предпочтений представителя от руководства университета классифицировать факультеты для применения в последующем корректирующих действий.

На первом этапе были занесены исходные данные (рис. 6).

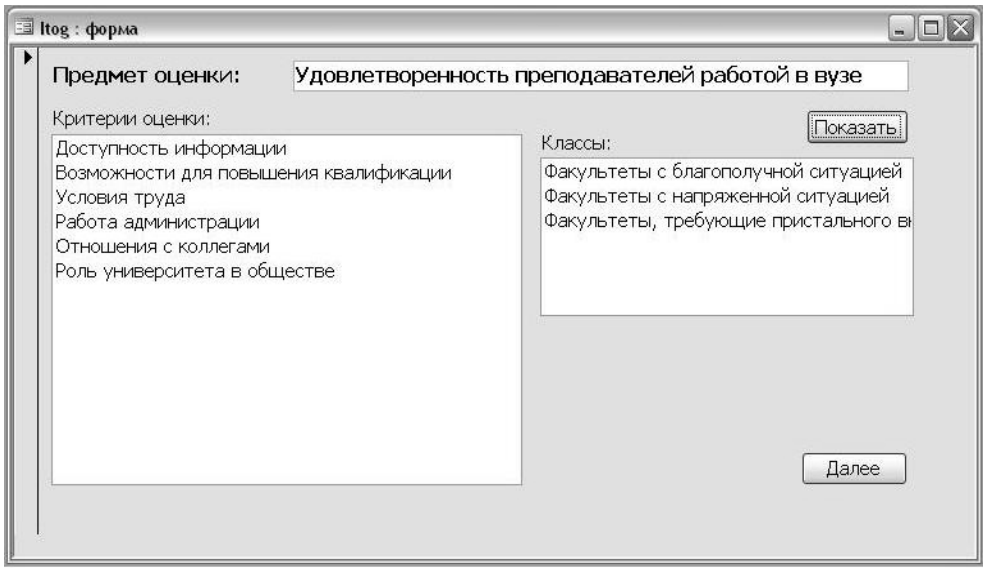


Рис. 6 Исходные данные

Затем путем опроса руководителя было сформировано решающее правило. По каждому факультету были занесены реальные оценки по критериям и получен результат (рис. 7).

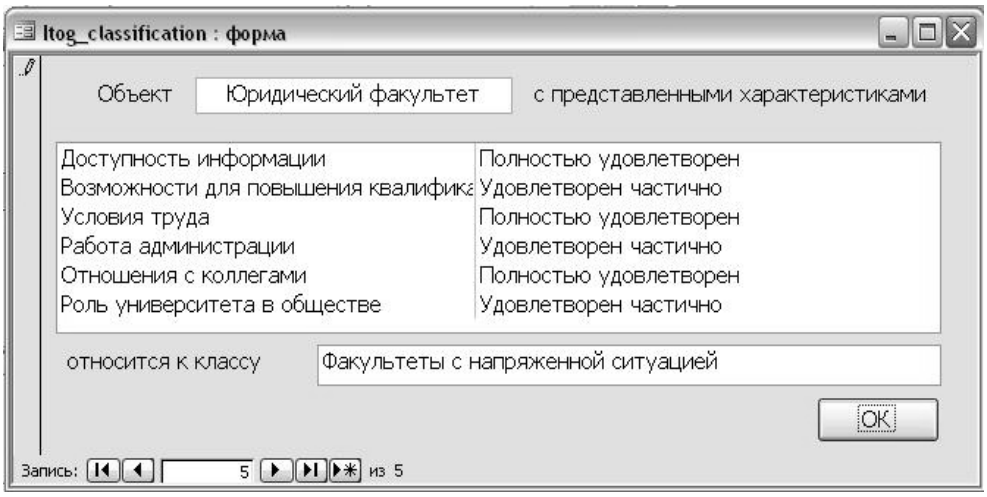


Рис. 7 Результат классификации

Таким образом, рассмотренная процедура позволяет сформировать правило принятия решений по управлению качеством образования до появления реальных объектов на качественном уровне без каких-либо преобразований словесных формулировок в количественные значения.

Список литературы

1. **Simon, H. A.** The New Science of Management Decision / H. A. Simon. – N.Y. : Harper and Row Publishers, 1960.
2. **Ларичев, О. И.** Вербальный анализ решений / О. И. Ларичев. – М. : Наука, 2006. – 182 с.
3. **Larichev, O. I.** Ranking multicriteria alternatives: The method ZAPROS III / O. I. Larichev // Europ. J. Operat. Res. – 2001. – V. 131. – № 3. – P. 550–558.
4. **Larichev, O. I.** Numerical and verbal decision analysis used for the problems of resources allocation in Actic / O. I. Larichev, R. Brown // J. Multi-Criteria Decision Anal. – 2000. – V. 9. – № 6. – P. 263–274.
5. **Кочин, Д.** Вербальный метод определения эффективности инвестиций в строительстве / Д. Кочин, О. Ларичев, Л. Устинович // Computer Modell. And New Technol. – 2003. – V. 7. – № 2. – P. 37–47.
6. **Ларичев, О. И.** Задача классификации в принятии решений / О. И. Ларичев, Е. М. Мошкович // Докл. АН СССР. – 1986. – Т. 287. – № 3. – С. 567–570.
7. **Ларичев, О. И.** Качественные методы принятия решений / О. И. Ларичев, Е. М. Мошкович. – М. : Физматлит, 1996. – 208 с.
8. **Мошкович, Е. М.** Конструктивный поиск и устранение противоречий в предпочтениях лица, принимающего решения при разбиении многомерных альтернатив на конечное число классов / Е. М. Мошкович // Проблемы и процедуры принятия решений при многих критериях : сборник трудов / под ред. С. В. Емельянова, О. И. Ларичева. – М. : ВНИИСИ, 1982. – № 6. – С. 73–80.
9. **Кочин, Д. Ю.** Метод классификации заданного множества многокритериальных альтернатив / Д. Ю. Кочин // Методы поддержки принятия решений : сборник трудов Ин-та систем. анализа РАН / под ред. О. И. Ларичева. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – С. 4–18.

УДК 681.3.25: 621.382

Ю. Д. Пальченков

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К АНАЛОГОВОЙ, ЦИФРОВОЙ И АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИЯМ ОБРАБОТКИ

Предлагается схема классификации и сравнения моделей аналоговых вычислений, структурная схема простой непрерывной машины, использующая динамическую систему и развитие теории $(\mathbb{Z},\mathbb{Q})$-систем.

Введение

В [1, 2] Поур-Эл представила теорию аналоговых вычислений, которая является одним из направлений теории вычислений, при помощи непрерывных динамических систем [3–6].

Аналоговый компьютер есть параллельно обрабатывающая машина, в которой переменные изменяются непрерывно. Отсюда прямо следует, что теория аналоговых вычислений подходит к нейрокомпьютерам. Параллелизм и аналоговые вычисления, отмеченные выше, являются также характерными чертами нейронных вычислений.

Предложенная в [1, 2] теория аналоговых вычислений, в которой время непрерывно и «программа компьютера» – дифференциальные уравнения и начальные условия, позволяет показать, что машина Тьюринга может вычислять функции, которые аналоговый компьютер не может, и что непрерывная динамическая система может вычислять функции, которые не может машина Тьюринга. Из работ [6–8], следует, что нейросеть есть компьютер, который является также непрерывно-временной динамической системой.

Разработка непрерывно-временной динамической системы, позволяющей создать аналого-цифровой (гибридный) компьютер для управления летательными аппаратами на основе аналоговой вычислимости, является актуальной, т.к. позволяет, с одной стороны, расширить область применения аналоговой обобщенной (универсальной) функции до решения обыкновенных дифференциальных уравнений и, с другой стороны, связать аналоговую обобщенную функцию с тьюринговой вычислимой, и непрерывную функцию аппроксимировать посредством аналогового компьютера (универсальный аппроксиматор). Все эти утверждения связаны с интервалом $[0,\infty)$ и подынтервалом $[0,\tau)$, где $\tau \geq 0$.

Цель статьи заключается в разработке основ теории вычислимых функций действительных переменных (реально значимая функция $y(x)$ – определение аналоговой обобщенной (универсальной) на интервале $[0,\infty)$ и x есть независимая переменная, время), в их применении в проектировании гибридных систем и аналоговых нейронных сетей на основе непрерывно-временной динамической системы, а также в сравнении и классификации математических моделей аналоговых вычислений.

Первый путь исследования ассоциируем с универсальным аналоговым компьютером Шеннона (УАК) [4].

Второй путь исследования связан с представлением аналого-цифровой технологии обработки с помощью динамической системы. Основным момен-

том второго пути является определение понятия простой непрерывной машины (ПНМ) (стационарная динамическая система) и управляемой непрерывной машины (УНМ) (нестационарная динамическая система) [6, 9, 10].

Единой абстрактной математической моделью для описания трех типов машин (аналоговых, цифровых и аналого-цифровых) является (Z,Q)-машина.

Существенным в определении (Z,Q)-машины является введение понятия *длины памяти*. Интерпретируя память как аналоговую, можно формализовать АВМ для решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с постоянными и непрерывными коэффициентами.

Представляя память как цифровую, можно прийти к машине Фон Неймана и их совокупности: машина потока данных и машина клеточных автоматов Тоффоли.

1. Сравнение моделей аналоговых вычислений

Схематичное изображение обрабатывающей компоненты нейросети приведено на рисунке 1.

Рис. 1 Обрабатывающая компонента нейросети

Черный ящик обозначает обрабатывающую систему аналого-цифровой нейронной сети. $\mathfrak{F}$ есть функция входа–выхода, вычисляемая посредством одного шага активации нейронной сети. $f(t)$ есть результирующая временная функция, полученная с помощью итерационных шагов активации, в случае нейронной сети с обратной связью.

Таким образом, актуальной проблемой является разработка математических моделей для определения $\mathfrak{F}$ и $f(t)$ в нейросети и методов взаимодействия информационных процессов аналого-цифровой вычислительной машины, которую целесообразно применять для решения задач, включающих: динамические операторы (системы обыкновенных дифференциальных

уравнений), статические операторы (алгебраические преобразования, связанные с обработкой входной информации, поступающей как в аналоговой, так и в цифровой форме), операторы нелинейных и тригонометрических преобразований, связанных с преобразованием пространственных координат и вычислением навигационных параметров управляемого объекта.

Цель I раздела статьи заключается в сравнении математических моделей аналоговых вычислений и классификации аналоговых вычислительных машин и функций, которые они генерируют.

Под непрерывной динамической системой обычно подразумевается *n*-мерная система обыкновенных дифференциальных уравнений вида [6–8]

$$\frac{dx}{dt} = f(x), \tag{1}$$

где $f : \Re^n \to \Re^n$ – поле, определяющее систему.

Если поле *f* достаточно гладкое, тогда система (1) определяет уникальную траекторию, поток динамической системы в $\Re^n$, т.е. такую функцию $\Phi : \Re^{n+1} \to \Re^n$, что для любого $x \in \Re^n$, $\Phi(x,0) = x$, и для всех $\tau \in \Re$

$$\frac{d}{dt}\big(\Phi(x,t)\big)\big|_{t=\tau} = f\big(\Phi(x,\tau)\big).$$

Иначе динамическую систему можно представить таким образом: $y' = K(x,y)$, где *K* – матрица рациональных функций.

Динамическая система может быть использована для моделирования машины Тьюринга. Лента машины Тьюринга сначала представляется как два противоположных стека и затем содержимое этих двух стеков кодируется каким-либо способом как два реальных числа, что ведет к представлению состояния системы как точки в R^2 (обычно заключенной в интервале $[0,1]^2$).

Машину Тьюринга можно представить, как показано на рисунке 2.

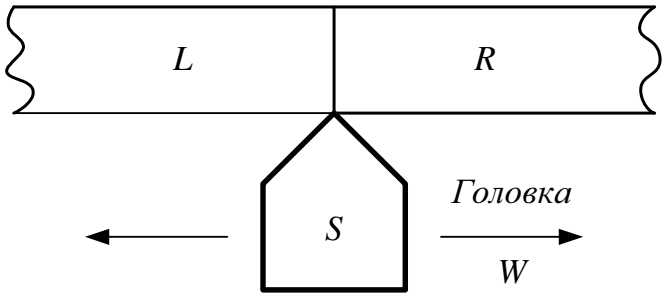


Рис. 2 Представление машины Тьюринга тремя счетчиками *L*, *R* и *W*

Головка машины имеет конечный набор *S* внутренних состояний:

L – счетчик для представления левой половины ленты;

R – счетчик для представления правой половины ленты;

W – счетчик, работающий на сложение.

Мгновенная конфигурация машины Тьюринга представлена как пара целых чисел (x_L, x_R), кодирующая содержимое ленты.

Целые числа для кодирования дают некоторую устойчивость против небольших возмущений.

Тогда $x_L, x_R \in \Re$ и системные уравнения имеют вид

$$\frac{dx_L}{dt} = -x_L + f_L(x_L, x_R);$$
$$\frac{dx_R}{dt} = -x_R + f_R(x_L, x_R).$$

Переменные состояния x_L и x_R не сохраняют свои «старые» значения, а вновь вычисленные значения сохраняются с помощью переменных состояния $\tilde{x}_L, \tilde{x}_R \in \Re$, временной переменной $\tau \in \Re$ и введением двух периодических функций «часов».

Каждую точку (x, y) в единичном квадрате свяжем (ассоциируем) с бинарными цифрами его координат x и y с правой и левой половинками ленты машины Тьюринга. Если лента – это $...a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_1, a_2, ...$, то $x = 0,\ a_{-1}, a_{-2}, ...$ и $y = 0,\ a_0, a_1, a_2, ...$ Тогда сдвигание головки ленты влево эквивалентно делению наполовину x, удвоению y и перемещению самой значимой цифры a_0 из y в x.

Обзор моделей аналоговых вычислений начинаем с универсального аналогового компьютера (УАК), предложенного Шенноном. Считается, что этот УАК является изящной моделью аналогового вычисления в непрерывном времени [4, 5, 10].

УАК-схема представлена на рисунке 3. УАК вычисляет дифференциально-алгебраические функции (ДА). Функция $f(x)$ является ДА, если ее производная удовлетворяет равенству

$$P\left(x, f(x), f'(x), ..., f^k(x)\right) = 0$$

для некоторого многочлена P с рациональными коэффициентами. Не ДА функции называются трансцендентными.

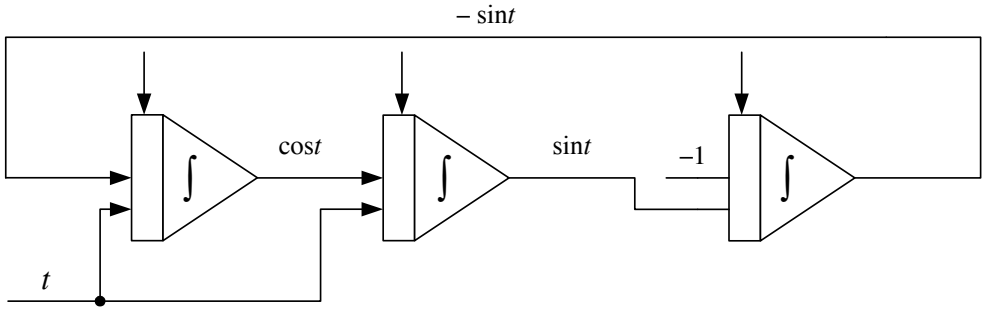


Рис. 3 УАК К. Шеннона, который вычисляет sin t

ДА функции в свою очередь называются иррационально алгебраическими (ИА) и рациональными алгебраическими (РЦ). К ИА относятся x^m, где m – рациональная дробь, решения алгебраического уравнения, выражен-

ное через параметр. К РЦ относятся частные от деления многочленов; целые a, x, x^2 и другие многочлены. Трансцендентные функции реализуются расширенным аналоговым компьютером (РАК), предложенным Л. Рубелем [3].

Основным вопросом вычислительной теории является вопрос о том, закрывается ли итерация УАК. Из функции $f(x)$ получается функция $F(x,t) = f^{[t]}(x)$, т.е. f применяется к x t раз для $t \in N$.

С практической точки зрения для УАК не ясен вопрос реализации неравенств и операций дифференцирования. К. Шеннон дал определение УАК вычислимой функции $y : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}$ от m независимых переменных $x = (x_1, ..., x_m)$. В 1974 г. это понятие уточнено M. B. Pour-El [2] и выглядит следующим образом (определение (Шеннон, Поур-Ел)): реально-значимая функция $y : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}$ от m-независимых переменных $x = (x_1, ..., x_m)$ есть УАК-вычислимая на замкнутом подмножестве D из $\mathbb{R}^m$, если там существует реально-значимая функция $y(x) = y_1(x), ..., y_n(x)$ для некоторого n с начальным условием $y(x_0) = y_0$, где $x_0 \in D$.

Векторная функция $y : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^k$, для $k > 1$ – УАК-вычислимая, если УАК-вычислимой является каждая из ее компонент. Здесь $y_1, y_2, ..., y_n$ представляют внутренние состояния компьютера, где $y = y_1$ – выходная, а $y_2, ..., y_n$ – дополнительные переменные.

Шеннон, Поур-Эл, Липшиц, Рубель доказали, что УАК-вычислимые функции одной переменной точно совпадают с ДА-функциями. На рисунке 4 представлено разбиение стандартной теории рекурсивных функций на три основные части.

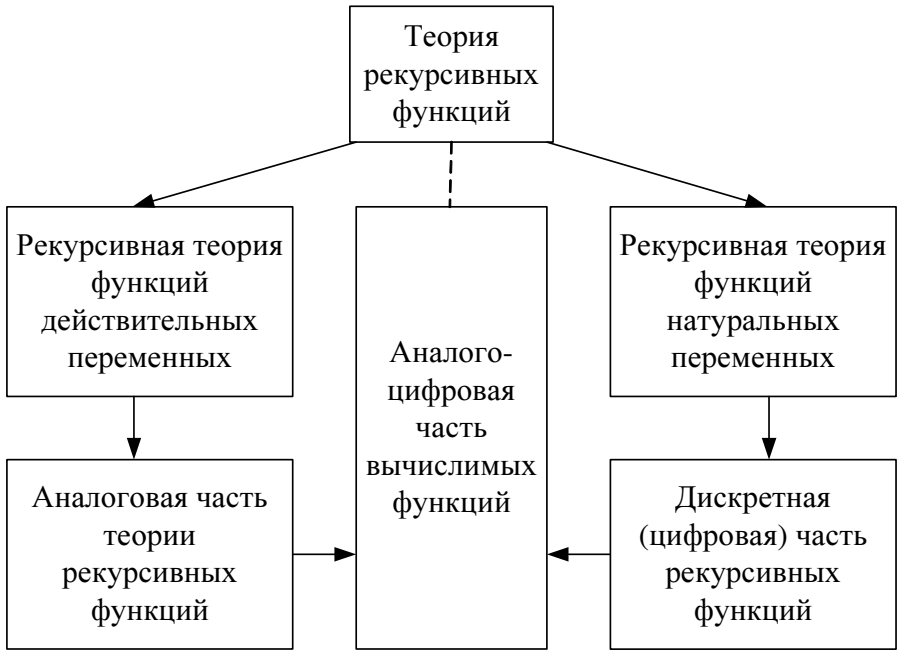


Рис. 4 Разбиение стандартной теории рекурсивных функций на три основные части

На рисунке 5 изображены аналоговые схемы, реализующие дифференциальные уравнения; операции сложения и умножения; неравенства и итерации.

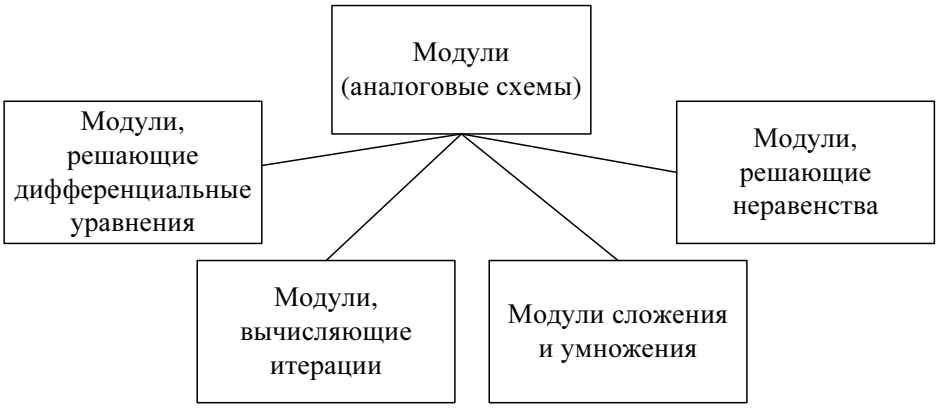


Рис. 5 Модули, реализующие аналоговые схемы

На рисунке 6 изображена УАК-схема для определения интегрирования, предложенная К. Муром [5].

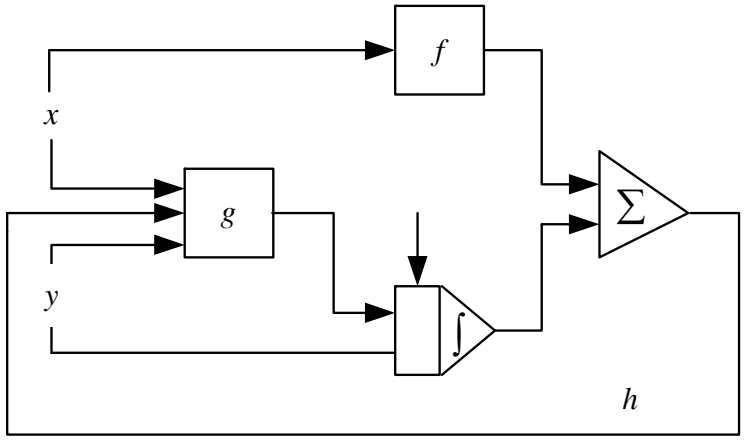


Рис. 6 УАК-схема для определения интегрирования, используемая К. Муром, где $h(x_0) = f(x), d_y h(x, y) = g(x, y, h)$

УАК-схему К. Шеннона, УАК-схему К. Мура обобщает простая непрерывная машина (ПНМ) Б. Кониковской, представленная на рисунке 7.

ПНМ Б. Кониковской задается условиями:

1. $(\tau > 0) \wedge (\forall f_0 \in DM)\left(M(f_0)\middle|[0;\tau) = f_0\right) \vee$

   $(\tau = 0) \wedge (\forall x \in DM)\left(\left(M(x)\right)(0) = x\right)$;

2. $(\forall f \in RM)(\forall a \geq 0)(f_a \in RM)$.

ПНМ позволяет реализовать операции итерации, неравенства и дифференциальные уравнения.

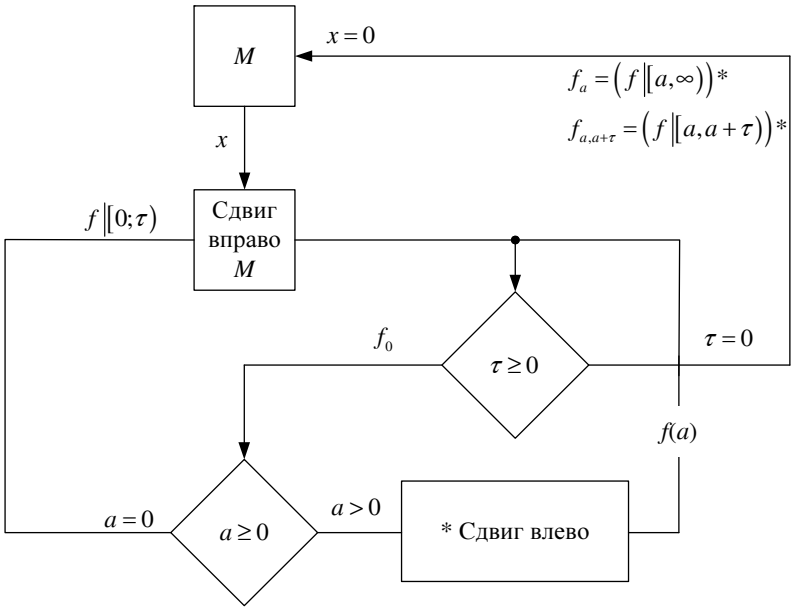


Рис. 7 Структурная схема простой непрерывной машины Б. Кониковской, использующая динамическую систему

Суммарные результаты представлены в виде соотношений между вычислимыми функциями класса N, класса R и класса $N - R$. Соотношения рекурсивных функций изображены на рисунке 8.

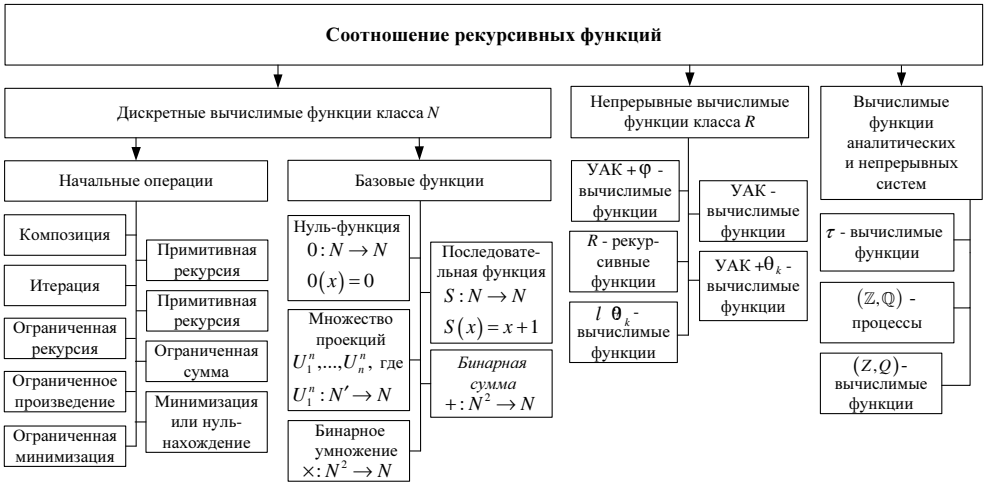


Рис. 8 Определяющие соотношения рекурсивных функций класса N, класса R и класса непрерывных динамических систем

2. Теоретические исследования основ современных технологий обработки аналого-цифровой информации

Повышения скорости обработки информации можно добиться только при совместном исследовании структуры решаемых задач, алгоритмов и архитектуры вычислительных систем.

Наш подход основывается на утверждении А. Н. Колмогорова и В. А. Успенского, предпринявших в 1958 г. попытку расширить понятие алгоритма и пришедших к выводу, что самое общее понятие алгоритма связывается с определением вычислимой функции, аргументами и значениями которой являются натуральные числа. В дальнейших рассуждениях будем использовать τ-ВФ, (Z,Q)-ВФ, $(\mathbb{Z},\mathbb{Q})$-ВФ, существенным в определении которых является то, что аргументы и значения функций – действительные переменные [1, 2, 5, 9, 11].

Разработка основ современных технологий обработки аналого-цифровой информации на основе (Z,Q)-машины и ее обобщение на многовходовый случай $(\mathbb{Z},\mathbb{Q})$-системы является актуальной, т.к. позволяет, с одной стороны, расширить использование обрабатывающей компоненты гибридного компьютера в нейросети, учитывая, что она есть алгоритм (или множество обыкновенных дифференциальных уравнений), с другой – связать гибридный процессор с непрерывной динамической системой и тем самым расширить функции, генерируемые гибридным процессором.

Цель второго раздела статьи заключается в теоретическом исследовании основ современных технологий обработки аналого-цифровой информации посредством (Z,Q)-машин и многовходового использования таких машин в нейросетях.

Представим Z_k как начальный отрезок непрерывного времени Q_k на ленте с номером $k=1,2,...,n$.

Если задано значение функции f_k на начальном отрезке Z_k, то можно однозначно определить продолжение этой функции на всем непрерывном отрезке времени Q_k. Напомним, что в математике рекурсией называется способ описания функции или процессов через самих себя.

Однозначное продолжение задает оператор *M*, и для одной *k*-й ленты

$$M(f)\,|\,Z_k = f.$$

Более точно для n лент начальные отрезки (начальная информация) можно записать:

$$\left.\begin{array}{l} f_1 : Z_1 \to S; \\ f_2 : Z_2 \to S; \\ \quad ... \\ f_n : Z_n \to S, \end{array}\right\} \text{ начальная информация}$$

где *S* – произвольное, но в дальнейшем фиксированное, непустое множество.

Всю начальную информацию обозначим как $f=(f_1,...,f_n)$, тогда

$$M(f)\,|\,\mathbb{Z} = f$$

для любой $f \in DM$, где M – система, $M(f)$ – процесс и система $M(f)=(\overline{f_1},\overline{f_2},...,\overline{f_n})$, $\mathbb{Z}$ – декартово произведение множеств $Z_1,...,Z_n$.

Набор *n* готовых лент:

$$\overline{f_1}: Q_1 \to S;$$
$$\overline{f_2}: Q_2 \to S;$$
$$\ldots$$
$$\overline{f_n}: Q_n \to S;$$

$Q_0 = Q_1 \bigcap Q_2 \bigcap \ldots \bigcap Q_n$ – пересечение множеств; $\mathbb{Q} = Q_1 \times Q_2 \times \ldots \times Q_n$ – декартово произведение, но $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ могут быть разными.

Вычисление системы из *n* лент:

$$\varphi_f(t) = \left(\overline{f_1}(t), \overline{f_2}(t), \ldots, \overline{f_n}(t)\right) \text{ для любых } t \in Q_0.$$

Процесс рассматривается как *n* готовых лент.

Все начальные отрезки $f = (f_1, \ldots, f_n)$ составляют множество DM. Продолжение функций $\overline{f_i}$ на множестве Q_i обозначим RM.

3. Развитие теории $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-систем

$(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-системой $M: DM \to RM$ называется такая система, в которой выполняются два условия:

1) однозначное продолжение

$$\forall f \in DM,\ M(f)\big| \quad = \overline{f};$$

2) если $f \in RM$, то после сдвига $\overline{f}$ влево

$$f_{\text{новая}} = \left(f_1(t_1 + a), f_2(t_2 + a), \ldots, f_n(t_n + a)\right),$$

тогда $f_{\text{новая}} \in RM$, $a \in Q_1, a \in Q_2, \ldots, a \in Q_n \Leftrightarrow a \in Q_0$, здесь Q_0 –общее время для всех лент.

Теоретическое обоснование и определение $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-систем для исследования в многовходовых вычислительных системах и переход к непрерывным динамическим системам позволит осуществить использование методики проектирования гибридного процессора для проектирования аналоговых нейронных сетей. Разработка обрабатывающей компоненты нейросети является актуальной и позволяет расширить и связать методики проектирования гибридного процессора и нейрокомпьютера.

Цель третьего раздела статьи заключается в разработке теоретического обоснования использования многовходовых $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-систем для проектирования аналоговых нейросистем и гибридных процессоров.

Определение [4]. Отображение $f \in F_Q$ называется $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-процессом, если и только если существует $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-система *M*, такая, что $f \in RM$. Здесь F_Q – множество отображений вида $f: \mathbb{Q} \to S^n$. Если *f* есть $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-процесс, то верна одна из двух ситуаций:

1) начиная с некоторого момента времени f – периодическая функция (рис. 9,а);

2) если не реализуется первая ситуация, то обязательна вторая ситуация и *f* будет *Z*-инъективной (рис. 9,б).

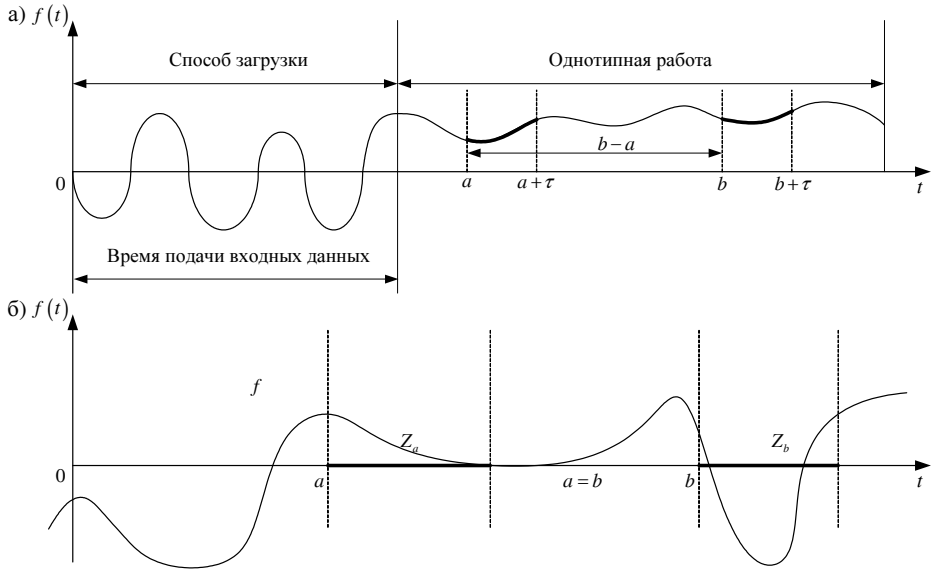


Рис. 9 Представление *f* как $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$ - процесса

Итак, $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-система – это оператор M, который однозначно продолжает начальные значения на все ленты; (Z,Q)-машина – это $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-система в случае одной ленты; $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-процесс – результат применения $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-системы для получения n готовых лент; $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-вычисление, результат работы $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-системы, рассматриваемый в каждый (один) момент времени для всех n лент одновременно; $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-вычисление совпадает с $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-процессом для (Z,Q)-машины (т.к. лента одна).

Для (Z,Q)-машины лента будет одна. Тогда для аналоговой технологии обработки временная ось может быть представлена как произвольное множество точек Q, равное R^+ или N_0, где R^+ – множество положительных реальных чисел; N_0 – множество целых неотрицательных чисел; Z – произвольное множество Q, т.е. $Z \subseteq Q$.

С учетом сказанного на данной модели можно исследовать несколько типов машин. Так, если:

$$Z = \{0\} \text{ и } Q = N_0, \text{ то } M_1 = (\{0\}, N_0);$$

$$Z = \{0, 1, 2, ..., k-1\} \text{ и } Q = N_0, \text{ то } M_2 = (\{0, 1, 2, ..., k-1\}, N_0);$$

$$Z = \{0\} \text{ и } Q = R^+, \text{ то } M_3 = (\{0\}, R^+);$$

$$Z = [0, \tau) \text{ и } Q = R^+, \text{ то } M_4 = \left([0, \tau), R^+\right).$$

Первые два класса машин M_1, M_2 являются дискретными, а M_3, M_4 – аналоговыми. M_1 описывает тип классических цифровых машин Фон Неймана (МФН) с одним счетчиком команд l и регистром команд r. M_2 – совокупность МФН с множеством счетчиков команд $l_1, ..., l_n$ и множеством регистров команд $r_1, ..., r_2$.

M_3, M_4 служат для представления аналоговых машин для решения линейных ОДУ с постоянными и переменными коэффициентами.

Заключение

Основным результатом статьи является теоретическое обоснование аналоговой, цифровой и аналого-цифровой технологии обработки и разработка математических моделей гибридных процессоров и обрабатывающей компоненты нейросети.

Научная новизна статьи состоит в следующем:

– разработана и исследована структурная схема и алгоритм работы простой непрерывной машины на основе непрерывно-временной динамической системы, позволяющие обобщить УАК Шеннона и УАК Мура.

– разработана теория многовходовых $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-систем для проектирования гибридного процессора и обрабатывающей компоненты нейросети. С вычислительной точки зрения обрабатывающая компонента нейросети есть множество обыкновенных дифференциальных уравнений и начальных условий, которые представляют программу работы нейрокомпьютера.

Предлагаемый подход позволяет расширить классы решаемых задач, что подтверждается приведенными в статье примерами моделирования машины Тьюринга, соотношениями между вычислительными функциями класса *N*, класса *R* и класса *N*–*R*, а также преобразованием $(\mathbb{Z}, \mathbb{Q})$-системы при определенной интерпретации в машину Неймана и аналоговые машины.

Список литературы

1. **Pour-El, M. B.** The Mathematical Theory of the Analog Computer. In Mathematical Perspectives on Neural Networks / M. B. Pour-El ; edited by P. Smolensky, M. C. Mozer, D. E. Rumelhart. – 1996. – P. 225–241.
2. **Pour-El, M. B.** Abstract computability and its relations to the general purpose analog computer / M. B. Pour-El // Trans. Am. Math. Soc. – 1974. – № 199. – P. 1–28.
3. **Rubel, L. A.** The extended analog computer. Advances in Applied Mathematics / L. A. Rubel. – 1993. – № 14. – P. 39–50.
4. **Шеннон, К.** Математическая теория дифференциального анализатора / К. Шеннон // Работы по теории информации и кибернетике / пер. с англ. – М. : Мир, 1963. – С. 709–728.
5. **Moore, C.** Recursion Theory on the Reals and Continuous – time computation / C. Moore // Theoret. Comput. Sci. – 1996. – № 162. – P. 24–44.
6. **Hirsch, M. W.** Dynamiacl Systems In Mathematical Perspectives on Neural Networks / M. W. Hirsch ; edited by P. Smolensky, M. C. Mozer, D. E. Rumelhart. – 1996. – P. 275–320.
7. **Mycka Jerzy.** The computational power of continuous dynamic systems / Mycka Jerzy, Costa Jose Felix. – 2005. – V. 3354. – LNCS. – P. 163–174.

8. **Siegelmann, H. T.** Analog computation with dynamical systems / H. T. Siegelmann, S. Fishman // Physica D. – 1998. – V. 120. – P. 214–235.
9. **Konikowska, B.** Continuous Machines, Information and Control / B. Konikowska. – 1973. – V. 22. – P. 353–372.
10. **Burnez, O.** The General Purpose Analog Computer and Computable Analysis are two equivalent paradigms of analog computation / O. Burnez, M. L. Campagnolo, D. S. Graca, E. Hainry // J. Y. Cai, S. B. Cooper and A. Li, editors, Theory and Applications of Models of Computation TAMC'06, LNCS 3959. – 2006. – P. 631–643. – Springer – Verlag.

УДК 004.932.4

С. В. Сорокин, М. А. Щербаков

РЕАЛИЗАЦИЯ SD-ROM ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Рассмотрена реализация SD-ROM фильтра с использованием нечеткой логики. В результате проведенного сравнительного анализа SD-ROM и медианных фильтров в задачах удаления импульсного шума подтверждается превосходство SD-ROM фильтрации. Применение концепции нечеткой логики при реализации SD-ROM фильтров позволяет практически полностью удалить шум на изображении.

Введение

Медианный фильтр является наиболее используемым нелинейным фильтром для удаления импульсного шума. Тем не менее при его применении изображение подвергается сглаживанию, а детали изображения становятся расплывчатыми, особенно при использовании окна фильтра размером более 3×3. Для улучшения характеристик медианной фильтрации разработано много различных модификаций, включая центрированные и перестановочные взвешенные медианные фильтры [1]. Хотя данные модификации и превосходят обычную медианную фильтрацию по своим характеристикам, при большом уровне шума, вероятность которого превышает 0,3, данные фильтры не способны эффективно справиться с задачей его удаления с сохранением границ деталей изображения.

С целью решения поставленной задачи разработан SD-ROM фильтр [2, 3], который также называют зависимым от сигнала фильтром среднего значения ранжированной последовательности.

SD-ROM фильтр

Рассмотрим окно изображения, размером 3×3, в котором центральный элемент обозначим $x(5)$. Определим вектор $x'(n)$, который состоит из элементов $x(n)$ рассматриваемого окна, за исключением центрального элемента $x(5)$:

$$\begin{aligned} x'(n) &= \left[x'_1(n),\ x'_2(n),\ ...,x'_8(n)\right] = \\ &= \left[x(n_1-1,n_2-1),\ x(n_1-1,n_2),\ x(n_1-1,n_2+1);\right. \\ &\quad x(n_1,n_2-1),\ x(n_1,n_2+1); \\ &\quad \left. x(n_1+1,n_2-1),\ x(n_1+1,n_2),\ x(n_1+1,n_2+1)\right], \end{aligned} \tag{1}$$

где n_1 представляет собой координаты по оси y, n_2 – координаты по оси x, если рассматривать изображение в декартовых координатах.

Полученные элементы вектора $x'(n)$ можно отсортировать по величине в порядке возрастания, т.е. по рангу, при этом получим вектор ранжированной последовательности:

$$r(n) = \left[r_1(n),\ r_2(n),\ ...,\ r_8(n)\right], \tag{2}$$

где $r_1(n) \le r_2(n) \le ... \le r_8(n)$.

После этого обозначим $m(n)$ как среднее значение ранжированной последовательности (ROM – Rank Ordered Mean):

$$m(n) = \frac{r_4(n) + r_5(n)}{2}. \quad (3)$$

Следует отметить, что (3) представляет собой выход простого медианного фильтра с той лишь разницей, что на его вход поступают все элементы окна за исключением центрального элемента.

Далее определим вектор $d(n) \in R^4$, который назовем вектором разниц:

$$d(n) = [d_1(n),\ d_2(n),\ d_3(n),\ d_4(n)], \quad (4)$$

где

$$d_i(n) = \begin{cases} r_i(n) - x(5), & \text{для } x(5) \le m(n), \\ x(5) - r_i(n), & \text{для } x(5) > m(n), \end{cases} \quad (5)$$

при $i = 1,\ 2,\ 3,\ 4$.

Вектор разниц представляет собой оценку вероятности воздействия шума на элемент $x(5)$, находящийся в центре окна. Например, рассмотрим элемент $d_1(n)$: если он положителен, значит текущий элемент $x(5)$ является либо наибольшим, либо наименьшим в рассматриваемом окне. Если значение $d_1(n)$ не только положительное, но и превышает определенное пороговое значение, то вероятность того, что элемент $x(5)$ подвержен влиянию шума, очень высока.

Таком образом, с помощью четырех элементов вектора $d(n)$ можно более точно оценить вероятность воздействия импульсного шума на центральный элемент даже в том случае, если в окне фильтра присутствует не один элемент, подверженный влиянию шума.

Для изображений, подверженных влиянию униполярного импульсного шума, величина которого определяется максимальным значением яркости, $d_i(n)$ принимает вид

$$d_i(n) = x(5) - r_i(n),\ i = 1,\ 2,\ 3,\ 4. \quad (6)$$

Схожим образом при униполярном шуме, величина которого определяется минимальным значением яркости, $d_i(n)$ принимает вид

$$d_i(n) = r_i(n) - x(5),\ i = 1,\ 2,\ 3,\ 4. \quad (7)$$

На рисунке 1 изображена структура SD-ROM фильтра.

Оператор определения импульса в зависимости от входной последовательности принимает одно из двух решений: если центральный элемент окна подвержен влиянию шума, то к входной последовательности применяется ROM фильтр, в противном случае выходом фильтра является исходный центральный элемент.

Рассмотрим подробно алгоритм оператора определения импульса. Данный оператор определяет $x(5)$ как элемент, не подверженный влиянию шума, если выполняются следующие неравенства для всех i:

$$d_i(n) \le T_i,\ i = 1,\ 2,\ 3,\ 4, \tag{8}$$

где $T_1,\ T_2,\ T_3,\ T_4$ – пороговые коэффициенты, причем

$$T_1 < T_2 < T_3 < T_4. \tag{9}$$

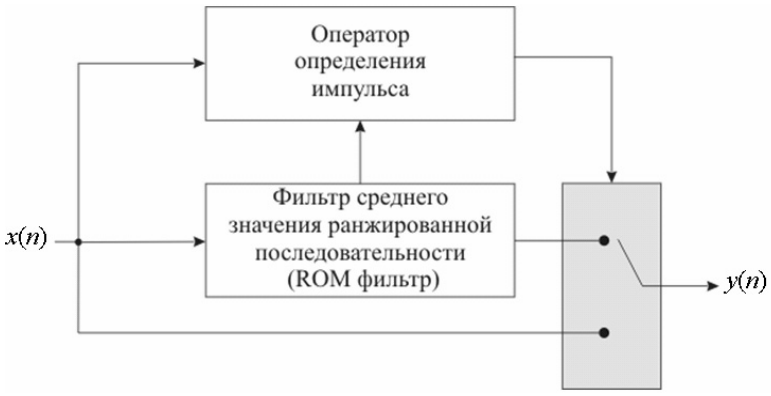


Рис. 1 SD-ROM фильтр

Если неравенство (8) не выполняется для всех i, рассматриваемый элемент считается подверженным влиянию шума.

Рассмотренный SD-ROM фильтр также называют пороговым SD-ROM фильтром, т.к. его выход определяется только вектором разниц (4) и пороговыми коэффициентами. Результаты использования данного алгоритма для удаления импульсного шума [4] позволили выделить для каждого порогового коэффициента T_i множество значений, при которых SD-ROM фильтр наилучшим образом удаляет импульсный шум:

$$\begin{aligned} T_1 &\in \{4,\ 8,\ 12\}, \\ T_2 &\in \{15,\ 20,\ 25\}, \\ T_3 &\in \{38,\ 40,\ 42\}, \\ T_4 &\in \{47,\ 50,\ 53\}. \end{aligned} \tag{10}$$

В большинстве случаев используют следующие пороговые коэффициенты:

$$T_1 = 8,\ T_2 = 20,\ T_3 = 40,\ T_4 = 50. \tag{11}$$

Тем не менее в некоторых приложениях требуется рассматривать пороговые коэффициенты в следующих интервалах:

$$\begin{aligned} 5 &\le T_1 \le 15, \\ 15 &\le T_2 \le 25, \\ 30 &\le T_3 \le 50, \\ 40 &\le T_4 \le 60. \end{aligned} \tag{12}$$

Процесс выбора пороговых коэффициентов, хоть и является экспериментальным, но не требует большого количества экспериментов, т.к. наблюдатель уверенно различает уровень импульсного шума.

Следует отметить существование других схем для удаления импульсного шума [5–9]. Основной особенностью этих схем, так же как и при рассмотрении порогового SD-ROM фильтра, является тот факт, что выход фильтра принимает либо входное значение, либо вычисляется с использованием различных модификаций медианной фильтрации.

Рассмотренный SD-ROM фильтр находит применение не только в задачах обработки изображений, но и в других приложениях, включая обработку многомерных и одномерных сигналов [10].

Так же как и в случае обычной медианной фильтрации, существуют рекурсивные SD-ROM фильтры, использование которых позволяет достичь лучших результатов в сравнении с нерекурсивными. Реализация рекурсивного алгоритма подобна реализации рекурсивной взвешенной медианной фильтрации, т.е. на вход фильтра подаются как элементы исходного изображения, так и элементы предыдущего выхода фильтра.

Использование нечеткой логики в SD-ROM фильтрах

Как видно из рисунка 1, выход фильтра $y(n)$ меняется в зависимости от переключателя (обозначен серым прямоугольником), которому подает команду на переключение оператор определения импульса. Основными данными, на основе которых оператор переключает схему, являются вектор разниц (4), пороговые коэффициенты, выход фильтра среднего значения ранжированной последовательности и вектор входных значений. Используя концепцию нечеткой логики [11], данный метод можно записать в общем виде, где $y(n)$ представляет собой линейную комбинацию $x(n)$ и $m(n)$:

$$y(n) = \alpha\big(d(n)\big)x(n) + \beta\big(d(n)\big)m(n), \tag{13}$$

где сумма весовых коэффициентов $\alpha\big(d(n)\big)$ и $\beta\big(d(n)\big)$ равна единице, т.е.

$$\alpha\big(d(n)\big) = 1 - \beta\big(d(n)\big). \tag{14}$$

Заметим, что коэффициенты $\alpha\big(d(n)\big)$ и $\beta\big(d(n)\big)$ имеют отношение только к вектору разниц $d(n)$, а не к пороговым коэффициентам.

Данная реализация также известна как «обобщенный SD-ROM фильтр» и схематично изображена на рисунке 2.

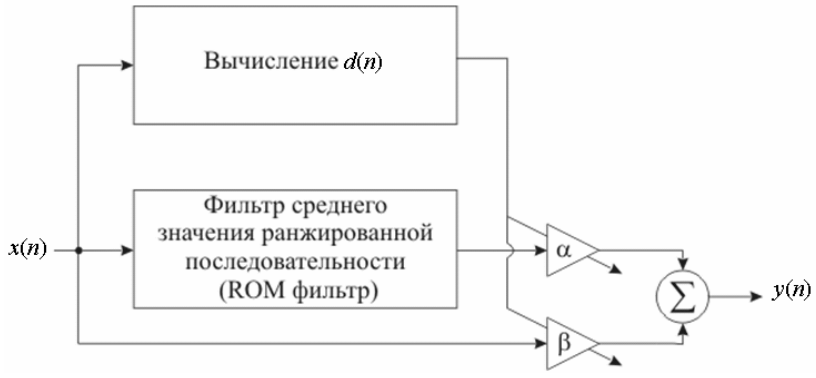


Рис. 2 Обобщенный SD-ROM фильтр

Стоит отметить, что пороговый SD-ROM фильтр является частным случаем обобщенного SD-ROM фильтра, где $\alpha\big(d(n)\big)$ может принимать только два значения: 0 и 1. Различие между двумя фильтрами можно наблюдать при сравнении функций $\alpha\big(d(n)\big)$ (рис. 3, 4), где для наглядности рассматривается двухмерный вектор разниц, т.е. $d(n)=\big[d_1(n),\ d_2(n)\big]$.

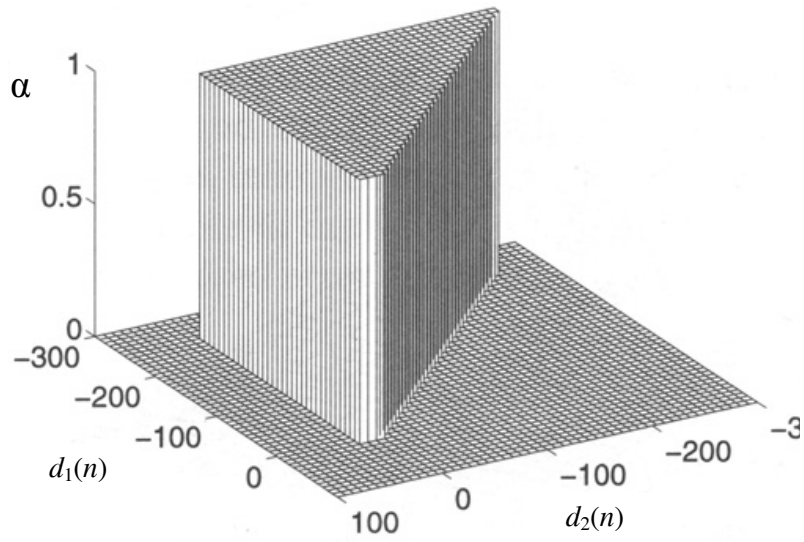


Рис. 3 Функция $\alpha\big(d(n)\big)$ для порогового SD-ROM фильтра при $d(n)\in R^2$

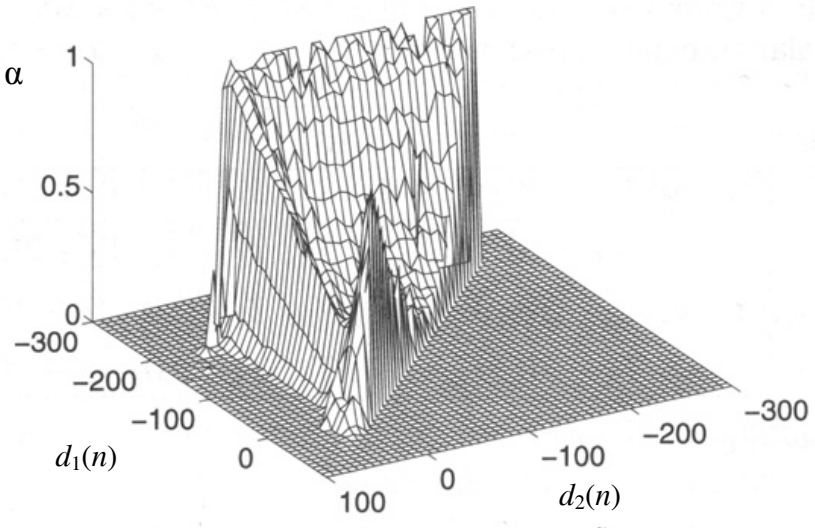


Рис. 4 Функция $\alpha\big(d(n)\big)$ для обобщенного SD-ROM фильтра при $d(n)\in R^2$

При помощи нечеткой логики возможно лучшим образом обработать изображение в сравнении с пороговым SD-ROM фильтром, в отличие от которого обобщенный SD-ROM фильтр также эффективно удаляет гауссов

шум, а также гауссов и импульсный шум, которые одновременно воздействуют на изображение.

Значения коэффициентов α возможно получить с помощью оптимизационных алгоритмов. Полученные таким образом значения коэффициентов хранятся в памяти, а функция $\alpha(d(n))$ реализуется в виде таблицы. Но получаемая таким образом таблица имеет большой объем данных. Вследствие чего вычислительная сложность и требования к памяти становятся весьма существенными. Для решения данной задачи используется метод отображения четырехмерного векторного пространства R^4 в M неперекрывающихся областей A_i, $i = 1, 2, ..., M$. После чего каждой области A_i ставится в соответствие определенное постоянное значение $\alpha(d(n))$. На рисунке 5 изображена данная реализация для $d(n) \in R^2$ и $M = 17^2$, при этом исходные коэффициенты изображены на рисунке 4.

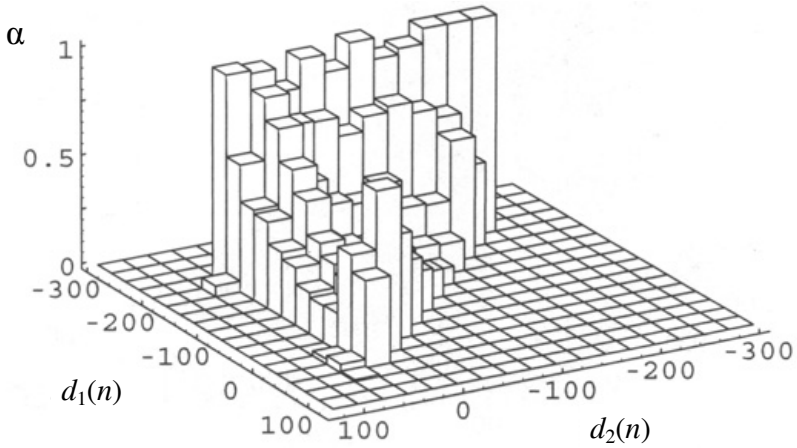


Рис. 5 Функция $\alpha(d(n))$ для обобщенного SD-ROM фильтра после аппроксимации

Таким образом, каждая область A_i определяется декартовым произведением четырех скалярных областей. Скалярная область определяется интервалом $(q_{i-1}, q_i]$, где q_i представляет собой порог, с помощью которого и осуществляется аппроксимация.

Обозначим α_i и β_i коэффициенты, которые получаются в результате аппроксимации коэффициентов $\alpha(d(n))$, $\beta(d(n))$ соответственно, т.е.

$$\alpha_i = \alpha(d(n)) \mid_{d(n) \in A_i}, \tag{15}$$

и

$$\beta_i = \beta(d(n)) \mid_{d(n) \in A_i}, \tag{16}$$

где $i = 1, 2, ..., M$. При этом (13) примет вид

$$y(n) = \alpha_i x(n) + \beta_i m(n). \tag{17}$$

При реализации обычно используют $M = 6^4$ или $M = 8^4$, т.к. дальнейшее увеличение значения M несущественно влияет на конечный результат, на который главным образом воздействуют значения пороговых коэффициентов T.

В качестве оптимизационных алгоритмов используются алгоритмы наименьших квадратов и среднеквадратичной ошибки. В настоящей работе использовался алгоритм наименьших квадратов.

Результаты применения SD-ROM фильтров

На рисунке 6 показаны результаты работы медианных и SD-ROM фильтров при обработке изображения, подверженного импульсному шуму. Рассматриваемые изображения представляют собой изображения с 255 возможными уровнями серого. На рисунке 6,а дано исходное изображение, а на рисунке 6,б изображение, подверженное влиянию импульсного шума с вероятностью 0,2. Результат обработки простым медианным фильтром с маской 3×3 представлен на рисунке 6,в, где еще можно увидеть скопление шума. Рисунок 6,г демонстрирует работу порогового SD-ROM фильтра. По сравнению с медианным фильтром SD-ROM фильтр гораздо лучше справился с задачей удаления шума, т.к. визуально его практически не заметить. При использовании обобщенного SD-ROM фильтра (рис. 6,д) с $M = 6^4$ получаем изображение, которое еще ближе к оригиналу. В таблице 1 для результатов обработки приведены значения средней абсолютной ошибки (MAE), средней квадратичной ошибки (MSE) и значения пикового отношения сигнал/шум (PSNR), которое определяется:

$$\mathrm{PNSR} = 10\log_{10}\left(\frac{\sum_n 255^2}{\sum_n [y(n)-v(n)]^2}\right) dB, \qquad (18)$$

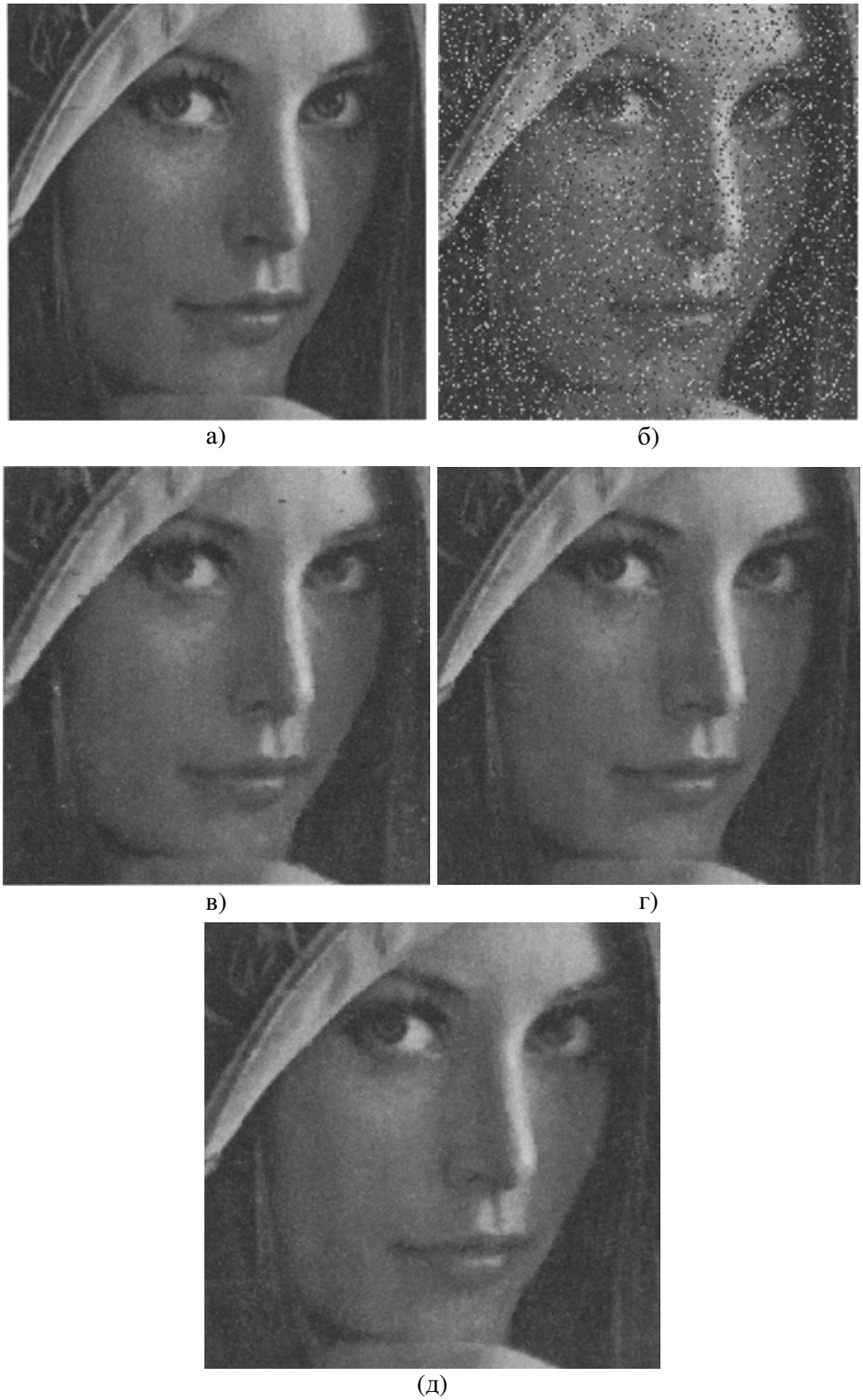
где $v(n)$ – первоначальное изображение.

Таблица 1

Алгоритм	MAE	MSE	PSNR
Простой медианный фильтр с маской 3×3	4,31	90,4	28,6
Пороговый SD-ROM фильтр	1,32	29,22	33,5
Обобщенный SD-ROM фильтр с $M = 6^4$	1,33	22,30	34,6

Рассмотрим случай, когда изображение подвержено влиянию импульсного шума с вероятностью 0,4, т.е. почти каждый второй пиксель подвержен влиянию шума. Данное изображение приведено на рисунке 7,а.

Результат обработки изображения на рисунке 7,а простым медианным фильтром с маской 3×3 показан на рисунке 7,б. Результат обработки простым медианным фильтром с маской 5×5 изображен на рисунке 7,в. При сравнении результатов работы двух медианных фильтров видно, что фильтр с маской 5×5 лучше справился с задачей удаления шума, но существенно сгладил изображение.

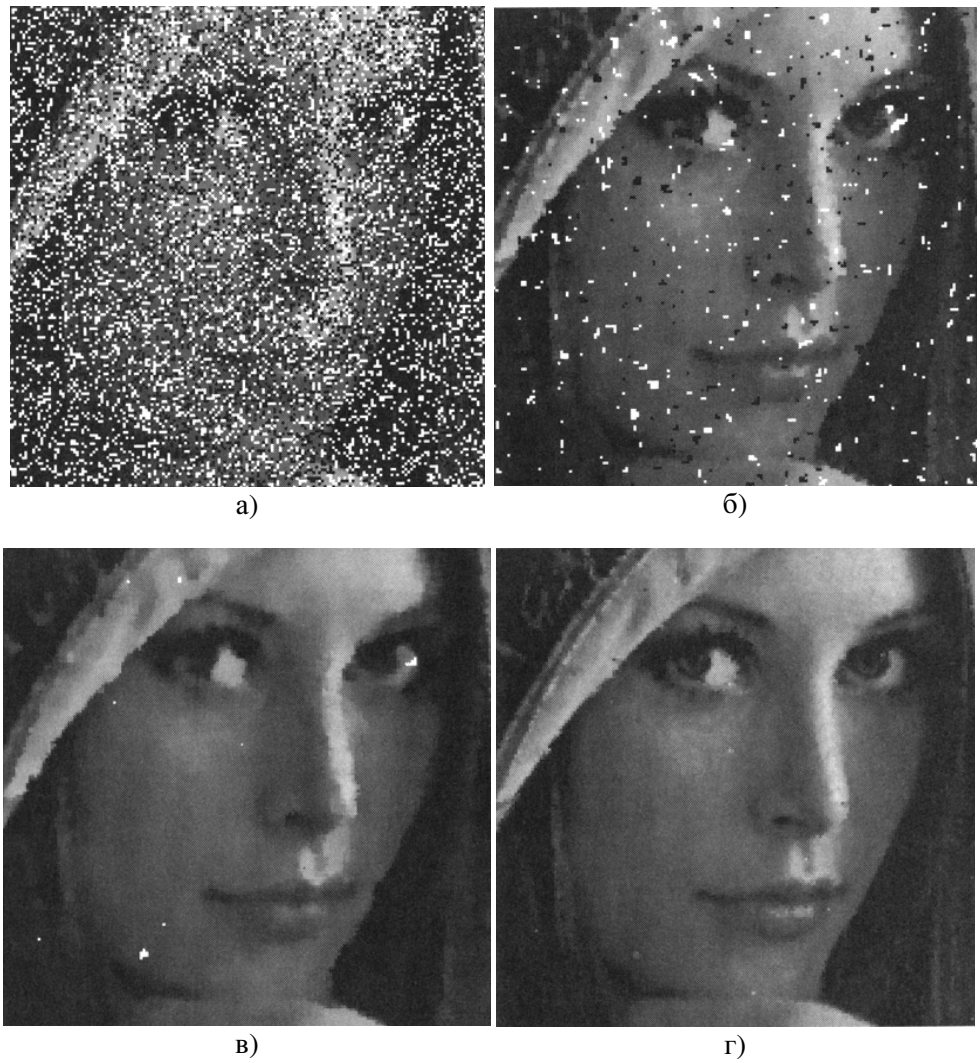


а) б)

в) г)

(д)

Рис. 6 Удаление импульсного шума при использовании медианных и SD-ROM фильтров



а) б)

в) г)

Рис. 7 Обработка изображения, подверженного влиянию 40% шума

Результат обработки пороговым SD-ROM фильтром показан на 7,г. Данный фильтр практически полностью удалил импульсный шум на изображении, при этом не наблюдается эффекта сглаживания изображения. В таблице 2 приведены значения средней абсолютной ошибки (MAE), средней квадратичной ошибки (MSE) и значения пикового отношения сигнал/шум (PSNR) для медианной и SD-ROM фильтрации, для изображений на рисунке 7.

Таблица 2

Алгоритм	MAE	MSE	PSNR
Простой медианный фильтр с маской 3×3	9,2	834,8	19,3
Простой медианный фильтр с маской 5×5	6,3	164,4	25,9
Пороговый SD-ROM фильтр	2,9	62,7	29,4

Заключение

Результаты исследования подтверждают тот факт, что на сегодня самым эффективным средством удаления импульсного шума считаются SD-ROM фильтры, которые также называют зависимыми от сигнала фильтрами среднего значения ранжированной последовательности. Они демонстрируют лучшие результаты в сравнении с другими медианными фильтрами, при этом пороговый SD-ROM фильтр позволяет практически полностью восстановить изображение, даже при уровне шума 40%. Реализация SD-ROM фильтров, в частности порогового, не требует больших вычислительных затрат с учетом существующих вычислительных мощностей.

Список литературы

1. **Сорокин, С. В.** Использование взвешенных медианных фильтров для удаления импульсного шума при обработке изображений / С. В. Сорокин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 50–57.
2. **Abreu, E.** A signal dependent rank ordered mean (SD–ROM) filter – a new approach for removal of impulses from highly corrupted images / E. Abreu, S. K. Mitra // In Proc. Intl. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal processing. – 1995. – V. 4. – P. 2371–2374.
3. **Abreu, E.** A new efficient approach for removal of impulse noise from highly corrupted images / E. Abreu, M. Lightstone, S. K. Mitra, K. Arakawa // IEEE Trans. Image Process., Special Issue on Nonlinear image processing. – 1996. – № 5 (6). – P. 1012–1025.
4. **Mitra, S.** Nonlinear image processing / S. Mitra, G. Sicuranza // Academic press. – 2001. – 455 p.
5. **Abreu, E.** A new efficient approach for removal of impulse noise from highly corrupted images / E. Abreu, M. Lightstone, S. K. Mitra, K. Arakawa // IEEE Trans. Image Process., Special Issue on Nonlinear image processing. – 1996. – № 5 (6). – P. 1012–1025.
6. **Florencio, D. A.** F. Decision-based median filter using local signal statistics / D. A. F. Florencio, R. W. Schafer // In Visual Communication and image processing, Proc. SPIE. – 1994. – V. 2308. – P. 268–275.
7. **Kundu, A.** Applications of two-dimensional generalized mean filtering for removal of impulse noise from images / A. Kundu, S. K. Mitra, P. P. Vaidyanathan // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. – 1984. – V. 32. – P. 600–609.
8. **Mitra, S. K.** A new nonlinear algorithm for removal of impulse noise from highly corrupted images / S. K. Mitra, T-H. Yu // IEEE Intl. Symp. On Circuits and Systems. – 1994. – V. 3. – P. 17–20.
9. **Sun, T.** Detail-preserving median based filters in image processing / T. Sun, Y. Neuvo // Patt. Recog. Lett. – 1994. – № 15. – P. 341–347.
10. **Chandra, C.** An efficient method for the removal of impulse noise from speech and audio signals / C. Chandra, M. S. Moore, S. K. Mitra // IEEE Intl. Symp. On Circuits and Systems. – 1998. – V. 4. – P. 206–209.
11. **Arakawa K.** A median filters based on fuzzy rules / K. Arakawa // IEICE Trans, J78-A(2). – 1995. – P. 123–131.

УДК 330.1, 65.0

В. А. Мещеряков

МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА

Определены основные составляющие механизма управления системой менеджмента качества (СМК) государственного университета и результаты их применения. Управление СМК рассматривается в виде процесса, входом которого являются проблемы развития СМК, а выходом-результатом – управляемость самой системы.

Вопрос управления системой менеджмента качества (СМК) государственного университета носит комплексный характер. Многообразие компонентов, влияющих на функционирование СМК, обусловливает сложность разработки методологии и научных основ управления СМК, обеспечивающих ее результативное и эффективное функционирование в государственном университете, а также неоднозначность выбора подходов к реальному управлению СМК [1].

Необходима разработка механизма управления СМК государственного университета, который в наиболее общем случае включает:

– методы принятия управленческих решений относительно СМК;

– процедуру внутреннего обмена информацией по вопросам СМК;

– структурную организацию органов управления СМК (рис. 1).

Рис. 1

Новый механизм управления СМК должен разрабатываться с учетом:

– нормативно-правовых требований к СМК;

– полномочий, которыми наделены субъекты управления;

– особенностей производственной среды, в отношении которой принимаются управленческие решения (рис. 1).

Эффективность механизма управления СМК обеспечивается свойствами управляемой подсистемы, в первую очередь управляемостью университетской среды, которая, в свою очередь, обеспечивается:

– информированностью персонала о целесообразности наличия СМК в университете;

– компетентностью персонала в области качества;

– заинтересованностью и вовлеченностью персонала в деятельность по совершенствованию СМК университета;

– структурированностью организационной системы университета;

– оптимальностью процессов СМК университета.

Основное назначение организационной системы СМК – обеспечение своевременного и качественного решения проблем университета. Решение этой задачи является одной из основных функций механизма управления СМК. Соответственно, он должен иметь статус организационного механизма решения проблем университета с соответствующими полномочиями. Этот механизм должен стать тем элементом, в соответствии с которым должен развиваться системно-процессный подход по постоянному улучшению СМК университета. Одновременно он должен быть базой целенаправленной подготовки организационной системы университета к соблюдению требований ГОСТ Р ИСО 9001-2001. С самого начала его действия, а также в последующем его работа должна быть ориентирована на совершенствование и развитие организационной системы университета.

Требования по поддержанию и развитию системы СМК государственного университета относятся к высшему руководству университета. Именно оно в своей повседневной деятельности должно постоянно руководствоваться восемью принципами менеджмента качества: ориентация на потребителя, лидерство руководителей, вовлечение работников, процессный подход, системный подход к менеджменту, постоянное улучшение, принятие решения, основанное на фактах, взаимовыгодные отношения с поставщиками.

Чтобы в полной мере воспользоваться этими принципами, руководство должно, исходя из возможностей, особенностей и специфики университета, создать *организационную систему университета*, приспособленную к рыночным условиям хозяйствования и обладающую способностью *саморегулирования*, *самосовершенствования* и *саморазвития*.

Все действия, связанные с приспособлением организационной системы к требованиям СМК, относятся к *совершенствованию процессов управления*. Отсюда в целевую программу развития СМК должны быть включены мероприятия по совершенствованию процессов *управленческой деятельности*. Для этого представляется целесообразным рассматривать управление СМК в виде процесса, входом которого являются проблемы развития СМК, а выходом (результатом) – управляемость самой системы [2].

На рисунке 2 представлена диаграмма процесса управления СМК государственного университета.

Рис. 2 Диаграмма процесса управления СМК государственного университета

Главный объект процесса – управляемая СМК. Руководит ею главный субъект СМК – руководитель проекта – представитель высшего руководства по качеству. Руководитель проекта – это индивид, который с полной ответственностью постоянно занимается устранением возникающих в университете проблем или постоянно занимается решением задач в интересах всего университета. При этом руководитель проекта имеет право распоряжаться всеми или значительной частью ресурсов университета и принимать обоснованные решения на их задействование. Руководитель проекта имеет право назначать исполнителей на выполнение заданий, обязан обеспечивать подчиненных ему руководителей и исполнителей ресурсами, контролировать их работу, оказывать им помощь при необходимости, поощрять исполнителей за их работу.

Необходимо руководителем проекта назначить ректора или одного из его замов, например первого проректора. В отдельных случаях целесообразно введение должности проректора по качеству.

Главная функция руководителя проекта – устранять путем разработки решений и воплощения их на практике постоянно возникающие внешние и внутренние проблемы СМК. Под проблемой понимается вопрос, порожденный неудовлетворенностью чем-либо, например неудовлетворенностью внутренним состоянием СМК. По мере анализа проблемы руководитель проекта воспринимает проблему как расхождение между желаемым и реальным состоянием СМК. У него рождается понимание цели, желаемого результата преобразующей деятельности, которое приводит к устранению (разрешению) проблемы. Таким образом:

– проблема – начальный пункт управленческой деятельности;

– формулировка цели – первоначальное формальное представление о направленности действий.

В ходе детального анализа цель расчленяют на подцели. Подцели «привязывают» к исполнителям, объектам приложения усилий и, таким образом, трансформируют в совокупность задач.

Замысел операции (целенаправленной деятельности) руководитель проекта постепенно дорабатывает до решения на ее проведение.

Управленческие решения составляют основу процесса управления системой качества университета. Решения, принимаемые представителем высшего руководства университета по качеству, должны удовлетворять целому

ряду обязательных требований, в том числе целевой направленности, обоснованности, выполнимости, адресности, правомочности, непротиворечивости, своевременности, результативности [2]. При этом любое решение связано с определенным риском (особенно в условиях экономической неопределенности, характерной для современной России). Среди многообразных рисков (макроэкономических, политических, законодательных, инвестиционных, коммерческих и др.) риск выпуска университетом выпускников с уровнем знаний и навыков, не удовлетворяющим требованиям потребителей, относится к числу наиболее значимых как для университета, так и для общества.

На основе оценивания риска предпринимаются действия, направленные либо на избежание негативных ситуаций, либо на минимизацию последствий таких ситуаций.

Далее решение превращается в программы развития, в систему частных целей, планов, задач и критериев их выполнения. В своем решении руководитель проекта ставит задачи руководителям подразделений. От руководителя проекта задачи руководителю подразделения поступают в готовом виде. Для решения отдельных задач руководителю подразделения передаются в распоряжение определенные ресурсы.

После всего этого начинается процесс практической реализации принятого и доведенного до исполнителей решения.

Когда решение уже выполнено, а операция по устранению проблемы завершена, руководитель проекта оценивает полезность и фактическую эффективность этого решения. При этом во внимание принимается не только сам факт, но и степень устранения первоначальной проблемы. Результатом оценки фактической эффективности решения могут быть следующие выводы:

– проблема устранена полностью и ее разрешение не вызвало каких-либо видимых отрицательных последствий:

– проблема устранена частично, но также не наблюдается отрицательных последствий;

– проблема устранена частично, и при ее разрешении возникли некоторые новые затруднения;

– проблема не устранена, а реализация решения по ее устранению вызвала возникновение новых значительных проблем [1].

Разработанные механизмы управления СМК на этапах развития и совершенствования, а также результаты их применения в действующей системе управления государственного университета представлены на рисунках 3, 4.

Новые механизмы управления СМК требуют и новых подходов к менеджменту, персоналу, инновациям и контролю. Совершенствование системы управления должно опираться на международные и российские стандарты ISO серии 9000. Персонал университета должен рассматриваться как основная ценность университета, в том числе за счет реализации положений международного стандарта OHSAS 18000 «Производственная безопасность и здоровье персонала». Применение инновационного менеджмента должно обеспечивать в условиях непрерывного совершенствования управления улучшение оперативно-тактических и стратегических результатов и обеспечивать конкурентоспособность университета как в регионе, так и в России в целом. Особую роль должен играть контроллинг, который в новых условиях работает на стыке *теории принятия решений, математического моделирова-*

ния, теории систем, информационного моделирования и способствует функционированию механизма саморегуляции.

Рис. 3 Основные механизмы управления СМК государственного университета

Рис. 4 Результаты применения основных механизмов управления системой менеджмента качества государственного университета

Список литературы

1. **Подлипаев, Л. Д.** Технология внедрения и постоянного улучшения системы менеджмента качества на предприятии. / Л. Д. Подлипаев – М. : Гелиос АРВ, 2004. – 408 с.
2. **Чудновская, С.Н.** Управленческие решения : учебник / С. Н. Чудновская. – М. : Эксмо, 2007. – 368 с.

УДК 330.1, 65.0

В. А. Мещеряков, Т. И. Мурашкина, Г. В. Суровицкая

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ КАФЕДРЫ

В статье представлена методика оценки результативности процессов кафедры с использованием данных самооценки, внутренних аудитов и данных, традиционно собираемых кафедрой. Предложены показатели процессов кафедры и порядок их расчета. На основе значений этих показателей в анализируемом периоде рекомендовано оценивать результативность процессов кафедры.

В настоящее время актуальна проблема оценки результативности процессов подразделений государственного университета. В статье предлагается методика оценки результативности процессов кафедры с использованием информации, которую традиционно собирает кафедра, и информации, полученной в результате самооценки с использованием «Методических рекомендаций для вузов и ссузов по организации и проведению самооценки эффективности функционирования систем управления в области менеджмента качества на основе модели совершенствования деятельности» [1]. В последних предложена модель совершенствования деятельности, содержащая девять критериев: 1. «Лидирующая роль руководства»; 2. «Политика и стратегия»; 3. «Менеджмент персонала»; 4. «Ресурсы и партнеры»; 5. «Менеджмент процессов»; 6. «Удовлетворенность потребителей»; 7. «Удовлетворенность персонала»; 8. «Влияние кафедры на общество»; 9. «Результаты деятельности кафедры».

Предоставление образовательных услуг кафедры управляется, осуществляется, обеспечивается и измеряется в рамках процессов, показанных в таблице 1 [2]. При присваивании реальному процессу кода в скобках пишут аббревиатуру названия кафедры. В таблице 1 она условно названа АБВ.

Таблица 1

Код процесса	Название процесса	Пункт ИСО 9000
1	2	3
Кафедральные процессы управленческой деятельности (КУ)		
КУ(АБВ)-01	Управление образовательной деятельностью	7.1в, 7.5.1а-д, 6.4
КУ(АБВ)-02	Управление СМК	4, 5.4.1, 8.1, 8.2.3, 8.4
Кафедральные процессы жизненного цикла предоставления образовательных услуг (КОУ)		
КОУ(АБВ)-01	Маркетинг образовательных услуг	7.2
КОУ(АБВ)-02	Проектирование и разработка процедурных документов образовательных программ	7.1 (кроме в), 7.3
КОУ(АБВ)-03	Реализация основных образовательных программ	7.5.3-7.5.5, 8.2.4, 8.3
КОУ(АБВ)-04	Аттестация выпускника	7.5.2
КОУ(АБВ)-05	Трудоустройство и послевузовское обслуживание	7.5.1е

Окончание табл. 1

1	2	3
Кафедральный процесс управления ресурсами (КР)		
КР(АБВ)-01	Управление ресурсами	6.2-6.4
Кафедральные процессы мониторинга и улучшения (КМ)		
КМ(АБВ)-01	Сбор и анализ показателей аттестации и госаккредитации	8.4
КМ(АБВ)-02	Мониторинг удовлетворенности потребителей и заинтересованных сторон	8.2.1
КМ(АБВ)-03	Корректирующие и предупреждающие действия	8.5

Оценка результативности большинства процессов кафедры осуществляется два раза в год:

1) для оценивания состояния на декабрь – результаты деятельности кафедры в осеннем семестре учебного года;

2) для оценивания состояния на июнь – результаты деятельности кафедры в весеннем семестре учебного года.

Оценка результативности процессов КОУ(АБВ)-04 «Аттестация выпускника» и КОУ(АБВ)-05 «Трудоустройство и послевузовское обслуживание» осуществляется один раз в год.

Для оценки результативности процессов кафедры необходимы следующие исходные данные:

– данные о регистрации распоряжений руководства кафедры и фактов их выполнения;

– данные о результатах внутренних аудитов кафедры;

– поправочный коэффициент k (общий для всех кафедр, уточняется в службе качества);

– данные отчета «Самооценка эффективности функционирования системы управления кафедры в области менеджмента качества на основе модели совершенствования деятельности» (далее – отчет о самооценке кафедры);

– данные о конкурсах на специальности кафедры по результатам последней приемной кампании;

– средний конкурс в университете по результатам той же приемной кампании;

– данные о регистрации рабочих программ учебных дисциплин;

– данные о регистрации учебно-методических комплексов кафедры;

– результаты анализа сессий;

– данные отчетов по ГАК и ГЭК;

– данные о выпускниках кафедры, работающих по специальности;

– данные планов корректирующих и предупреждающих действий;

– данные отчетов о корректирующих и предупреждающих действиях.

Не допускается использование незарегистрированных данных. Если на кафедре нет необходимых исходных данных в полном объеме, рекомендуется работать с имеющимися данными и собрать недостающие.

Рекомендуемые показатели процессов кафедры приведены в таблице 2. Они должны быть отражены в спецификациях процессов.

Таблица 2

Процесс	Показатели процесса	Порядок расчета показателей
1	2	3
КУ(АБВ)-01 Управление образовательной деятельностью	Процент выполненных распоряжений руководства кафедры в отношении образовательного процесса от их общего числа: $П_1^{КУ(АБВ)-01}$	Определяется на основе анализа данных журнала регистрации распоряжений руководства кафедры $П_1^{КУ(АБВ)-01} = \frac{ЧВР}{Число_распоряжений} \cdot 100\%$, где ЧВР – число выполненных распоряжений. Если распоряжения не регистрируются и не анализируется их выполнение, то $П_1^{КУ(АБВ)-01} = 0$
КУ(АБВ)-02 Управление СМК	1. Обобщенная результативность процессов СМК кафедры по результатам аудитов: $П_1^{КУ(АБВ)-02}$	$П_1^{КУ(АБВ)-02} = РВА_{месяц_год}^{АБВ}$; расчет $РВА_{месяц_год}^{АБВ}$ см. далее
	2. Степень совершенства процессов СМК по результатам самооценки: $П_2^{КУ(АБВ)-02}$	$П_2^{КУ(АБВ)-02} = \frac{СЗК}{10} \cdot 100\%$, где СЗК – среднее значение по критериям, это среднее из значений критериев о самооценке кафедры
КОУ(АБВ)-01 Маркетинг образовательных услуг	1. Процент от среднего конкурса по университету среднего конкурса на специальности кафедры по итогам последней приемной кампании: $П_1^{КОУ(АБВ)-01}$	$П_1^{КОУ(АБВ)-01} = \frac{СК_{год}^{АБВ}}{СК_{год}^{ВУЗ}} \cdot 100\%$, где $СК_{год}^{АБВ}$ – средний конкурс на специальности кафедры по итогам приемной кампании; $СК_{год}^{ВУЗ}$ – средний конкурс по всему вузу
	2. Степень совершенства по критерию «Влияние кафедры на общество» по результатам самооценки: $П_2^{КОУ(АБВ)-01}$	$П_2^{КОУ(АБВ)-01} = \frac{Значение_критерия\ 8}{10} \cdot 100\%$, значение критерия 8 «Влияние кафедры на общество» берется из отчета о самооценке кафедры

Продолжение табл. 2

1	2	3
КОУ(АБВ)-02 Проектирование и разработка процедурных документов образовательных программ	1. Процент учебных дисциплин, обеспеченных рабочими программами, от их общего числа: $П_1^{КОУ(АБВ)-02}$	Определяется по результатам анализа Журнала регистрации рабочих программ учебных дисциплин (РПД): $П_1^{КОУ(АБВ)-02} = \frac{Количество_РПД}{Число_дисциплин} \cdot 100\%$
	2. Процент учебных дисциплин, обеспеченных учебно-методическими комплексами, от их общего числа: $П_2^{КОУ(АБВ)-02}$	$П_2^{КОУ(АБВ)-02} = \frac{Количество_УМК}{Число_дисциплин} \cdot 100\%$, где используются данные о регистрации учебно-методических комплексов (УМК)
КОУ(АБВ)-03 Реализация основных образовательных программ	1. Средняя успеваемость по итогам последней сессии: $П_1^{КОУ(АБВ)-03}$	Определяется на основании анализа сессии
	2. Среднее качество знаний по итогам последней сессии: $П_2^{КОУ(АБВ)-03}$	Определяется на основании анализа сессии
КОУ(АБВ)-04 Аттестация выпускника	1. Среднее качество защит выпускных квалификационных работ: $П_1^{КОУ(АБВ)-04}$	Определяется на основе отчетов по ГАК
	2. Среднее качество сдачи междисциплинарного экзамена: $П_2^{КОУ(АБВ)-04}$	Определяется на основе отчетов по ГЭК
КОУ(АБВ)-05 Трудоустройство и послевузовское обслуживание	Процент выпускников последнего года, работающих по специальности, от общего числа выпускников кафедры того же года (для анализа на состояния на июнь этого года): $П_1^{КОУ(АБВ)-05}$	$П_1^{КОУ(АБВ)-05} = \frac{ЧРВ}{Число_выпускников} \cdot 100\%$, где ЧРВ – число работающих по специальности выпускников

Окончание табл. 2

1	2	3
КР(АБВ)-01 Управление ресурсами	1. Степень совершенства по критерию «Ресурсы и партнеры» по результатам самооценки: $П_1^{КР(АБВ)-01}$	$П_1^{КР(АБВ)-01} = \frac{Значение_критерия\ 4}{10} \cdot 100\%$, значение критерия 4 «Ресурсы и партнеры» берется из отчета о самооценке кафедры
	2. Степень совершенства по критерию «Менеджмент персонала» по результатам самооценки: $П_2^{КР(АБВ)-01}$	$П_2^{КР(АБВ)-01} = \frac{Значение_критерия\ 3}{10} \cdot 100\%$, значение критерия 3 «Менеджмент персонала» берется из отчета о самооценке кафедры
	3. Степень совершенства по критерию «Удовлетворенность персонала» по результатам самооценки: $П_3^{КР(АБВ)-01}$	$П_3^{КР(АБВ)-01} = \frac{Значение_критерия\ 7}{10} \cdot 100\%$, значение критерия 7 «Удовлетворенность персонала» берется из отчета о самооценке кафедры
КМ(АБВ)-01 Сбор и анализ показателей аттестации и госаккредитации	Степень совершенства по критерию «Результаты деятельности университета» по результатам самооценки: $П_1^{КМ(АБВ)-01}$	$П_1^{КМ(АБВ)-01} = \frac{Значение_критерия\ 9}{10} \cdot 100\%$, значение критерия 9 «Результаты деятельности кафедры» берется из отчета о самооценке кафедры
КМ(АБВ)-02 Мониторинг удовлетворенности потребителей и заинтересованных сторон	Степень совершенства по критерию «Удовлетворенность потребителей» по результатам самооценки: $П_1^{КМ(АБВ)-02}$	$П_1^{КМ(АБВ)-02} = \frac{Значение_критерия\ 6}{10} \cdot 100\%$, значение критерия 6 «Удовлетворенность потребителей» берется из отчета о самооценке кафедры
КМ(АБВ)-03 Корректирующие и предупреждающие действия	Результативность выполнения планов корректирующих и предупреждающих действий на отчетный период: $П_1^{КМ(АБВ)-03}$	$П_1^{КМ(АБВ)-03} = \frac{ЧВМ}{общее_ЧМ} \cdot 100\%$, ЧВМ – число выполненных мероприятий планов корректирующих и предупреждающих действий; общее_ЧМ – общее число мероприятий в планах корректирующих и предупреждающих действий. Если в предшествующем и отчетном периоде выявлены несоответствия в функционировании процессов кафедры, а планы корректирующих действий не разработаны, $П_1^{КМ(АБВ)-03} = 0$

Отметим особенности обозначения показателей. Каждому показателю соответствует два индекса:

– верхний индекс содержит код процесса, к которому относится показатель;

– нижний индекс – это номер показателя процесса по порядку.

Обобщенная результативность $\text{РВА}^{\text{АБВ}}_{\text{месяц_год}}$ процессов кафедры по результатам внутренних аудитов в анализируемом периоде находится на основании анализа количества значительных и незначительных несоответствий, выявленных в ходе аудита.

Значение результативности лежит в пределах от 0 до 100% и по результатам внутреннего аудита определяется с использованием формулы

$$\text{РВА}^{\text{АБВ}}_{\text{месяц_год}} = k \cdot 100\% \sum_{j=1}^{3} c_j b_j , \qquad (1)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий специфические моменты аудита, определяется службой качества университета (он может быть равен взятой в долях результативности выполнения плана внутреннего аудита); c_j – коэффициент весомости показателя b_j, b_1 – показатель значительных несоответствий, для которого $c_1 = 0,5$, а значения определяются по таблице 3; b_2 – показатель незначительных несоответствий, для которого $c_2 = 0,3$, а значения определяются по таблице 4; b_3 – показатель замечаний, для которого $c_3 = 0,2$, а значения определяются по таблице 5.

Таблица 3

Количество значительных несоответствий (ЗН)	>10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	нет
Значение b_1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Таблица 4

Количество незначительных несоответствий (НН)	>15	15	14	13	12	10–11	8–9	6–7	4–5	2–3	0–1
Значение b_2	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Таблица 5

Количество замечаний (З)	>20	20	19	18	17	15–16	12–14	9–11	6–8	3–5	0–2
Значение b_3	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Несоответствия, выявленные в ходе аудита кафедры, сводят в таблицу 6.

Таблица 6

Подразделение	Пункт ИСО, содержащий требования	Несоответствие			
		Содержание несоответствия	Статус несоответствия		
			ЗН	НН	З

По данным таблицы 6 с использованием таблиц 3–5 построится таблица 7, на основе которой и производится расчет по формуле (1).

Таблица 7

Информация по значительным несоответствиям		Информация по незначительным несоответствиям		Информация по замечаниям	
Количество ЗН	b_1	Количество НН	b_2	Количество З	b_3

Порядок расчета результативности процессов кафедры показан в таблице 8.

В таблице 8 использованы обозначения результативности процессов, имеющие два индекса:

– верхний индекс содержит код процесса;

– нижний индекс содержит дату, для состояния на которую рассчитывается результативность; как правило, дата содержит указание на месяц и год, это не относится к процессам КОУ(АБВ)-04 и КОУ(АБВ)-05 – для этих процессов нижний индекс результативности содержит только год.

В таблице 8 даны рекомендации для расчета результативности по группам процессов:

– процессы управленческой деятельности – $РУ^{АБВ}_{месяц_год}$;

– процессы жизненного цикла предоставления образовательных услуг – $РЖЦ^{АБВ}_{месяц_год}$;

– процессы обеспечения ресурсами – $РР^{АБВ}_{месяц_год}$;

– процессы мониторинга и улучшения – $РМ^{АБВ}_{месяц_год}$.

Обратите внимание, верхний индекс обозначений результативности по группам процессов содержит аббревиатуру названия кафедры.

Общая результативность процессов кафедры по результатам анализа показателей процессов:

$$Р^{АБВ}_{месяц_год}=0{,}35(РУ^{АБВ}_{месяц_год}+РЖЦ^{АБВ}_{месяц_год})+0{,}15(РР^{АБВ}_{месяц_год}+РМ^{АБВ}_{месяц_год}).$$

Результаты оценки регистрируются в журнале мониторинга процессов кафедры.

По результатам анализа результативности процессов могут быть разработаны планы корректирующих и предупреждающих действий.

Таблица 8

Код процесса	Формула оценки результативности процесса
Процессы управленческой деятельности кафедры $РУ^{АБВ}_{месяц_год}=0,3Р^{КУ(АБВ)-01}_{месяц_год}+0,7Р^{КУ(АБВ)-02}_{месяц_год}$	
КУ(АБВ)-01	$Р^{КУ(АБВ)-01}_{месяц_год}=П_1^{КУ(АБВ)-01}$
КУ(АБВ)-02	$Р^{КУ(АБВ)-02}_{месяц_год}=0,6П_1^{КУ(АБВ)-02}+0,4П_2^{КУ(АБВ)-02}$, если был аудит; $Р^{КУ(АБВ)-02}_{месяц_год}=П_2^{КУ(АБВ)-02}$, если не было аудита
Процессы жизненного цикла предоставления образовательных услуг $РЖЦ^{АБВ}_{месяц_год}=\frac{1}{5}\left(Р^{КОУ(АБВ)-01}_{месяц_год}+Р^{КОУ(АБВ)-02}_{месяц_год}+ +Р^{КОУ(АБВ)-03}_{месяц_год}+Р^{КОУ(АБВ)-04}_{год}+Р^{КОУ(АБВ)-05}_{год}\right)$	
КОУ(АБВ)-01	$Р^{КОУ(АБВ)-01}_{месяц_год}=0,6П_1^{КОУ(АБВ)-01}+0,4П_2^{КОУ(АБВ)-01}$
КОУ(АБВ)-02	$Р^{КОУ(АБВ)-02}_{месяц_год}=0,4П_1^{КОУ(АБВ)-02}+0,6П_2^{КОУ(АБВ)-02}$
КОУ(АБВ)-03	$Р^{КОУ(АБВ)-03}_{месяц_год}=0,3П_1^{КОУ(АБВ)-03}+0,7П_2^{КОУ(АБВ)-03}$
КОУ(АБВ)-04	$Р^{КОУ(АБВ)-04}_{год}=0,6П_1^{КОУ(АБВ)-04}+0,4П_2^{КОУ(АБВ)-04}$
КОУ(АБВ)-05	$Р^{КОУ(АБВ)-05}_{год}=П_1^{КОУ(АБВ)-05}$
Процессы обеспечения ресурсами $РР^{АБВ}_{месяц_год}=Р^{КР(АБВ)-01}_{месяц_год}$	
КР(АБВ)-01	$Р^{КР(АБВ)-01}_{месяц_год}=0,6П_1^{КР(АБВ)-01}+0,2\left(П_2^{КР(АБВ)-01}+П_3^{КР(АБВ)-01}\right)$
Процессы мониторинга и улучшения $РМ^{АБВ}_{месяц_год}=\frac{1}{3}\left(Р^{КМ(АБВ)-01}_{месяц_год}+Р^{КМ(АБВ)-02}_{месяц_год}+Р^{КМ(АБВ)-03}_{месяц_год}\right)$	
КМ(АБВ)-01	$Р^{КМ(АБВ)-01}_{месяц_год}=П_1^{КМ(АБВ)-01}$
КМ(АБВ)-02	$Р^{КМ(АБВ)-02}_{месяц_год}=П_1^{КМ(АБВ)-02}$
КМ(АБВ)-03	$Р^{КМ(АБВ)-03}_{месяц_год}=П_1^{КМ(АБВ)-03}$

Рекомендуемая квалиметрическая шкала для заключения о функционировании процесса по значению его результативности, которую условно обозначим как P:

1. $0<P<25\%$ – процесс не результативен. Цели и задачи не были достигнуты, необходима доработка процесса. Требуется полное переосмысление процесса. Необходимо провести анализ требований к процессу, анализ выбора критериев, анализ взаимодействия процессов и степень их влияния друг на друга.

2. $25\% \le P < 50\%$ – низкий уровень результативности процесса. Требуется разработка значительных корректирующих действий для выявления и устранения причин несоответствий.

3. $50\% \le P < 75\%$ – средний уровень результативности процесса. Цели и задачи процесса частично достигнуты. Требуется разработка корректирующих действий и проведение анализа процесса с использованием статистических методов.

4. $75\% \le P < 100\%$ – процесс результативен. Цели и задачи близки к достижению. Требуется разработка предупреждающих действий и проведение анализа процесса с использованием статистических методов.

5. $P = 100\%$ – высокий уровень результативности. Цели и задачи практически достигнуты. Регулярное проведение статистических исследований необходимо для разработки мероприятий по улучшению процесса.

Аналогичная квалиметрическая шкала может быть использована и для общей результативности процессов кафедры $Р^{АБВ}_{месяц_год}$.

Настоящая методика оценки результативности процессов СМК кафедры внедрена в Пензенском государственном университете. Она адаптирована к неравномерному уровню базовой подготовки в области качества уполномоченных по качеству кафедр, которые отвечают за расчет результативности. Методика может быть легко автоматизирована, что обеспечит эффективность ее использования.

Список литературы

1. Методические рекомендации для вузов и ссузов по организации и проведению самооценки эффективности функционирования систем управления в области менеджмента качества на основе модели совершенствования деятельности. – СПб. : ЛЭТИ, 2005.
2. СТУ 151.0.10-2007 Стандарт университета. Менеджмент качества : руководство по качеству [Издание официальное]. – Пенза.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.3.087.92

Б. В. Чувыкин, Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин

∑Δ-АЦП: АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОТ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

В третьей из серии статей, посвященных синтезу структур ∑Δ-АЦП средствами имитационного моделирования, исследуется погрешность от краевых эффектов для ряда структур ∑Δ-АЦП, приведенных в предшествующих статьях серии. Для понимания материала данной статьи полезно ознакомиться с упомянутыми статьями серии.

Введение

В статьях [1, 2] в порядке иллюстрации предложенного метода синтеза структур ∑Δ-АЦП были приведены примеры синтезированных структур непрерывно-дискретных систем (НДС) различных порядков. Там же указывалось, что для перехода от полученной линейной НДС к ∑Δ-АЦП в структуру НДС вводится квантователь. Если шаг квантования невелик, динамические свойства линейной НДС и соответствующей ей структуры ∑Δ-АЦП практически не отличаются. Отмечалось также, что однобитные ∑Δ-АЦП предпочтительны по целому ряду причин: они обеспечивают самую высокую достигнутую на данный момент линейность функции преобразования, они наиболее технологичны и практически могут быть полностью реализованы по технологии цифровых интегральных схем без необходимости подгонки каких-либо параметров элементов схемы. Вместе с тем они наиболее сложны с точки зрения возможности аналитического расчета погрешности от краевых эффектов и оптимизации как структуры, так и параметров ее элементов по данному показателю. Как было показано в статье [1], источником этой погрешности является неравенство значений напряжения на выходе интегратора в начале и конце цикла преобразования. В зарубежной литературе принято рассматривать эту погрешность как результат проникновения на выход системы шума квантования. При этом исходят из идеализации ∑Δ-АЦП в виде линейной системы, в одну из точек которой подается так называемый шум квантования, т.е. некий случайный сигнал в виде модели белого шума, параметры которого не коррелированны с полезным входным сигналом. Следует иметь в виду, что в случае однобитного ∑Δ-АЦП предположение о равномерном распределении шума квантования по спектру частот и его независимости от входного сигнала опровергается многими исследователями [3, 4]. Полезность подобной модели, тем не менее, отрицать нельзя, т.к. она позволяет *объяснить* эффект снижения рассматриваемой погрешности за счет процессов передискретизации, шейпинга шума и фильтрации с децимацией. В действительности ни спектр шума квантования, ни частотные свойства структуры

однобитного АЦП не известны в силу того, что он представляет собой сугубо нелинейную систему. Поэтому единственный путь, обеспечивающий достоверную оценку погрешности, состоит в проведении натурных и модельных экспериментов. Последние предпочтительны, т.к. позволяют легко управлять условиями и параметрами проведения эксперимента (при минимальных затратах времени и ресурсов).

1. Исследование погрешности от краевых эффектов

С учетом сказанного для исследования погрешности ∑Δ-АЦП будем использовать схему эксперимента, приведенную на рисунке 1, где приняты обозначения: ГТС – генератор тестового сигнала; ФД – фильтр-дециматор, А – анализатор.

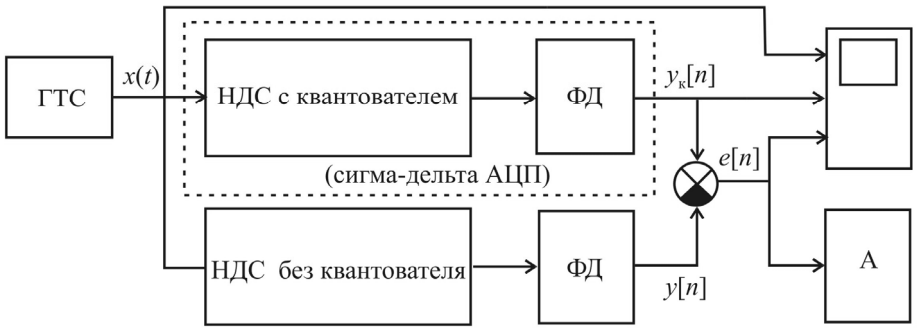


Рис. 1

В качестве примера рассмотрим Simulink-модель (рис. 2), реализующую схему эксперимента, приведенную на рисунке 1, для НДС с трехкратным интегрированием, Simulink-модель которой была нами построена в статье [2]. В схеме эксперимента этой модели соответствует блок «НДС без квантователя», а блок «НДС с квантователем (сигма-дельта АЦП)» отличается от него наличием квантователя в прямой цепи преобразования. В качестве ГТС применен источник ступенчатого воздействия.

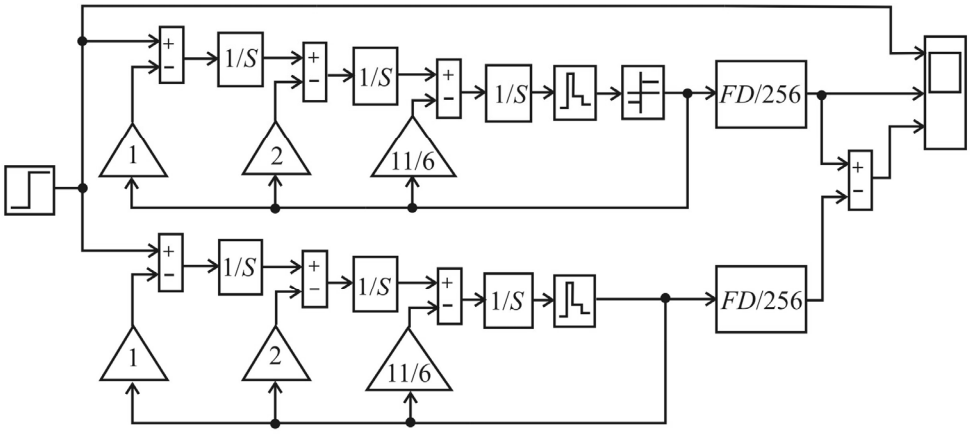


Рис. 2

В качестве фильтра-дециматора естественно использовать цифровую реализацию ВФ в виде сплайна заданного порядка. Simulink-модель ФД, реализующего сплайн третьего порядка, приведена на рисунке 3 и отличается от модели НДС на рисунке 2 только тем, что непрерывные интеграторы заменены цифровыми интеграторами (аккумуляторами).

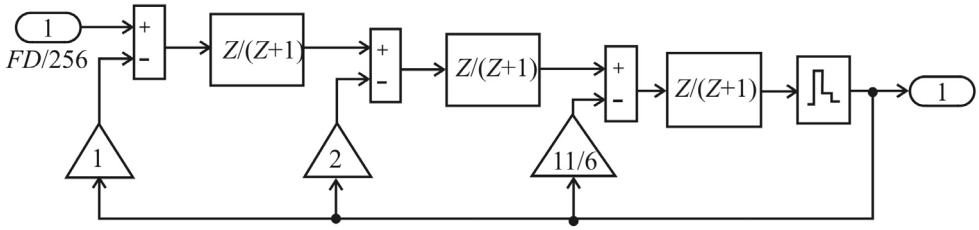


Рис. 3

На рисунке 4 приведены осциллограммы процессов в точках модели, к которым подключен виртуальный осциллограф.

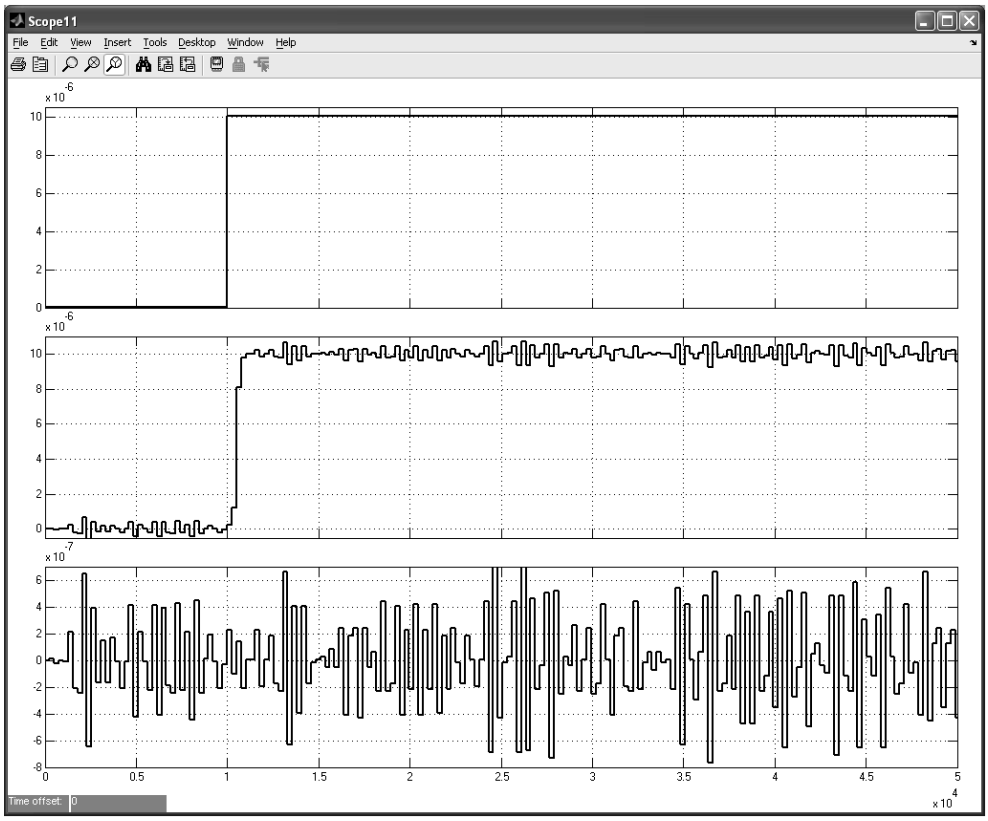


Рис. 4

На вход модели подано ступенчатое воздействие, размер которого составляет 10^{-5} от динамического диапазона НДС (что соответствует 10 мкВ при максимальном входном напряжении в 1 В). Цифровой фильтр имеет конечную длительность переходного процесса, равную трем шагам дискретиза-

ции длительностью 256 тактов. Число шагов переходного процесса равно порядку системы. Можно усмотреть, что переходный процесс в рассматриваемой модели полностью совпадает с таковым для модели НДС третьего порядка, рассмотренной нами в статье [2].

Абсолютная погрешность от краевых эффектов имеет порядок менее 10^{-6}, что соответствует 20-разрядному аналого-цифровому преобразованию (1 мкВ при максимальном входном напряжении в 1 В).

Важно заметить, что полученная выше оценка относится к определенному (в данном случае третьему) порядку НДС и ФД, а также конкретному фрагменту процесса на выходе ∑Δ-АЦП. Для полного анализа закономерностей проявления погрешности от краевых эффектов необходимо провести многофакторный эксперимент, варьируемыми параметрами которого должны быть порядок НДС, порядок ФД (в случае реализации ВФ в виде сплайна), длительности ВФ, реализуемых в НДС и в ФД. Исследования показывают, что наиболее важным фактором, определяющим точность преобразования, является порядок НДС. Поэтому представляет интерес выявить зависимость точности от данного фактора.

На рисунке 5 показана Simulink-модель, состоящая из четырех подмоделей, каждая из которых полностью соответствует схеме эксперимента на рисунке 1.

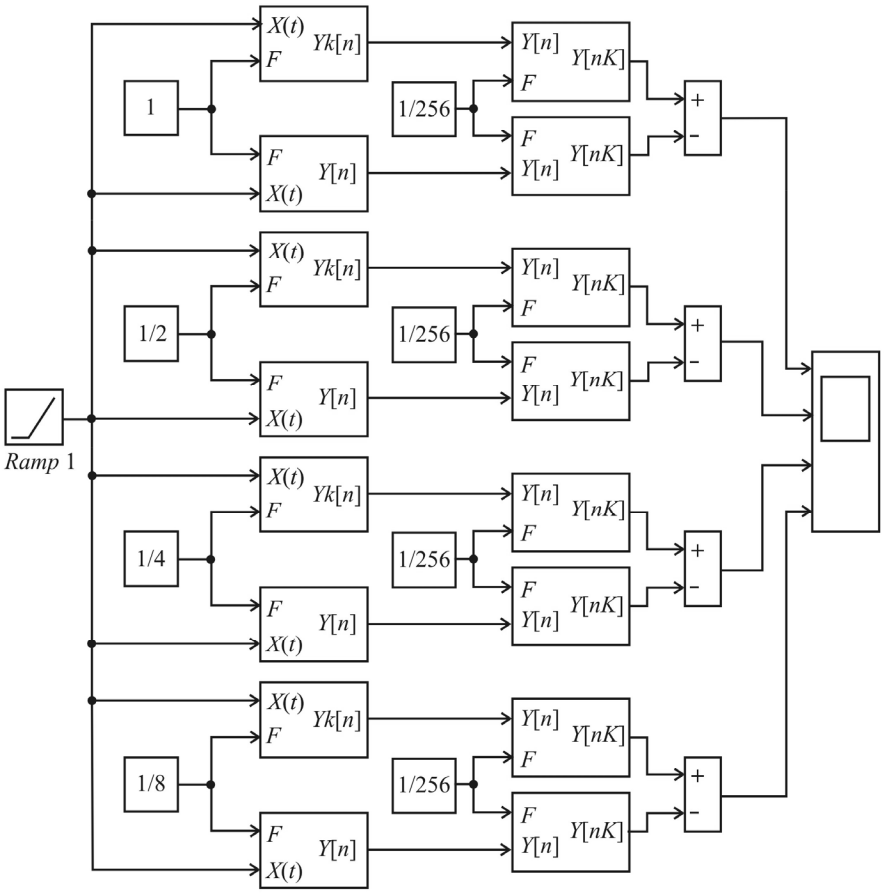


Рис. 5

Подмодели отличаются порядком НДС (с первого по четвертый соответственно сверху вниз). Во всех подмоделях реализован один и тот же ФД четвертого порядка с коэффициентом прореживания, равным 256, т.е. частота выборок выходных кодов в 256 раз меньше частоты выборок входных кодов. Входное воздействие имеет вид линейно изменяющейся функции от 0 до половины полного диапазона преобразования.

На рисунках 6 и 7 представлены осциллограммы процессов $e[n]$, соответствующих разности выходных величин модели $\sum\Delta$-АЦП и канала преобразования без квантования. Осциллограммы получены для двух значений скорости нарастания входного воздействия 10^{-5} и 10^{-6} на один такт работы НДС. Видно, что при переходе от НДС первого порядка к НДС второго порядка погрешность преобразования снижается на два десятичных порядка, причем речь идет о соотношении максимальных погрешностей. При последующем повышении порядка НДС выигрыш по точности всего лишь двукратный.

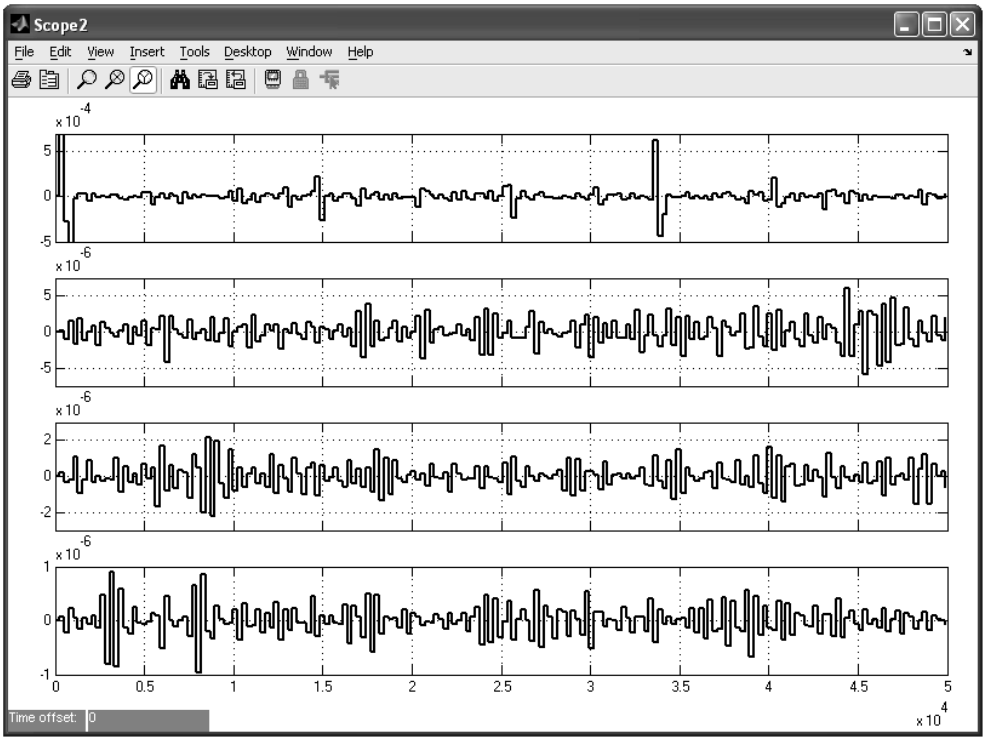


Рис. 6

На рисунке 8 представлены осциллограммы процессов $e[n]$, соответствующих разности выходных величин модели $\sum\Delta$-АЦП и канала преобразования без квантования. Осциллограммы получены для четырех разных значений коэффициента прореживания ФД (64, 128, 256 и 512 соответственно для осциллограмм сверху вниз). Все осциллограммы относятся к НДС третьего порядка. Видно, что при каждом удвоении коэффициента прореживания погрешность преобразования снижается на десятичный порядок, причем речь идет о соотношении максимальных погрешностей.

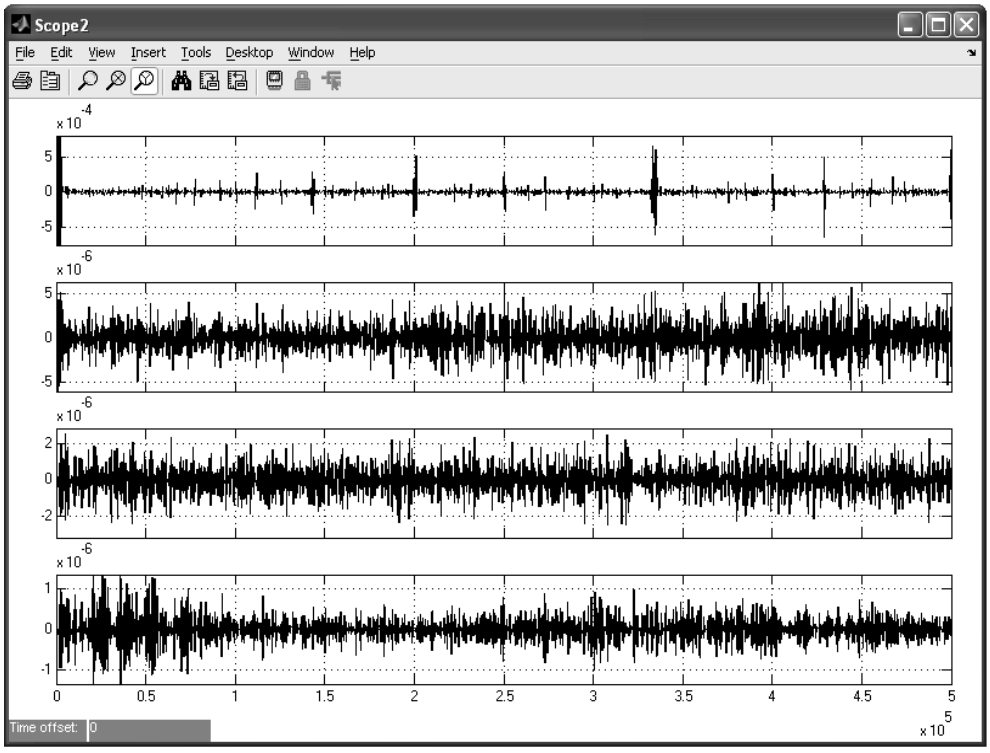

Scope2
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help
x 10^-4
x 10^-6
x 10^-6
x 10^-6
0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5
x 10^5
Time offset: 0

Рис. 7

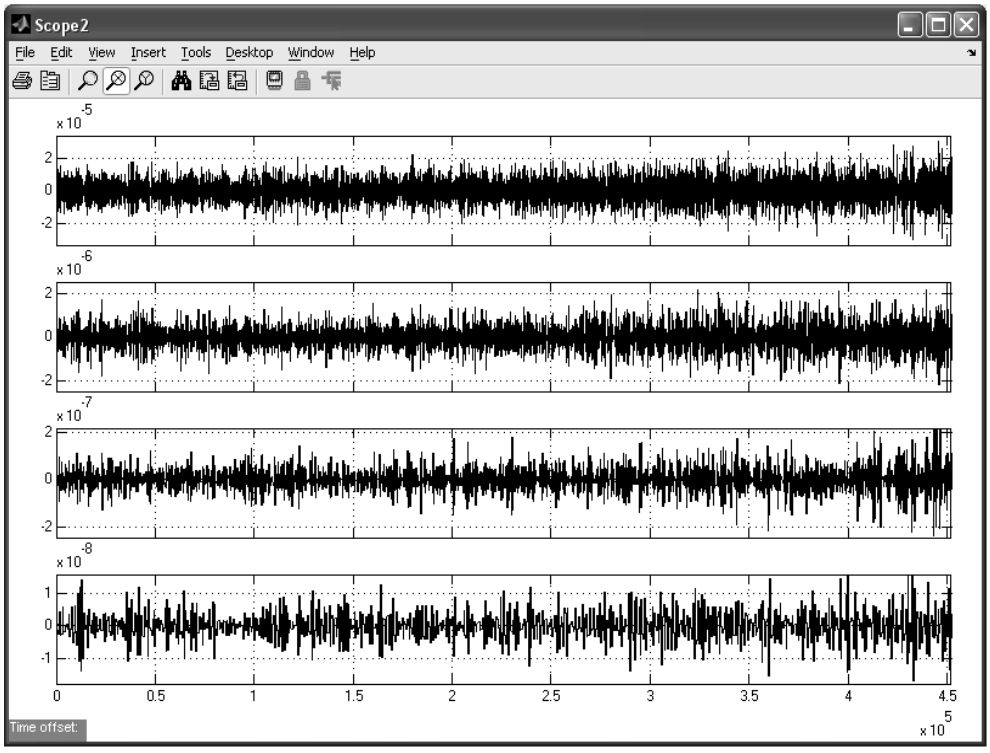

Scope2
File Edit View Insert Tools Desktop Window Help
x 10^-5
x 10^-6
x 10^-7
x 10^-8
0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5
x 10^5
Time offset:

Рис. 8

На рисунке 9 приведены аналогичные осциллограммы, полученные для НДС второго порядка. Видно, что соотношение погрешностей для различных коэффициентов прореживания остается практически неизменным, а абсолютные значения по сравнению с НДС третьего порядка увеличились примерно в 10 раз.

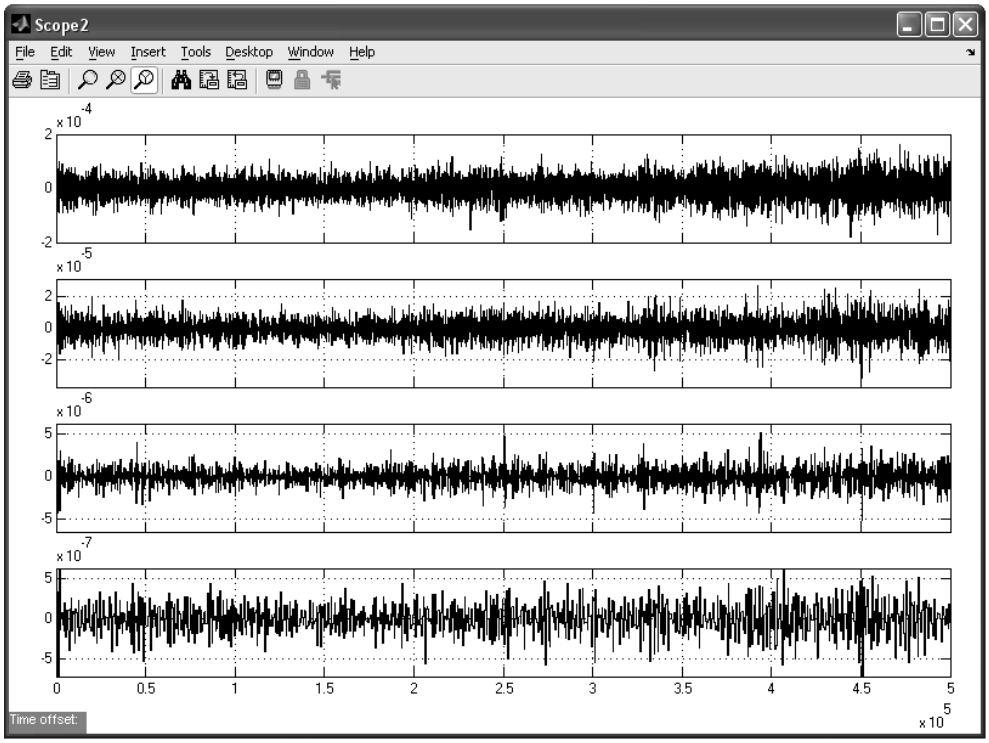


Рис. 9

2. Исследование устойчивости структур ∑Δ-АЦП

Как отмечалось ранее, для ∑Δ-модуляторов высоких порядков возникает проблема устойчивости. При этом устойчивость сохраняется только для ограниченной части диапазона входного сигнала. Причем граница устойчивой работы НДС зависит от отношения шага дискретизации к постоянной времени интеграторов. Можно ожидать, что по мере уменьшения шага дискретизации по отношению к постоянной времени граница устойчивости приближается к пределу диапазона входного сигнала. Для проверки данного предположения была создана Simulink-модель, представленная на рисунке 10, которая содержит четыре параллельных идентичных НДС третьего порядка с разными значениями отношения шага дискретизации к постоянной времени интеграторов, равными 0,54; 0,5; 0,4; 0,25. На их входы подается линейно нарастающий сигнал от 0 до 1 (1 – верхний предел диапазона входного сигнала). На рисунке 11 показаны осциллограммы выходных сигналов НДС, из которых следует, что граница устойчивой работы увеличивается по мере уменьшения шага дискретизации.

Следует иметь в виду, что при уменьшении шага дискретизации НДС по отношению к постоянной времени интеграторов переходный процесс ста-

новится не финитным, а экспоненциально затухающим, причем длительность его увеличивается.

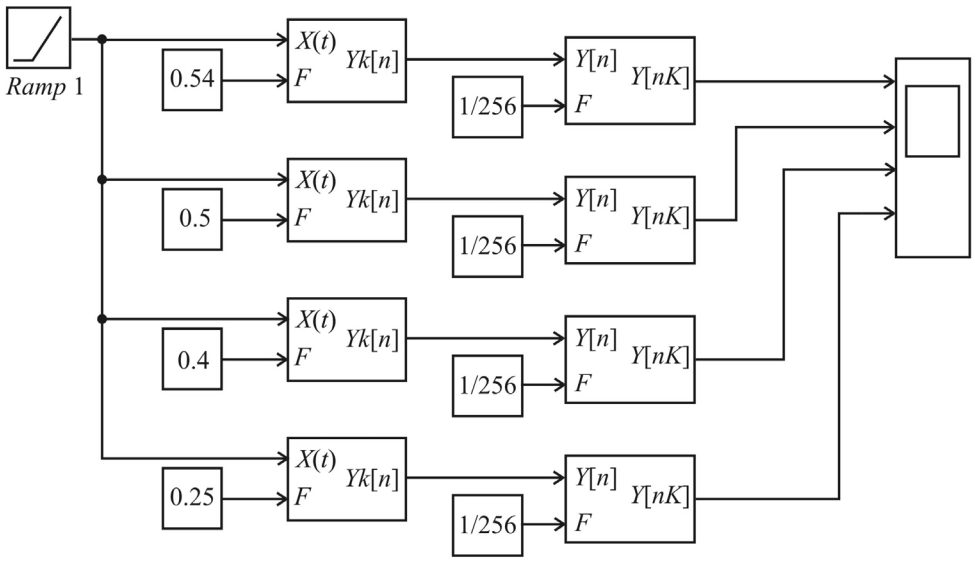


Рис. 10

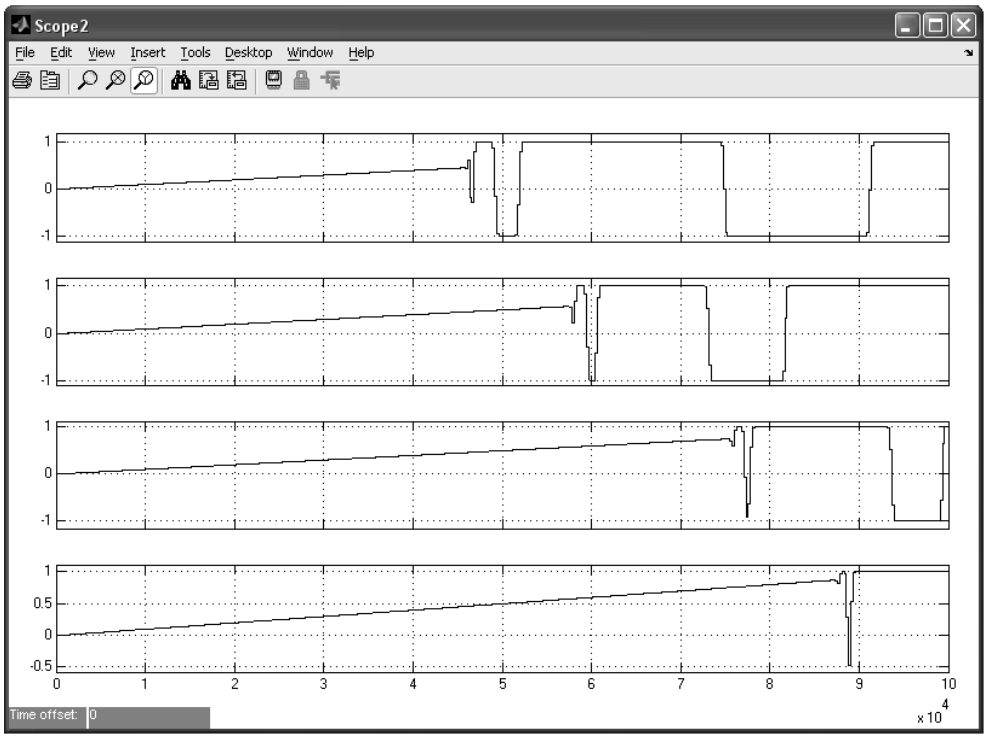


Рис. 11

На рисунке 12 представлена Simulink-модель, включающая четыре НДС третьего порядка без квантователя с различными значениями отношения шага дискретизации к постоянной времени интеграторов (1; 0,5; 0,25; 0,1).

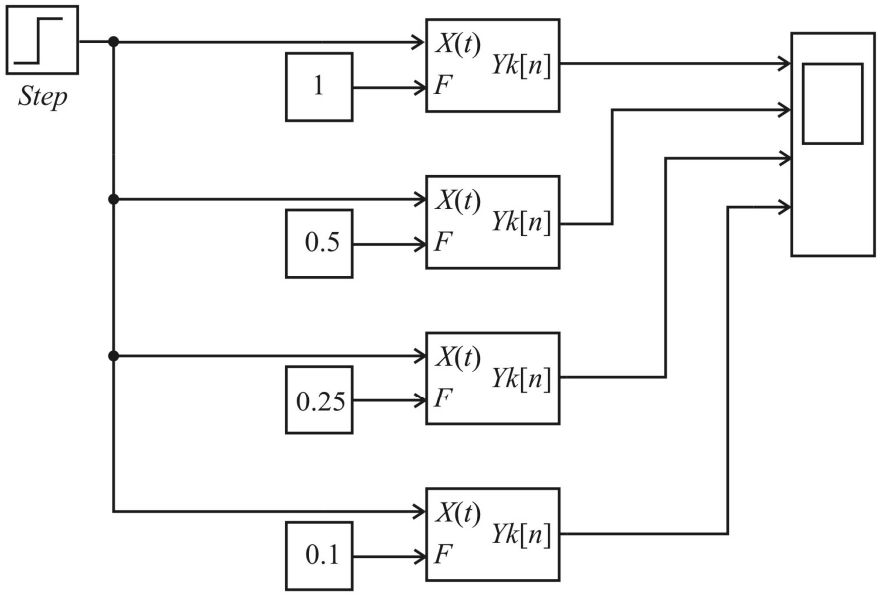


Рис. 12

На рисунке 13 представлены осциллограммы выходных сигналов НДС при входном воздействии в виде скачка от 0 до 1.

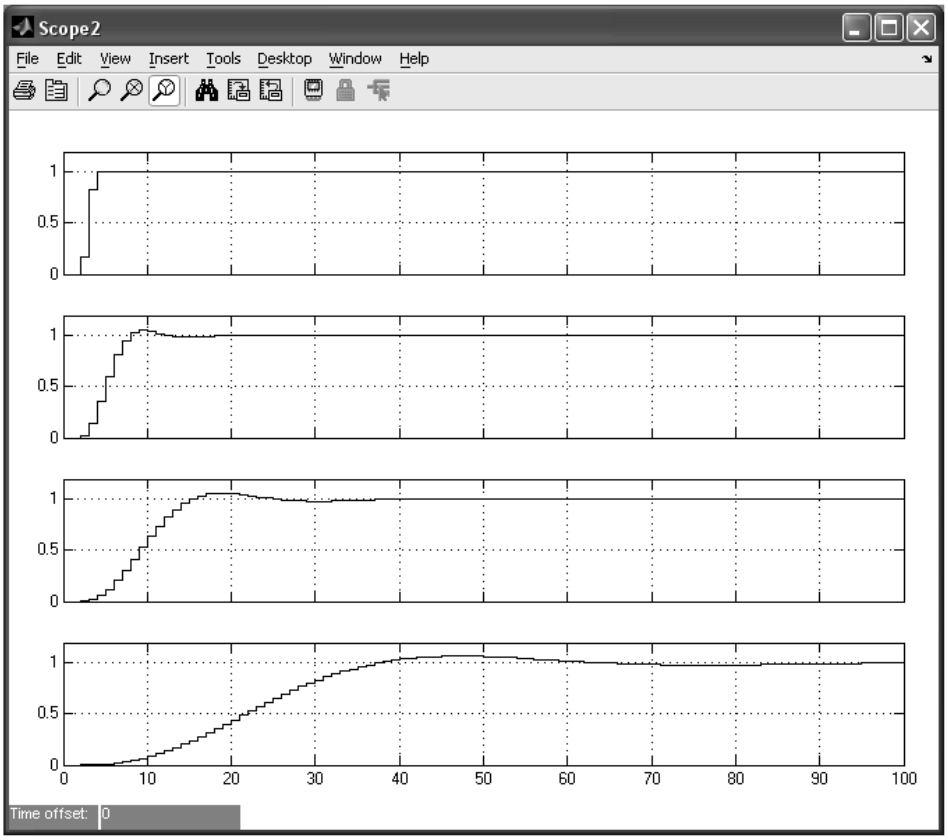


Рис. 13

Видно, что переходный процесс не является финитным, носит экспоненциально затухающий характер и имеет длительность, увеличивающуюся по мере уменьшения шага дискретизации. Это, естественно, приведет к увеличению длительности переходного процесса на выходе фильтра-дециматора.

Чтобы пояснить специфику проявления краевого эффекта, являющегося источником флуктуационного шума на выходе ∑Δ-АЦП, на рисунке 14 приведены осциллограммы выходных сигналов ∑Δ-модулятора второго порядка для значений входного сигнала, подобранных таким образом, что они *точно* соответствуют выходным кодам 1000, 1100, 1010, 1001 (или 1/2, 3/4, 5/8, 9/16 от предела входного сигнала, равного 1). Обращает на себя внимание периодичность выходного сигнала ∑Δ-модулятора, что и порождает в его спектре так называемые тоны [5, 6]. Для указанных значений входного сигнала погрешность равна нулю при условии, что время усреднения (период выходных выборок фильтра-дециматора) кратно периоду выходного сигнала ∑Δ-модулятора. При этом длительность периода определяется младшим ненулевым разрядом кода. То есть имеет место бифуркация (удвоение) периода при уменьшении ненулевого младшего разряда на один двоичный порядок.

В свете сказанного уместно также напомнить о наличии корреляции между флуктуационным процессом и входным сигналом, которая выражается в самом факте периодичности и зависимости периода от амплитуды входного сигнала.

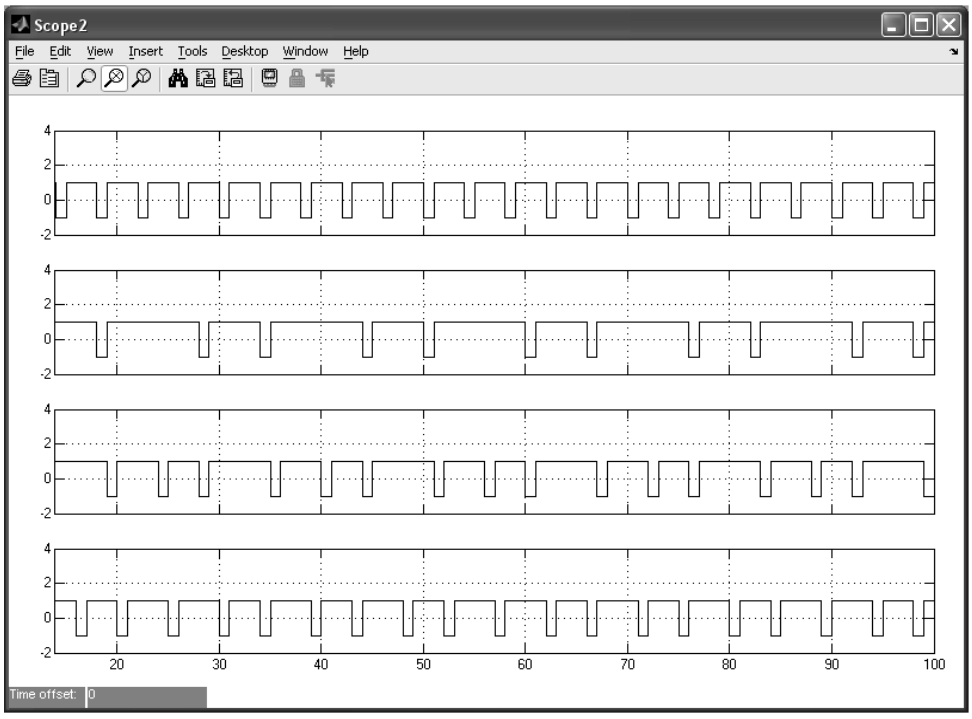


Рис. 14

Заключение

Таким образом, степень подавления погрешности от краевых эффектов ∑Δ-АЦП напрямую зависит от порядка однобитного ∑Δ-модулятора и от ко-

эффициента прореживания фильтра-дециматора, т.е. от его ширины полосы пропускания. Однако с увеличением порядка однобитного ∑Δ-модулятора, построенного на основе структур НДС с финитной длительностью переходного процесса, возникает проблема обеспечения их устойчивости. Один из путей решения этой проблемы состоит в уменьшении периода работы модулятора относительно постоянной времени интеграторов. В любом случае устойчивое поведение ∑Δ-модулятора обеспечивается при условии ограничения амплитуды входного сигнала тем большего, чем выше порядок ∑Δ-модулятора.

Список литературы

1. **Чувыкин, Б. В.** ∑Δ-АЦП – синтез одноконтурных структур / Б. В. Чувыкин, Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – № 1. – 2007. – С. 91–106 .
2. **Чувыкин, Б. В.** ∑Δ-АЦП – синтез структур высоких порядков / Б. В. Чувыкин, Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – № 2. – 2007. – С. 67–79.
3. Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design and Simulation / Ed. by St. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes // IEEE Computer Society Press. – 1996. – 476 p.
4. **Schreier, R.** An Empirical Study of High-Order Single-Bit Delta-Sigma Modulators / R. Schreier // IEEE Trans. on Circuit and Systems – II: Analog and Digital Signal Processing. – 1993. – V. 40. – № 8. – P. 461–466.
5. **Netravali, A. N.** Optimum filters for interpolative A/D converters / A. N. Netravali // Bell Systems Technique Journal. – 1977. – V. 56. – P. 1629–1641.
6. **Candy, J. C.** The structure of quantization noise from sigma-delta modulation / J. C. Candy, O. J. Benjamin // IEEE Trans. Commun. – 1981. – V. COM-29. – P. 1316–1323.

УДК 62–82

П. Ю. Волков, С. Б. Демин, В. В. Регеда

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ С МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Рассмотрена математическая модель двухкаскадного электрогидравлического усилителя сопло–заслонка с магнитострикционным преобразователем повышенной точности в первом каскаде усиления, который может использоваться в составе типовых электрогидравлических приводов гидрофицированного технологического оборудования.

Введение

Электрогидравлические усилители широко используются в гидрофицированных приводах технологического оборудования, что объясняется известными преимуществами гидропередач [1, 2]: значительные развиваемые усилия, высокое быстродействие, малая инерционность и т.д. В настоящее время наиболее распространены двухкаскадные электрогидравлические усилители сопло–заслонка с мостовой схемой включения. Улучшение показателей качества таких устройств возможно за счет использования более совершенных конструкций электромеханических преобразователей.

Указанным требованиям удовлетворяют электрогидравлические усилители, построенные на базе магнитострикционных электромеханических преобразователей (МЭМП) [3].

1. Магнитострикционные электромеханические преобразователи повышенной точности в электрогидравлических усилителях

Ввиду простоты конструкции [3] МЭМП являются весьма надежными устройствами с более длительным сроком эксплуатации, чем «традиционные» электромагнитные преобразователи. Отсутствие люфтов в механизме позиционирования заслонки выгодно отличает МЭМП от пьезоэлектрических аналогов. Магнитострикционные преобразователи имеют высокое быстродействие (т.к. скорость магнитострикционной деформации сопоставима со скоростью распространения электромагнитной волны в магнитострикционном материале, т.е. около $5 \cdot 10^3$ м/с) и высокую линейность статических характеристик. Однако к настоящему времени широкого распространения в составе электрогидравлических усилителей данный тип устройств не нашел.

В наибольшей степени это объясняется тремя причинами:

1) малыми величинами магнитострикционных деформаций;

2) значительными линейными размерами магнитострикционных элементов;

3) смещением рабочей точки МЭМП вследствие температурных деформаций, что влияет на статические характеристики устройства при мостовой схеме включения.

Кривые 1, 2 на рисунке 1 представляют собой статические характеристики МЭМП, измеренные через 1 мин и через 6 мин после включения преобразователя соответственно. Использовался линейный I-образный магнитострикци-

онный элемент из пермаллоя с длиной рабочего участка 300 мм. Как следует из рисунка 1, произошло смещение рабочей точки МЭМП (т.е. кривая 2 смещена относительно кривой 1 на величину температурной деформации), что обусловлено сопоставимостью магнитострикционных деформаций с тепловым расширением стержня. Для устранения указанного недостатка требуется или вводить в конструкцию электрическую обратную связь по положению магнитострикционного элемента, или заранее просчитывать возможные тепловые деформации стержня и соответствующим образом выставлять магнитострикционный элемент, что не всегда удобно. Указанные недостатки ограничивают область применения МЭМП и снижают эффективность их применения.

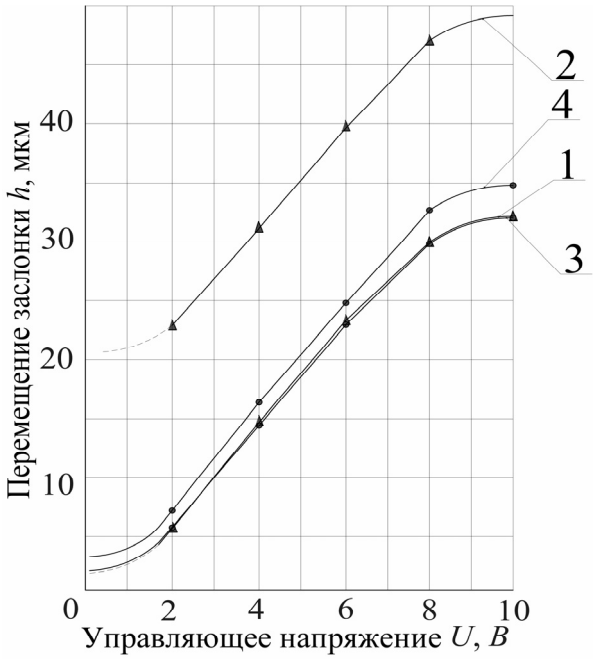


Рис. 1 Статическая характеристика МЭМП

Авторами предлагается конструкция электрогидравлического усилителя, в котором использован П-образный МЭМП с компенсацией температурных деформаций [4], позволяющий скомпенсировать температурные деформации и получить в два раза большее перемещение при меньших линейных размерах. Статическая характеристика П-образного МЭМП с длиной плеча 200 мм показана на рисунке 1 (кривые 3, 4). Из рисунка видно, что П-образный магнитострикционный элемент обеспечивает большую точность позиционирования за счет компенсации температурной деформации [4]. Гистерезис магнитострикционной деформации в данном случае не превышал 0,6%. П-образная конструкция позволяет в два раза снизить линейные размеры исполнительного элемента, при том что результирующее перемещение остается как у I-образного стержня. Эксперименты показали, что начальное положение заслонки (т.е. рабочей точки) изменится на величину 2 мкм, что почти в 8 раз меньше, чем у I-образного элемента. На основании вышесказанного можно сделать вывод о возможности применения П-образных магнитострикционных элементов для позиционирования заслонки в МЭГУ.

2. Математическая модель магнитострикционного электрогидравлического усилителя

Рассмотрим магнитострикционный электрогидравлический усилитель (МЭГУ), выполненный по мостовой схеме, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.

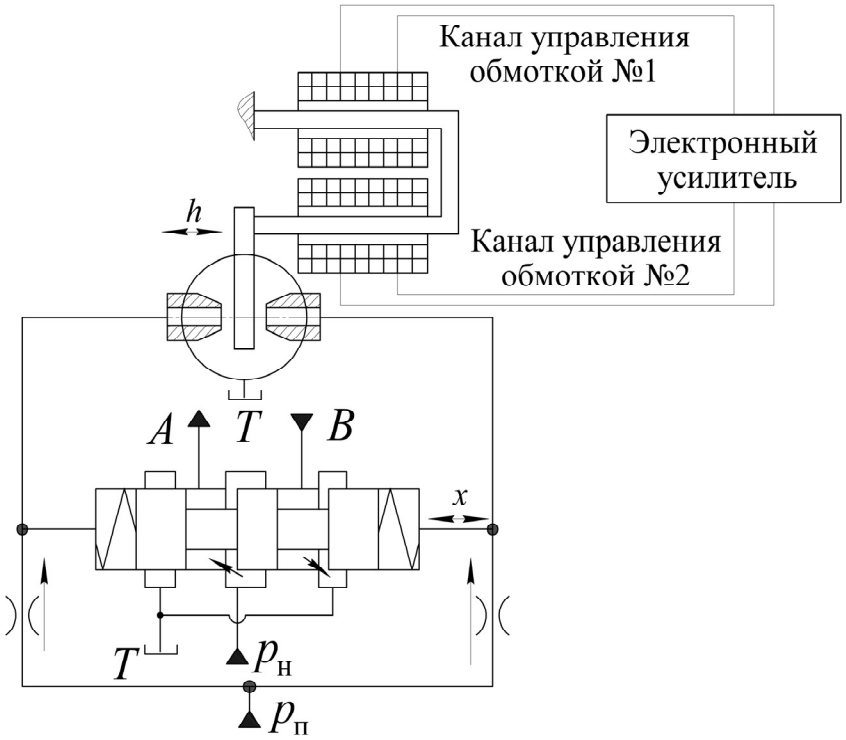


Рис. 2 Принципиальная схема магнитострикционного электрогидравлического усилителя: *A*, *B* – исполнительные гидролинии, *T* – слив

Данный МЭГУ содержит два каскада усиления: управляющий каскад с регулируемым дросселем сопло–заслонка и исполнительный каскад с золотниковым распределительным элементом. Для создания математической модели выведем уравнение передаточной функции МЭГУ.

Для этого разобьем электрогидравлический усилитель как объект исследования на отдельные звенья и рассмотрим последовательно каждое из них в соответствии со структурной схемой МЭГУ, показанной на рисунке 3.

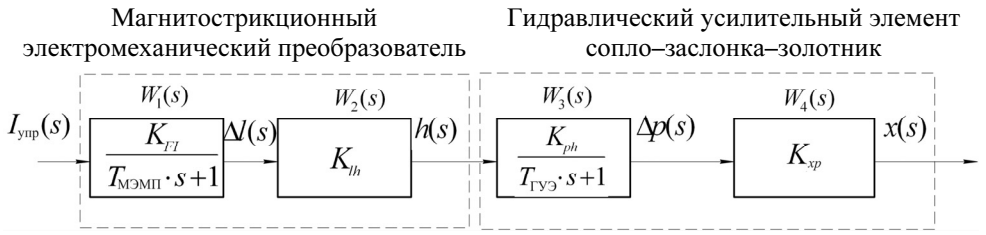


Рис. 3 Структурная схема МЭГУ

Передаточную функцию МЭМП можно представить выражением

$$W_1(s) = \frac{\Delta l(s)}{I_{\text{упр}}(s)} = \frac{K_{FI}}{T_{\text{МЭМП}} s + 1}, \quad (1)$$

где Δl – магнитострикционная деформация; $I_{\text{упр}}$ – управляющий электрический сигнал; K_{FI} – коэффициент усиления по токовому сигналу; $T_{\text{МЭМП}}$ – электромеханическая постоянная магнитострикционного преобразователя, определяемая как отношение индуктивности L к активному сопротивлению R обмотки управления.

Для увеличения магнитострикционной деформации Δl могут использоваться различные промежуточные звенья. Поэтому необходимо добавить передаточную функцию элемента механической связи, которая представляет собой пропорциональное звено, связывающее величину перемещения заслонки h и магнитострикционную деформацию Δl. В операторной форме выражение будет иметь вид

$$W_2(s) = \frac{h(s)}{\Delta l(s)} = K_{hl}. \quad (2)$$

При выводе уравнений движения для гидравлического усилительного элемента (ГУЭ), выполненного по мостовой схеме, будем руководствоваться методикой, изложенной в [1, 2], при следующих общепринятых допущениях: массой золотника, его трением и утечками жидкости можно пренебречь. Тогда уравнение сил, действующих на золотник, можно представить в виде

$$S_{\text{з}} p_{\text{д}} = \left(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}} \right) x, \quad (3)$$

где $S_{\text{з}}$ – площадь поперечного сечения торца золотника; $p_{\text{д}}$ – перепад давления под торцами золотника исполнительного каскада; $C_{\text{пр}}$ – коэффициент жесткости центрирующих пружин; $C_{\text{гд}}$ – коэффициент жесткости гидродинамической силы; x – смещение золотника от начального положения. Уравнение расхода жидкости в диагонали мостовой схемы [2]:

$$Q_{\text{д}} = K_{Qh} h - K_{Qp} p_{\text{д}} = Q_X + Q_{\text{дм}}, \quad (4)$$

где $Q_X = S_{\text{з}} \, dx/dt$ – расход жидкости, идущий на перемещение золотника; $Q_{\text{дм}} = \frac{V}{2E} \frac{dp_{\text{д}}}{dt}$ – расход, идущий на компенсацию деформации объема V жидкости в камере за торцом золотника и магистрали, идущей от постоянного дросселя к сопло-заслонке при приведенном значении объемного модуля упругости E. Выражение (4) можно представить в виде

$$K_{Qh} h - K_{Qp} p_{\text{д}} = S_{\text{з}} \frac{dx}{dt} + \frac{V}{2E} \frac{dp_{\text{д}}}{dt}, \quad (5)$$

где $K_{Qh} \approx Q_c / h_0$ – коэффициент усиления по расходу Q_c жидкости через сопло при среднем положении h_0 заслонки; $K_{Qp} \approx Q_c / p_{\text{п}}$ – коэффициент

усиления по давлению-расходу, где $p_{\text{п}}$ – подведенное давление. Совместное решение уравнений (3) и (5) позволяет получить линеаризованное уравнение ГУЭ:

$$\left(\frac{S_3^2}{K_{Qp}\left(C_{\text{пр}}+C_{\text{гд}}\right)}+\frac{V}{2EK_{Qp}}\right)\frac{dx}{dt}+x=\frac{K_{Qh}S_{\text{з}}}{K_{Qp}\left(C_{\text{пр}}+C_{\text{гд}}\right)}h\,, \qquad (6)$$

Выполнив преобразование Лапласа для выражения (6) при нулевых начальных условиях, получим передаточную функцию для ГУЭ сопло–заслонка–золотник:

$$W_{\text{ГУЭ}}(s)=\frac{x(s)}{h(s)}=\frac{K_{ph}}{\left(\left(\frac{S_{\text{з}}^2}{K_{Qp}\left(C_{\text{пр}}+C_{\text{гд}}\right)}+\frac{V}{2EK_{Qp}}\right)s+1\right)}\cdot\frac{S_{\text{з}}}{\left(C_{\text{пр}}+C_{\text{гд}}\right)}, \qquad (7)$$

где K_{ph} – коэффициент усиления по давлению. Введем обозначения:

$$T_{\text{ГУЭ}}=\frac{S_{\text{з}}^2}{K_{Qp}\left(C_{\text{пр}}+C_{\text{гд}}\right)}+\frac{V}{2EK_{Qp}}; \qquad (8)$$

$$K_{xp}=\frac{S_{\text{з}}}{\left(C_{\text{пр}}+C_{\text{гд}}\right)}. \qquad (9)$$

Тогда передаточную функцию ГУЭ можно представить в виде

$$W_{\text{ГУЭ}}(s)=W_3(s)W_4(s)=\frac{K_{ph}}{\left(T_{\text{ГУЭ}}s+1\right)}\quad K_{xp}\,, \qquad (10)$$

где $W_3(s)=\dfrac{K_{ph}}{\left(T_{\text{ГУЭ}}s+1\right)}$ – передаточная функция дросселя сопло–заслонка в управляющем каскаде; $W_4(s)=K_{xp}$ – передаточная функция золотникового элемента в исполнительном каскаде.

Передаточная функция МЭГУ с учетом выражений (1), (2), (10) будет иметь вид

$$W_{\text{МЭГУ}}(s)=W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s)=\frac{K_{FI}K_{hl}K_{ph}K_{xp}}{\left(T_{\text{МЭМП}}s+1\right)\left(T_{\text{ГУЭ}}s+1\right)}. \qquad (11)$$

Введем обозначения:

$$K_{\text{МЭГУ}}=K_{FI}K_{hl}K_{ph}K_{xp}\,,\ T_{\text{МЭГУ}}=\sqrt{T_{\text{МЭМП}}\quad T_{\text{ГУЭ}}}\,;$$

$$\xi=\frac{T_{\text{МЭМП}}+T_{\text{ГУЭ}}}{2\sqrt{T_{\text{МЭМП}}\quad T_{\text{ГУЭ}}}}\,,$$

где $K_{\text{МЭГУ}}$ – коэффициент усиления МЭГУ; $T_{\text{МЭГУ}}$ – постоянная времени всего устройства.

Окончательно

$$W_{\text{МЭГУ}}(s) = \frac{K_{\text{МЭГУ}}}{T^2_{\text{МЭГУ}} s^2 + 2\xi T_{\text{МЭГУ}} s + 1}. \qquad (12)$$

Полученная передаточная функция может использоваться для анализа динамических характеристик МЭГУ.

Список литературы

1. **Лещенко, В. А.** Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением / В. А. Лещенко. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. **Гамынин, Н. С.** Гидравлический следящий привод / Н. С. Гамынин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1968. – 564 с.
3. **Волков, П. Ю.** Магнитострикционные электромеханические преобразователи гидрофицированного технологического оборудования / П. Ю. Волков // Проблемы исследования и проектирования машин : сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза : ПДЗ, 2006. – С. 51–53.
4. Патент № 2293888 Российская Федерация, МПК7 F15B 3/00, Магнитострикционный электрогидравлический усилитель / П. Ю. Волков, С. Б. Демин ; заявитель и патентообладатель Пензенский гос. университет. – № 2005116619/06 ; заявл. 31.05.2005 ; опубл. 20.02.07, Бюл. № 5.

УДК 621.316.722.4

А. П. Воронов, Н. К. Юрков

ВАКУУМНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ИИС И АСУ ТП

Представлен ряд вакуумных емкостных делителей напряжений для систем автоматического регулирования и контроля рабочих режимов высоковольтных (более 1 кВ) высокочастотных (до 90 МГц) цепей. Рассмотрены преимущества их использования в качестве средств измерений. Приведены математические выражения для оценки погрешностей.

Вопросы точности, достоверности, повторяемости результатов измерений параметров высоких напряжений сохраняют свою актуальность как в производстве высоковольтных вакуумных приборов (вакуумные конденсаторы, вакуумные выключатели и переключатели), так и при оценке работоспособности высоковольтных цепей и блоков мощных радиотехнических устройств и электрофизических установок. При этом возникает необходимость в непрерывных (иногда до 1000 ч) измерениях амплитуд и определениях форм электрических сигналов в высоковольтных цепях и формирующих блоках. Частотный спектр исследуемых процессов находится в диапазоне от 0 до 100 МГц.

Существует множество методов измерений высоких напряжений [1]. Из них наибольшее распространение получили методы, использующие шаровые разрядники, статические киловольтметры и масштабные преобразователи (делители напряжений). Зависимость электрических характеристик, используемых в средствах измерений твердых и жидких диэлектриков от частоты, амплитуды напряжения и мощности сигнала, влияние на результат измерений условий окружающей среды и другие ограничения делают проблематичным их применение для измерения высокочастотных напряжений выше 1 кВ на частотах 30–90 МГц.

Исследования физики явлений в газовых средах, работы по обнаружению дефектов в электрических трансформаторах, контроль прерывистых режимов питания модуляторных ламп, СВЧ-приборов и выходных напряжений генераторов импульсных напряжений (ГИН) выделили измерительные устройства с делителями напряжения как средства преимущественного применения для наблюдения формы генерируемых импульсов. Причем точность измерений амплитуд импульсных сигналов характеризуется погрешностью 1–3% [2, 3].

В свою очередь делитель должен:

– являться малой нагрузкой для источника сигнала;

– потреблять минимум энергии измеряемого сигнала;

– обладать стабильностью параметров и характеристик элементов конструкции во времени и к внешним воздействующим факторам;

– иметь защиту от попадания высокого напряжения в измерительную цепь низкого напряжения;

– иметь минимальные габаритные размеры при максимальном рабочем напряжении;

– иметь постоянное значение коэффициента деления в рабочих диапазонах частот и напряжений.

Независимо от конструктивного исполнения делителя его эквивалентные схемы представляют собой комбинации сосредоточенных элементов – индуктивности, емкости, активных сопротивлений. В зависимости от типа основных элементов схемы замещения (т.е. элементов, несущих максимальную электрическую нагрузку) делители бывают резистивные, индуктивные и емкостные. Анализ работы устройств, соответствующих основным элементам, показал, что емкостные делители напряжений потребляют минимум энергии измеряемого сигнала и могут использоваться до частот, на которых при номинальном напряжении происходит пробой внешней изоляции. Причем наилучшими характеристиками обладают емкостные делители, содержащие конденсаторы с газообразным диэлектриком [4].

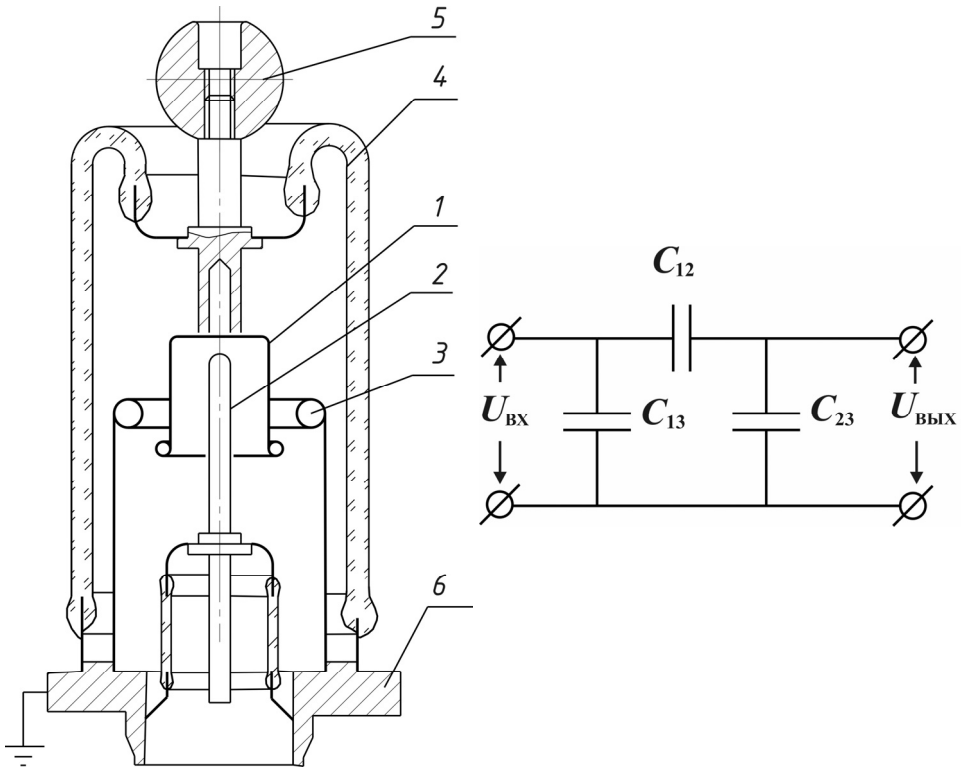
Неоспоримые преимущества газообразного диэлектрика (тангенс угла потерь на частоте 50 Гц равен 10^{-9}, независимость диэлектрической проницаемости от частоты и температуры, полное отсутствие явления абсорбции) делают его незаменимым в образцовых конденсаторах. В то же время высокая электрическая прочность, восстанавливаемость электрической прочности после пробоя, низкая индуктивность и высокая добротность (от 1000 до 10000) позволяют эффективно использовать конденсаторы с газообразным диэлектриком и в частности с вакуумным, в высоковольтной высокочастотной технике [5]. Тем самым вышеперечисленные преимущества вакуумной изоляции свидетельствуют о необходимости рассмотрения вопроса ее применения в масштабных преобразователях высоких высокочастотных напряжений.

Первый отечественный вакуумный высоковольтный делительный конденсатор типа К61-8 появился в конце 1960-х гг. [6, 7]. Общий вид и эквивалентная схема конденсатора изображены на рисунке 1.

Основой конструкции (рис. 1,а) является газонепроницаемая металлостеклянная оболочка с давлением остаточных газов внутри $10^{-3}…10^{-5}$ Па. Оболочка 4 окружает системы электродов 1, 2, 3, образующих два или несколько конденсаторов (рис. 1,б), и фиксирует их расположение в пространстве. Конфигурация и шероховатость поверхности противокоронного электрода 5, а также применение высококачественных вспомогательных электроизоляционных материалов (например, стекла молибденовой группы) для вакуум-плотной оболочки создают необходимые условия исключения коронного разряда и сведения к минимуму токов утечек (порядка единиц, в худшем случае десятка мкА). Соотношение емкостей C_{12}, C_{13}, C_{23} конденсаторов подобрано таким образом, что выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ оказывается меньше относительно напряжения на входе $U_{\text{вх}}$ схемы замещения в заданное число раз. Причем емкость C_{12} образует плечо высокого напряжения, а емкость C_{23} – плечо низкого напряжения.

На рисунке 1,а: 1 – высокопотенциальный электрод; 2 – низкопотенциальный электрод; 3 – экранный электрод; 4 – газонепроницаемая оболочка; 5 – противокоронный электрод; 6 – основание.

На рисунке 1,б: C_{12} – емкость, образованная между 1 и 2 электродами; C_{23} – емкость, образованная между 2 и 3 электродами; C_{13} – емкость, образованная между 1 и 3 электродами; $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ – входное и выходное напряжения соответственно.



а) б)

Рис. 1 Вакуумный емкостный делитель напряжений:
а – общий вид ВЕДН; б – эквивалентная схема ВЕДН

К61-8 имеет надежное экранирование низкопотенциального электрода 2 от внешних электромагнитных полей интенсивностью 100 А/м и 500 В/м [8]. Экранирование осуществляется высокопотенциальным стаканообразным электродом 1 и дополнительным экранным электродом 3, установленным на основании 6. Для получения необходимого коэффициента деления изготовители радиотехнических устройств вынуждены были подключать параллельно выходу делительного конденсатора конденсаторы постоянной емкости с твердым диэлектриком. Выявленные в процессе эксплуатации недостатки (температурная нестабильность, разница диэлектрических постоянных изоляционных материалов, невысокая точность коэффициента деления) были устранены в ВЕДН типа К61-17. В конструкцию данного делителя при участии автора был введен вновь созданный конденсатор переменной емкости [9], исключавший применение конденсаторов постоянной емкости с твердым диэлектриком и обеспечивающий выставление коэффициента деления с заданной точностью.

Начавшееся формирование метрологического обеспечения создания и производства электрофизических установок потребовало увеличения рабочего напряжения делительных конденсаторов до 100 кВ (К61-18) и создания на их основе серии делителей. В отличие от своего предшественника, К61-18 имеет защитный электрод. Этот электрод находится между экранным и низкопотенциальным электродами. Если на входе делителя амплитуда сигнала

превышает допустимое значение, то между высокопотенциальным и защитным электродами возникает электрический пробой. Последнее обстоятельство исключает попадание высокого напряжения на низкопотенциальный электрод и соответственно на вход измерительного прибора. ВЕДН типа ДНЕ1-4, ДНЕ1-5, укомплектованные К61-18 и конденсаторами переменной емкости [9], имеют номинальные коэффициенты деления $K_0 = 10000$, $K_0 = 2000$ и погрешности отклонения коэффициента деления от номинального значения $\delta = \pm 5\%$, $\delta = \pm 3\%$ соответственно. Кроме того, в конструкцию ДНЕ1-5 включен соединительный кабель длиной 5 м.

Дальнейшему расширению пределов рабочих напряжений препятствовало неравномерное распределение электрического поля вдоль диэлектрической части герметичной оболочки. Возможность повышения электрической прочности делителей при исключении роста габаритных размеров была показана в одной из расчетно-экспериментальных работ [10]. Выравнивание электрического поля достигалось рассредоточением проходной емкости вдоль оси симметрии высоковольтного плеча и введением системы рассеивающих электродов. Полученные результаты были применены в делителе типа ДНЕ1-6 [11]. ДНЕ1-6 имеет рабочее напряжение 200 кВ. Конструкция делителя отличалась от предыдущих наличием блоков, каждый из которых выдерживал испытательное напряжение 110 кВ (ампл. зн.). Делитель комплектовался коаксиальным кабелем длиной 20 м и имел основную погрешность коэффициента деления $\delta = \pm 1\%$.

Параллельно с работами по созданию делителей импульсных напряжений с участием автора проводились работы по созданию делителей высокочастотных напряжений [11, 12]. Делители предназначались для работы со стандартными вольтметрами или осциллографами. Снижение входной емкости до 3,0–3,5 пФ, обеспечение температурной нестабильности коэффициента передачи $\pm 0{,}02\%$ на 1°С, применение вместо стекла алюмооксидной керамики позволило поднять уровень рабочих напряжений до 25 кВ на частоте 30 МГц. Появление таких делителей решало задачу метрологического обеспечения производства вакуумных конденсаторов и вакуумных выключателей и переключателей. Диапазон рабочих частот был расширен сначала до 60 МГц (ДНЕ1-2), а позже до 90 МГц (ДНЕ1-3).

На рисунке 2 изображены вакуумные емкостные делители типов ДНЕ1-5 и ДНЕ1-2.

Математическая модель функции преобразования делителя напряжения представляется в виде [13]

$$K(j\omega) = K_0(1+k)\frac{1+j\omega\tau_2}{1+j\omega\tau_1}\ \frac{1}{1+j2\alpha\omega\tau_3+(j\omega\tau_3)^2}\ e^{-j\omega\tau}, \qquad (1)$$

где K_0 – номинальный коэффициент преобразования; τ – время задержки сигнала при его распространении от входа к выходу делителя; τ_1, τ_2 – постоянные времени плеч делителя; τ_3 – постоянная времени, связанная с минимальной резонансной частотой ω_P соотношением $\tau_3 = 1/\omega_P$; α – затухание, определяемое добротностью резонансного контура; k – коэффициент нагрузки, зависящий от частоты сигнала и амплитуды напряжения.

Рис. 2 Вакуумные емкостные делители напряжений

Условия независимости коэффициента передачи от частоты ω, получаемые из формулы (1):

1. Равенство постоянных времени плеч делителя $\tau_1 = \tau_2$.

2. Минимальная резонансная частота делителя должна быть больше верхней рабочей частоты $\omega \ll \omega_P$.

Каждое из плеч ВЕДН образовано емкостным $1/\omega C_i$ и индуктивными ωL_i сопротивлениями, активным сопротивлением электродов и выводов r_i, активным сопротивлением диэлектрической части оболочки и установочных элементов R_i [14]. Поскольку функция преобразования рассматривается в широком диапазоне частот, выделим области низких (до 1 МГц) и высоких частот (свыше 10 МГц). В указанных областях соблюдаются неравенства:

– для низких частот

$$\omega L_i, r_i \ll \frac{1}{\omega C_i} \leq R_i;$$

– для высоких частот

$$\omega L_i, r_i \leq \frac{1}{\omega C_i} \ll R_i.$$

Для RC-цепей, образующих плечи ВЕДН в области низких частот, выходное активное сопротивление ВЕДН значительно больше входного активного сопротивления измерительного прибора (нагрузки) $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{н}}$. Поэтому

$\tau_2 = (C_{\text{вых}} + C_{\text{н}}) \dfrac{R_{\text{вых}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{н}}}$ плеча низкого напряжения преобразуется к виду $\tau_2 = R_{\text{н}}(C_{\text{вых}} + C_{\text{н}})$, а относительное отклонение в области низких частот представляется выражением

$$\delta_{\text{н}} = \frac{1}{2\omega^2 \tau_2^2} 100\% .$$

На относительное отклонение $\delta_{\text{в}}$ коэффициента передачи в области частот, близких к верхней рабочей частоте, оказывают влияние резонансные свойства плеч и потери в металлической арматуре, определяющие добротности колебательных контуров. Например, при каскадном соединении П-образного и Г-образного четырехполюсников, замещающих ВЕДН типа ДНЕ1-2, относительное отклонение коэффициента передачи $\delta_{\text{в}} = \delta_{\text{в1}} + \delta_{\text{в2}}$ [14], где

$$\delta_{\text{в1}} = -\omega^2 \left[\frac{C_{2\text{г}}}{C_{2\text{г}} + C_{\text{н}}} \left(\frac{1}{\omega_{3\text{п}}^2} - \frac{1}{\omega_{1\text{п}}^2} + \frac{1}{\omega_{2\text{г}}^2} - \frac{1}{\omega_{1\text{г}}^2} \right) \right] 100\% ;$$

$$\delta_{\text{в2}} = \omega^2 \left[\frac{C_{2\text{г}}}{C_{2\text{г}} + C_{\text{н}}} \left(\tau_{3\text{п}}^2 - \tau_{1\text{п}}^2 + \tau_{2\text{г}}^2 - \tau_{1\text{г}}^2 \right) \right] 100\% .$$

Степень взаимной компенсации значений $\delta_{\text{в1}}$ и $\delta_{\text{в2}}$ определяется соотношением индуктивности L_i и активного сопротивления r_i элементов четырехполюсников, входящих соответственно в $\omega_i = \sqrt{L_i C_i}$ и $\tau_i = r_i L_i$. Необходимые значения L_i и r_i формируются в процессе конструирования делителей для конкретного диапазона частот. Для увеличения значения минимальной резонансной частоты ω_P разработчиками ВЕДН использовалось многокаскадное построение ВЕДН и конденсаторы с переменными межэлектродными зазорами (неоднородная линия) [15, 16].

Температура перегрева ВЕДН в установившемся режиме описывается формулой [17]

$$\Delta T_{\text{у}} = B U^2 f^2 \sqrt{f} ,$$

где B – константа, зависящая от значения входной емкости, тепловых свойств делителя и условий эксплуатации; U – рабочее напряжение; f – частота, на которой производится измерение.

Относительное отклонение коэффициента преобразования от номинального значения, вызванное нагревом протекающим через делитель током, является одной из составляющих коэффициента нагрузки $\left(k \approx \delta_{U,f}\right)$ и равно

$$\delta_{U,f} = \beta \Delta T_{\text{у}}$$

где β – температурная нестабильность коэффициента передачи.

Температура перегрева уменьшается с уменьшением входной емкости делителя, тангенса угла потерь конденсаторов, образующих делитель, и улучшением условий теплообмена.

Изложенные закономерности присущи всем типам разработанных ВЕДН импульсных и высокочастотных напряжений, основные параметры которых представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Вакуумные высоковольтные делительные конденсаторы

Тип изделия, технические условия, год выпуска	Рабочее напряжение, кВ	Емкость, пФ		Входное сопротивление по постоянному току, Ом	Габариты, мм		Масса, кг
		входная	проходная		диаметр	высота	
К61-8, (ОЖО.465.026)	до 75	до 10	3,5	10^{10}	61	277	0,69
К61-18, (ОЖО.465.030)	до 100	до 10	3,0	10^{10}	105	290	1,8

Таблица 2

Вакуумные емкостные делители высокочастотных напряжений

Тип изделия, технические условия, год выпуска	Рабочее напряжение, кВ	Коэффициент деления	Основная погрешность, %	Входная емкость, пФ	Диапазон рабочих частот, МГц	Габариты, мм		Масса, кг
						диаметр	высота	
ДНЕ1-2, (К61-19) ОЖО.273.006	1–25	1000	± 5	3,5	0,1–30	90	250	1,4
ДНЕ1-3, ОЖО.272.009	1–20	1000	± 5	3,0	1–60	90	221	1,2

Таблица 3

Вакуумные емкостные делители импульсных напряжений

Тип изделия, технические условия, год выпуска	Рабочее напряжение, кВ	Коэффициент деления	Основная погрешность, %	Входная емкость, пФ	Диапазон рабочих частот, МГц	Габариты, мм		Масса, кг
						диаметр	высота	
ДНЕ1-1 (К61-17), ОЖО.465.025	3–75	1000	± 5	до 10	0,01–8,0	165	368	3,1
ДНЕ1-4, ОЖО.465.007	5–100	10000	± 5	до 10	0,01–4,0	180	400	4,5
ДНЕ1-5, ОЖО.272.010	5–100	2000	± 3	до 10	0,01–5,0	180	420	5,0
ДНЕ1-6 (КС-6), ОЖО.206.040	20–200	20000	± 1	до 15	0,04–5,0	380	800	36,0

Таким образом, использование вакуума в качестве основного диэлектрика в емкостных делителях позволяет создавать компактные средства измерений для ИИС и АСУ ТП на базе делителей импульсных напряжений до 300 кВ и высокочастотных (до 90 МГц) напряжений с амплитудой до 25 кВ (в перспективе до 50 кВ), превосходящие по основным эксплуатационным характеристикам средства измерений других классов.

Список литературы

1. **Шваб, А.** Измерения на высоком напряжении / А. Шваб ; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
2. **Fowkes W. R., Rowe R. M.** // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1966. – V. IM–15. – № 4. – P. 284.
3. ГОСТ 17512 – 82. Методы измерения при испытаниях на высоком напряжении.
4. **Воронов А. П.** // Электронная техника.– 1991. – Вып. 2 (83) – С. 8. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
5. **Буц, В. П.** Вакуумные конденсаторы / В. П. Буц, М. Т. Железнов, М. М. Юринов. – Л. : Энергия, 1971.
6. **Воронов А. П., Смирнов Э. Н.** // Электронная промышленность. – 1995. – № 1. – С. 32.
7. **Смирнов Э. Н., Железнов М. Т.** // Электронная техника. – 1969. – Вып. 5. – С. 100. – (Радиокомпоненты).
8. А. с. 260022 СССР / В. П. Буц, Э. Н. Смирнов, И. П. Тюрин // Бюл. изобрет. – 1970. – № 3.
9. А. с. 458045 СССР / Э. Н. Смирнов, В. М. Сидоров, А. П. Воронов // Бюл. изобрет. – 1975. – № 3.
10. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П.** // Электронная техника. – 1992. – Вып. 1(86). – С. 8. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
11. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П.** // Метрологическое обеспечение ИИС и АСУ ТП : тезисы докл. III Всесоюз. конф. – Львов : ВНИИМИУС, 1990. – С. 217.
12. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П., Купцова З. И.** // Электронная промышленность. – 1986. – № 2. – С. 31.
13. **Воронов А. П.** // Надежность и качество : труды Междунар. симпозиума. – Пенза, 2007. – 1 т. – С. 171.
14. **Смирнов Э. Н., Воронов А. П.** // Электронная техника. – 1981. – Вып. 3(44). – С. 8. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
15. А. с. 790030 СССР / Э. Н. Смирнов, В. М. Сидоров // Бюл. изобрет. – 1980. – № 47.
16. А. с. 993403 СССР / Э. Н. Смирнов, В. М. Сидоров // Бюл. изобрет. – 1983. – № 4.
17. **Воронов А. П.** // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – Пенза, 2006. – 1 т. – С. 397.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.755-251

С. В. Кочкин, Б. А. Малёв

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИСБАЛАНСА ЖЕСТКИХ РОТОРОВ В РЕЖИМЕ СФЕРИЧЕСКОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ

В статье рассмотрен новый метод измерения дисбаланса жестких роторов при их балансировке в режиме сферического циркуляционного движения (сферической вибрации), приведена кинематическая схема устройства, получены дифференциальные уравнения движения колебательной системы под действием неуравновешенных сил инерции.

При балансировке тел вращения в динамическом режиме для определения величины и места расположения неуравновешенности повсеместно используется вращательное движение.

Метод определения дисбаланса при вращении, несмотря на очевидные преимущества, имеет и ряд недостатков:

– относительно невысокая точность определения угловой координаты неуравновешенности, которая определяется практически в пределах некоторого сектора;

– трудности при балансировке несплошных деталей, у которых масса распределена по окружности неравномерно и сосредоточена в определенных местах (например, в лопастях);

– в некоторых случаях существует опасность разрушения детали под воздействием центробежных сил;

– затруднена автоматизация процесса уравновешивания во время вращения ротора.

Указанные недостатки принципиально устраняются при использовании вибрационных методов балансировки роторов без их вращения.

Одним из сравнительно легко реализуемых способов определения дисбаланса в вибрационном режиме является метод балансировки в режиме сферического циркуляционного движения [1, 2].

При конструирования устройств, реализующих данный принцип, крайне необходимо построение математических моделей с целью выбора таких параметров колебательных систем, при которых информация о неуравновешенности ротора будет максимально приближена к достоверной. Для этого необходимо иметь уравнения движения под действием неуравновешенности, вывод которых приводится ниже.

Один из возможных вариантов кинематической схемы устройства для измерения дисбаланса в режиме сферического циркуляционного движения показан на рисунке 1.

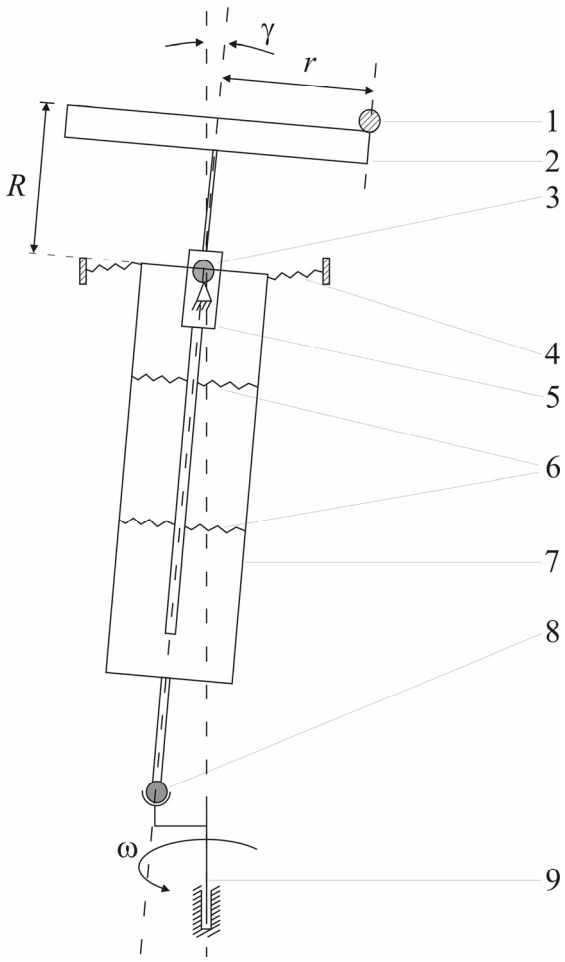


Рис. 1 Кинематическая схема колебательной системы

Балансируемый ротор 2 (рис. 1) радиуса *r* имеет дисбаланс 1 («тяжелое место»), расположенный на этом же радиусе. Ротор жестко закреплен на валу, который в свою очередь посредством упругих элементов 6 связан с обоймой 7. Жесткость упругих элементов в радиальном направлении выбрана максимальной, а в тангенциальном (крутильная жесткость) – исходя из требуемого режима работы устройства. В нашем случае таким режимом является дорезонансный. То есть крутильная жесткость упругих элементов 6 с нагрузкой вал–ротор–дисбаланс должна обеспечивать собственную частоту крутильных колебаний относительно главной оси инерции большую, чем частота колебаний вынуждающей силы. Обойма приводится в циркуляционное движение с частотой ω посредством эксцентрикового привода через сферический шарнир 8. Ограничение горизонтальных и вертикальных перемещений обоймы обеспечивается сферическим шарниром 3. Последний установлен на расстоянии *R* от плоскости приведения ротора в верхней части обоймы и жестко закреплен на ее основании. От осевого проворота обойму удерживает мембрана 4, закрепленная одной стороной на обойме, а другой на основании (станине). Сборка дисбаланс–ротор–вал–обойма имеет наклон γ относительно вертикальной оси, совпадающей с осью привода 9. При цирку-

ляционном движении на ротор вследствие наличия дисбаланса действуют силы инерции, тангенциальная составляющая которых вызывает крутильные колебания вала и ротора относительно обоймы. Амплитуда этих колебаний пропорциональна величине неуравновешенности ротора, а фазовый сдвиг относительно начальной точки измерений указывает на ее месторасположение.

На рисунке 2 показаны параметры расположения дисбаланса на роторе при его движении.

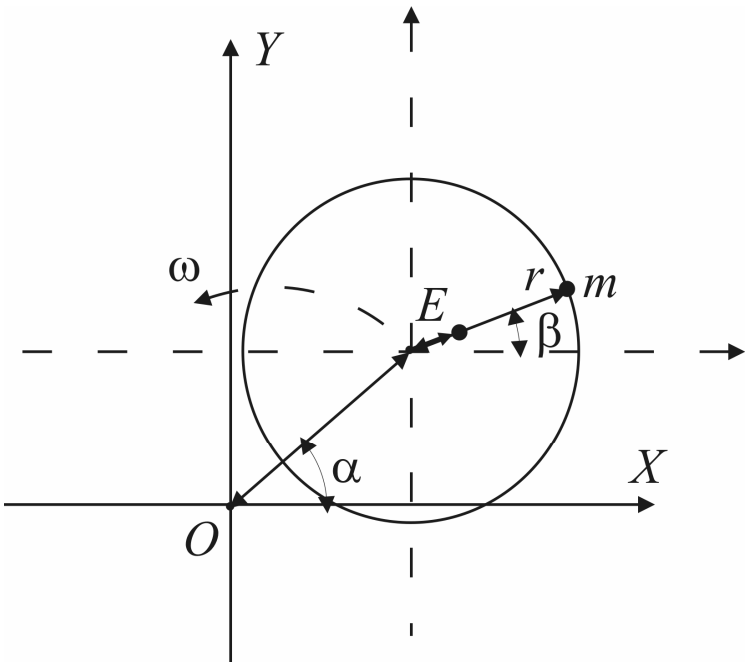


Рис. 2 Положение дисбаланса на роторе, вид сверху

Ротор с дисбалансом m перемещается с круговой частотой ω. Угол поворота геометрического центра ротора в неподвижной системе координат – α, а угол поворота дисбаланса – β.

Величина сдвига центра масс ротора E относительно его геометрической оси (условный эксцентриситет) из-за наличия дисбаланса m равна

$$E = \frac{mr}{M_0},$$

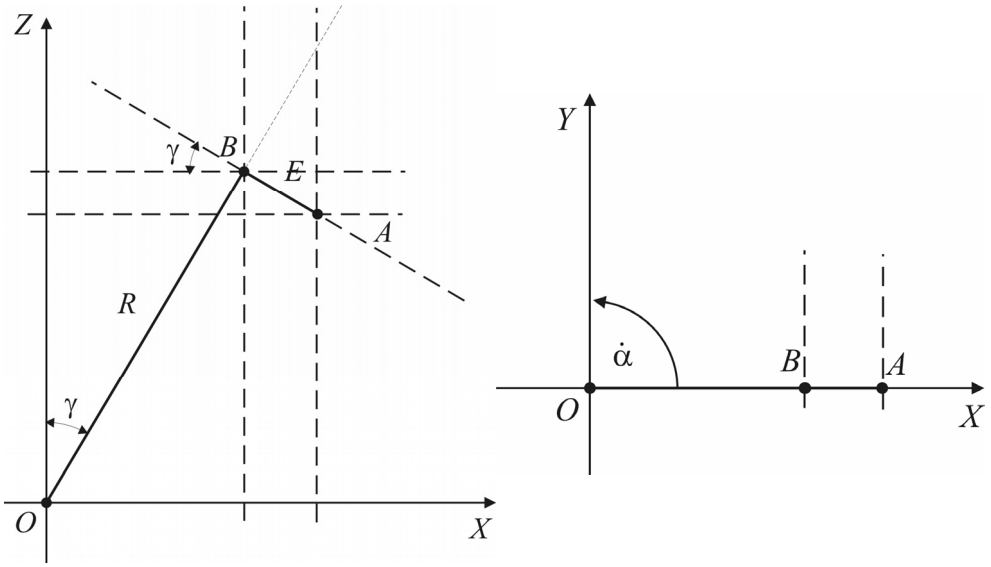
где M_0 – масса балансируемого ротора.

Пренебрегая высотой ротора и считая его абсолютно твердым телом, для расчетов представим ротор вместе с дисбалансом в виде точки. Последняя удалена на величину E в плоскости приведения от геометрического центра ротора в направлении расположения дисбаланса и имеет общую массу $M_0 + m$.

Рассмотрим характер движения колебательной системы и его параметры.

Первоначально принимаем величину дисбаланса равной нулю.

На рисунке 3,а показана расчетная схема перед началом движения (вид сбоку), а на рисунке 3,б показано начальное положение колебательной системы в проекции «вид сверху».



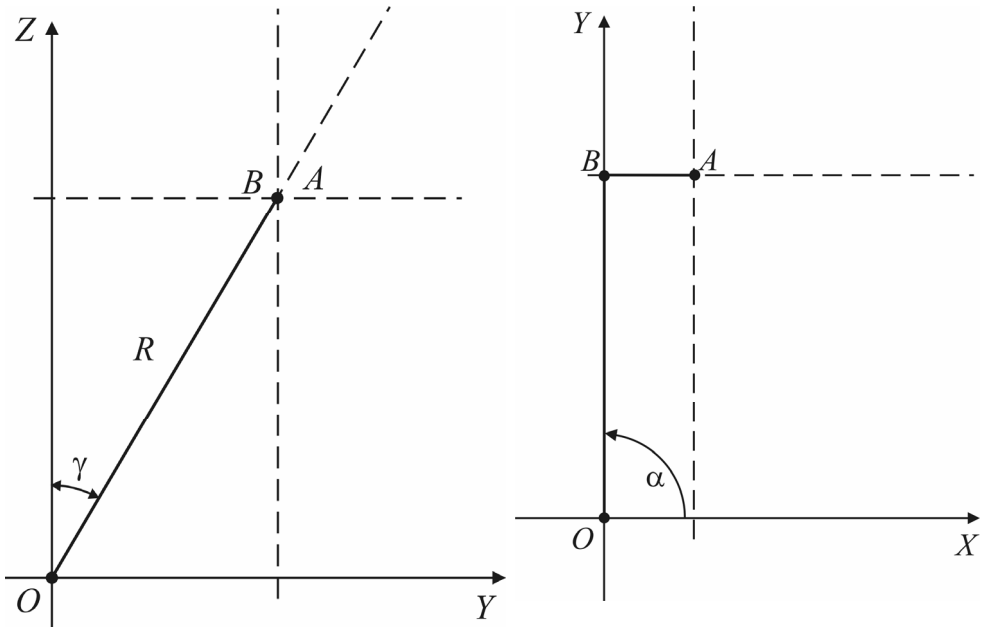
а) вид сбоку б) вид сверху

Рис. 3 Начальное положение системы

В начальном положении принято, что дисбаланс расположен в наинизшей точке ротора. Отрезок *OB* – верхняя часть вала. Отрезок *AB* – условный эксцентриситет ротора. В точке *A* сосредоточена вся масса ротора и дисбаланса.

На рисунке 3,б $\dot{\alpha} = \omega$ – угловая скорость вращения вала относительно вертикальной оси (см. рис. 1).

После поворота на угол $\alpha = 90°$ система принимает вид, показанный на рисунке 4.



а) вид сбоку б) вид сверху

Рис. 4 Система после поворота на 90°

Перейдем в подвижную систему отсчета $X'OY'$. Эта система вращается вместе с проекцией R на плоскость XOY, что показано на рисунке 5 при произвольном положении дисбаланса на роторе.

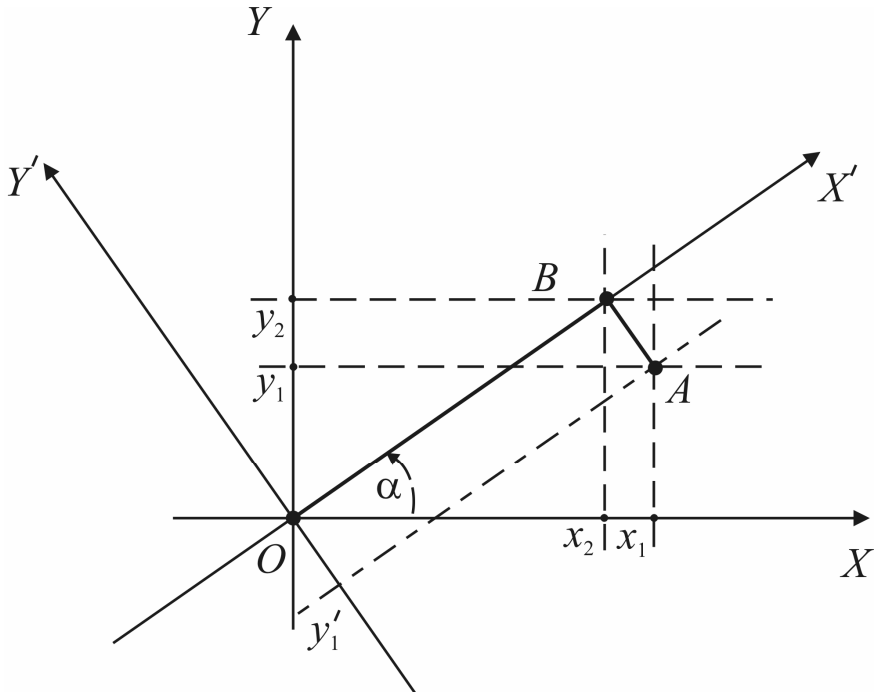


Рис. 5 Переход в подвижную систему отсчета

Так как в начальный момент времени неподвижная и подвижная системы координат совпадают, то о параметрах системы можно судить по рисунку 3. В подвижной системе координат в начальный момент времени $(\alpha = 0°)$, проекции точки A на оси X' и Y' равны:

$$X' = R\sin\gamma + E\cos\gamma; \quad (1)$$

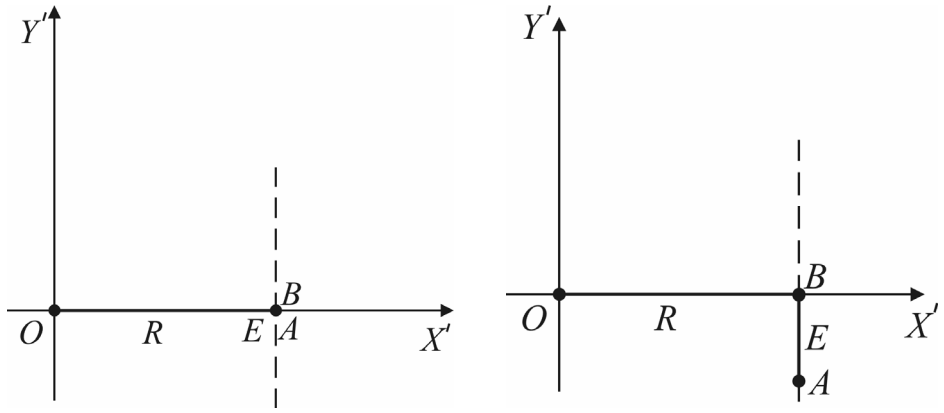
$$Y' = 0. \quad (2)$$

После поворота подвижной системы координат вместе с валом последний повернется вокруг собственной оси на угол $\beta = \alpha = 90°$. На рисунке 6 показан вид системы до и после поворота на угол $\alpha = 90°$.

При повороте системы на угол $\alpha > 0°$ (если смотреть со стороны вертикальной оси Z сверху, то против часовой стрелки), поворот на угол β вокруг оси вала будет происходить по часовой стрелке.

В этом случае первая составляющая проекции точки A на ось X' в уравнении (1) $R\sin\gamma$ сохранится, а за время поворота вала с $\beta = 0°$ до $\beta = 90°$, вторая составляющая проекции точки A на ось X' – $E\cos\gamma$ гармонически изменится со значения $E\cos\gamma$ до 0. Поэтому проекция точки A на ось X' принимает вид:

$$X' = R\sin\gamma + E\cos\gamma\cos\beta. \quad (3)$$



а) система в начальный момент времени б) система после поворота на 90°

Рис. 6 Вид системы сверху

В то же время проекция точки *A* на ось Y' за время поворота вала с $\beta = 0°$ до $\beta = 90°$ изменится с 0 до –*E*. Это значит

$$Y' = -E\sin\beta\,. \tag{4}$$

Применим известные формулы преобразования координат:

$$\begin{aligned} X &= X'\cos\alpha - Y'\sin\alpha;\\ Y &= X'\sin\alpha + Y'\cos\alpha. \end{aligned} \tag{5}$$

Подставив в уравнения (5) соотношения (3) и (4), получим:

$$\begin{aligned} X &= (R\sin\gamma + E\cos\gamma\cos\beta)\cos\alpha + E\sin\beta\sin\alpha;\\ Y &= (R\sin\gamma + E\cos\gamma\cos\beta)\sin\alpha - E\sin\beta\cos\alpha. \end{aligned} \tag{6}$$

После преобразований уравнений (6) имеем:

$$\begin{aligned} X &= R\sin\gamma\cos\alpha + E\cos\gamma\cos\beta\cos\alpha + E\sin\beta\sin\alpha;\\ Y &= R\sin\gamma\sin\alpha + E\cos\gamma\cos\beta\sin\alpha - E\sin\beta\cos\alpha. \end{aligned} \tag{7}$$

Уравнения (7) показывают зависимость изменения проекций точки *A* на оси *X* и *Y* без учета дисбаланса.

Рассмотрим изменения проекции точки *A* на ось *Z*.

Из рисунка 3,а видно, что в начальном положении величина проекции точки *A* на ось *Z* равна

$$Z = R\cos\gamma - E\sin\gamma\,, \tag{8}$$

а при повороте системы на угол $\alpha = 90°$ проекция точки *A* на ось *Z* равна

$$Z = R\cos\gamma\,.$$

Очевидно, что с изменением величины угла α с 0° до 90° составляющая проекции точки *A* на ось *Z* изменяется с величины $-E\sin\gamma$ до 0. При этом происходит поворот вала на угол $\beta = 90°$. То есть в общем виде величина проекции точки *A* на ось *Z* равна

$$Z = R\cos\gamma - E\sin\gamma\cos\beta\,. \tag{9}$$

Присоединив уравнения (7) к уравнению (9), получаем систему уравнений, описывающую положение точки *A* при сферическом циркуляционном движении в проекциях на оси *X*, *Y*, *Z* без учета влияния на движение дисбаланса:

$$\begin{aligned} X &= R\sin\gamma\cos\alpha + E\cos\gamma\cos\beta\cos\alpha + E\sin\beta\sin\alpha; \\ Y &= R\sin\gamma\sin\alpha + E\cos\gamma\cos\beta\sin\alpha - E\sin\beta\cos\alpha; \\ Z &= R\cos\gamma - E\sin\gamma\cos\beta. \end{aligned} \qquad (10)$$

Оценим порядки величин сил инерции, действующих на дисбаланс.

Как следует из описания рисунка 1, упругие элементы в радиальном направлении имеют максимально возможную жесткость. В то же время тангенциальная жесткость этих элементов достаточно мала. Отношение радиальной жесткости к тангенциальной достигает 20 и более. Учитывая это, можно сделать вывод, что степень влияния тангенциальной составляющей сил инерции на угловое перемещение ротора с валом значительно превосходит степень влияния радиальной, а следовательно влиянием последней можно пренебречь.

В этом случае при движении системы вследствие наличия дисбаланса происходит отставание вращения вала от идеального значения β на угол δ. Это следствие воздействия тангенциальных сил инерции, действующих на неуравновешенную массу дисбаланса.

Введем понятие места расположения дисбаланса. Как видно из рисунков 3,а,б, при показанном положении дисбаланса координата расположения дисбаланса совпадает с начальной фазой возникающих колебаний. В случае иной угловой координаты места расположения дисбаланса на роторе в любой момент времени угол закручивания вала β будет уменьшаться на значение φ, что и является угловой координатой расположения дисбаланса.

Запишем систему уравнений, описывающую положение точки *A* при сферическом движении в проекциях на оси *X*, *Y*, *Z* с учетом влияния на движение дисбаланса:

$$\begin{aligned} X &= R\sin\gamma\cos\alpha + E\cos\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi)\cos\alpha + E\sin(\beta-\delta-\varphi)\sin\alpha; \\ Y &= R\sin\gamma\sin\alpha + E\cos\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi)\sin\alpha - E\sin(\beta-\delta-\varphi)\cos\alpha; \\ Z &= R\cos\gamma - E\sin\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi). \end{aligned} \qquad (11)$$

Считаем связи, наложенные на систему, показанную на рисунке 1, голономными. Силы, действующие на систему, являются потенциальными (сила тяжести и сила упругости). Тогда изучаемая система является консервативной [3, 4]. Поэтому вывод уравнения движения можно выполнять на основе уравнения Лагранжа для консервативной системы:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \qquad (12)$$

где $L = T - U$ – функция Лагранжа, равная разности кинетической *T* и потенциальной *U* энергии; q_i и $\dot{q}_i$ – обобщенные координаты колебательной системы и их производные.

Обобщенными координатами являются угол поворота системы α и угол поворота вала δ. Считаем, что система движется с постоянной угловой скоростью, а координата α циклическая. Поэтому достаточно составить уравнение движения относительно одной обобщенной координаты – угла δ.

Уравнение движения получено на основе рисунков 3–6 в принятых обозначениях: A – центр масс системы ротор–дисбаланс; $M = M_0 + m$ – масса ротора с дисбалансом; m – масса дисбаланса; r – радиус места расположения дисбаланса; M_0 – масса балансируемого ротора; R – длина вала; I – осевой момент инерции вала относительно его главной оси инерции; $E = \dfrac{mr}{M_0}$ – условный эксцентриситет; φ – угловая координата места расположения дисбаланса.

Рассмотрим все энергии, входящие в лагранжиан.

Полная кинетическая энергия точки A, являющейся центром масс системы ротор–дисбаланс, равна

$$T_1 = \frac{MV^2}{2},$$

где V^2 – квадрат полной скорости этой точки.

Кинетическая энергия вращения вала вокруг собственной оси при колебательном движении равна

$$T_2 = \frac{I}{2}\left(\dot{\beta} - \dot{\delta}\right)^2.$$

Движение происходит в потенциальных полях силы тяжести и упругой возвращающей силы упругих элементов 6 (рис. 1). При повороте на угол δ происходит закручивание вала вокруг собственной оси и возникает изменение потенциальной энергии упругих элементов колебательной системы.

Тогда при малых углах δ получаем потенциальную энергию упругих элементов:

$$U_1 = \frac{1}{2} C_{\text{уэ}} \delta^2,$$

где $C_{\text{уэ}}$ – совокупная крутильная (угловая) жесткость упругих элементов.

Изменение потенциальной энергии в системе происходит от изменения высоты (координаты Z) центра масс. Уравнение потенциальной энергии имеет вид

$$U_2 = MgE \sin\gamma(1 - \cos(\beta - \delta - \varphi)),$$

где g – ускорение свободного падения.

Функция Лагранжа имеет вид

$$L = \frac{MV^2}{2} + \frac{I}{2}\left(\dot{\beta} - \dot{\delta}\right)^2 - \frac{1}{2} C_{\text{уэ}} \delta^2 - MgE \sin\gamma(1 - \cos(\beta - \delta - \varphi)). \qquad (13)$$

Находим квадрат полной скорости точки A. Для этого продифференцируем по времени уравнения (11), а затем по формуле

$$V^2 = V_X{}^2 + V_Y{}^2 + V_Z{}^2 \tag{14}$$

определяем квадрат полной скорости.

Заметим, что при дифференцировании угол γ считается постоянным, не зависящим от времени:

$$\begin{aligned} V_X = \frac{dX}{dt} = &-R\sin\gamma\sin(\alpha)\dot{\alpha} - E\cos\gamma\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot\left(\dot{\beta}-\dot{\delta}\right)\cos\alpha - \\ &-E\cos\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\cos(\alpha)\cdot\dot{\alpha} + E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\left(\dot{\beta}-\dot{\delta}\right)\cdot\sin\alpha + \\ &+E\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot\cos(\alpha)\cdot\dot{\alpha}; \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} V_Y = \frac{dY}{dt} = &R\sin\gamma\cos(\alpha)\cdot\dot{\alpha} - E\cos\gamma\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot\left(\dot{\beta}-\dot{\delta}\right)\sin\alpha + \\ &+E\cos\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\cos(\alpha)\cdot\dot{\alpha} - E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\left(\dot{\beta}-\dot{\delta}\right)\cos\alpha + \\ &+E\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot\sin(\alpha)\cdot\dot{\alpha}; \end{aligned} \tag{16}$$

$$V_Z = \frac{dZ}{dt} = E\sin\gamma\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot\left(\dot{\beta}-\dot{\delta}\right). \tag{17}$$

Подставляя в уравнение (14) выражения (15), (16) и (17), получим уравнение квадрата полной скорости точки A:

$$\begin{aligned} V^2 = V_X{}^2 + V_y{}^2 + V_z{}^2 = &-E^2\left(\dot{\alpha}\right)^2\cdot\left(\cos(\beta-\delta-\varphi)\right)^2 + E^2\left(\dot{\delta}\right)^2 + E^2\left(\dot{\beta}\right)^2 + \\ &+E^2\left(\dot{\alpha}\right)^2 - R^2\left(\dot{\alpha}\right)^2\cdot\left(\cos\gamma\right)^2 - 2E^2\dot{\beta}\dot{\delta} + R^2\left(\dot{\alpha}\right)^2 + 2E^2\cos\gamma\cdot\dot{\delta}\dot{\alpha} + \\ &+2R\sin\gamma\cdot\dot{\alpha}E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\dot{\delta} - 2R\sin\gamma\cdot\dot{\alpha}E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\dot{\beta} + \\ &+E^2(\cos(\gamma))^2\left(\cos(\beta-\delta-\varphi)\right)^2(\dot{\alpha})^2 + \\ &+2R\sin\gamma(\dot{\alpha})^2E\cos\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi) - 2E^2\cos\gamma\cdot\dot{\beta}\dot{\alpha}. \end{aligned} \tag{18}$$

Подставляя в уравнение (13) значение квадрата полной скорости (18), получаем функцию Лагранжа в виде

$$\begin{aligned} L = \Bigg(\frac{1}{2}M\Big[&-E^2\left(\dot{\alpha}\right)^2\cdot\left(\cos(\beta-\delta-\varphi)\right)^2 + E^2\left(\dot{\delta}\right)^2 + E^2\left(\dot{\beta}\right)^2 + \\ &+E^2\left(\dot{\alpha}\right)^2 - R^2\left(\dot{\alpha}\right)^2\cdot\left(\cos\gamma\right)^2 - 2E^2\dot{\beta}\dot{\delta} + R^2\left(\dot{\alpha}\right)^2 + \\ &2E^2\cos\gamma\cdot\dot{\delta}\dot{\alpha} + 2R\sin\gamma\cdot\dot{\alpha}E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\dot{\delta} - \\ &-2R\sin\gamma\cdot\dot{\alpha}E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\dot{\beta} + E^2(\cos(\gamma))^2\left(\cos(\beta-\delta-\varphi)\right)^2(\dot{\alpha})^2 \\ &+2R\sin\gamma(\dot{\alpha})^2E\cos\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi) - 2E^2\cos\gamma\cdot\dot{\beta}\dot{\alpha}\Big]\Bigg) \\ &+\frac{I}{2}\cdot\left(\dot{\beta}-\dot{\delta}\right)^2 - \frac{1}{2}C_{\text{уэ}}\delta^2 - MgE\sin\gamma(1-\cos(\beta-\delta-\varphi)). \end{aligned} \tag{19}$$

Принимая во внимание, что значение α численно равно значению β, сделаем замену $\dot{\beta} = \omega$. Тогда уравнение (19) примет вид

$$L=\left(\frac{1}{2}M\left[-E^2\omega^2\cdot\left(\cos(\beta-\delta-\varphi)\right)^2+E^2\left(\dot{\delta}\right)^2+E^2\omega^2+E^2\omega^2-\right.\right.$$
$$-R^2\omega^2\cdot\left(\cos\gamma\right)^2-2E^2\omega\dot{\delta}+R^2\omega^2+2E^2\cos\gamma\cdot\dot{\delta}\omega+$$
$$+2R\sin\gamma\cdot\omega E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\dot{\delta}-2R\sin\gamma\cdot\omega E\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\omega+ \quad (20)$$
$$+E^2(\cos(\gamma))^2\left(\cos(\beta-\delta-\varphi)\right)^2\omega^2+2R\sin\gamma\omega^2E\cos\gamma\cos(\beta-\delta-\varphi)-$$
$$\left.-2E^2\cos\gamma\cdot\omega^2\right]\Big)+\frac{I}{2}\cdot\left(\omega-\dot{\delta}\right)^2-\frac{1}{2}C_{\text{уэ}}\delta^2-MgE\sin\gamma(1-\cos(\beta-\delta-\varphi)).$$

Находим частную производную функции Лагранжа (20) по $\dot{\delta}$:

$$\frac{\partial L}{\partial\dot{\delta}}=M(E^2\dot{\delta}-E^2\omega+2E^2\cos\gamma\cdot\omega+2R\sin\gamma\cdot\omega E\cos(\beta-\delta-\varphi))-I(\omega-\dot{\delta}). \quad (21)$$

Далее ищем производную по времени уравнения (21):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\delta}}\right)=M(E^2\ddot{\delta}-R\sin\gamma\omega E\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot(\omega-\dot{\delta}))+I\ddot{\delta}. \quad (22)$$

Затем определяем частную производную функции Лагранжа (19) по δ:

$$\frac{\partial L}{\partial\delta}=M\left(-\left[E^2\omega^2\cos(\beta-\delta-\varphi)\sin(\beta-\delta-\varphi)\right]+R\sin\gamma\omega E\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot\dot{\delta}-\right.$$
$$-R\sin\gamma\omega^2\cdot E\sin(\beta-\delta-\varphi)+E^2(\cos\gamma)^2\cos(\beta-\delta)\omega^2\sin(\beta-\delta-\varphi)+ \quad (23)$$
$$\left.+R\sin\gamma\omega^2E\cos\gamma\sin(\beta-\delta-\varphi)\right)-C_{\text{уэ}}\delta+MgE\sin\gamma\sin(\beta-\delta-\varphi).$$

Подставляя уравнения (22) и (23) в (12), получаем уравнение установившегося движения системы:

$$M\left[E^2\ddot{\delta}-R\sin\gamma\omega E\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot(\omega-\dot{\delta})\right]+I\ddot{\delta}-$$
$$-M\left(-\left[E^2\omega^2\cos(\beta-\delta-\varphi)\cdot\sin(\beta-\delta-\varphi)\right]+R\sin\gamma\omega E\sin(\beta-\delta-\varphi)\cdot\dot{\delta}-\right.$$
$$-R\sin\gamma\omega^2E\sin(\beta-\delta-\varphi)+E^2(\cos\gamma)^2\cdot\cos(\beta-\delta-\varphi)\omega^2\sin(\beta-\delta-\varphi)+ \quad (24)$$
$$\left.+R\sin\gamma\omega^2E\cos\gamma\sin(\beta-\delta-\varphi)\right)-C_{\text{уэ}}\delta+MgE\sin\gamma\cdot\sin(\beta-\delta-\varphi)=0.$$

В ходе исследований было выполнено решение уравнения (24) с использованием программ, реализующих численные методы решения дифференциальных уравнений. Результаты решений оказались близки к данным, полученным при проведении экспериментов на действующих макетных образцах.

В дальнейшей работе с целью повышения достоверности математического моделирования, реализуемого на основе составленных дифференциальных уравнений движения, рекомендуется проведение углубленных теоретических исследований с целью получения полной (менее упрощенной) картины поведения колебательной системы. Кроме этого, с целью уменьшения уровня помех, вызываемых проявлением нормальных составляющих сил инерции, необходимо уделить серьезное внимание разработке конструкции

упругих элементов, удовлетворяющей условиям применения в колебательных системах устройств, работающих в режиме сферического либо кругового циркуляционного движения.

Список литературы

1. Патент на изобретение РФ № 2270985. Способ и устройство для балансировки ротора / А. Н. Николаев, Б. А. Малев, Л. А. Брякин, М. А. Щербаков, С. В. Кочкин.
2. Патент на изобретение РФ № 2299409. Станок для балансировки роторов / А. Н. Николаев, Б. А. Малев, Л. А. Брякин, М. А. Щербаков, С. В. Кочкин.
3. **Голдстейн, Г.** Классическая механика / Г. Голдстейн. – М. : Гостехиздат, 1957. 408 с.
4. **Маркеев, А. П.** Теоретическая механика : учебник для университетов / А. П. Маркеев. –М. : ЧеРо, 1999. – 569 с.

УДК 621.9.027

В. О. Трилисский, Г. С. Большаков

РАСЧЕТ СИЛ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТА СО СКРУГЛЕННОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

Предложен метод расчета сил резания при обработке инструментом со скругленной режущей кромкой. Получены расчетные зависимости для определения проекций результирующей силы резания. Определено влияние радиуса закругления режущей кромки на численные значения составляющих силы резания и характер их изменения.

Существенная часть выходов из строя сменных многогранных пластин (СМП) режущего инструмента вызвана выкрашиванием и сколами режущей кромки. Разрушение режущей кромки вызвано превышением допустимых значений растягивающих напряжений на передней поверхности СМП. Одним из способов повышения прочности режущего клина является скругление острых кромок СМП. Скругление режущей кромки позволяет изменить направление результирующей силы резания и приблизить его к биссектрисе угла заострения режущего клина. Благодаря этому растягивающие напряжения на передней поверхности СМП уменьшаются или переходят в сжимающие. Однако чрезмерное увеличение радиуса скругления приводит к росту сил и температуры резания. Поэтому актуальной является задача определения рационального радиуса скругления режущей кромки. Для расчета напряжений на передней поверхности СМП и радиуса скруглений кромок СМП, при котором растягивающие напряжения на передней поверхности переходят в сжимающие, необходима методика расчета сил резания для инструмента со скругленной режущей кромкой. Традиционно применяемые и широко известные эмпирические формулы для определения сил резания и табличный метод не позволяют учесть величину радиуса скругления, и поэтому не пригодны для решения этой задачи.

Для расчета сил резания на режущем клине целесообразно выделить три участка, отличающихся физикой протекающих на них процессов контактирования (рис. 1):

– передняя поверхность ($П_П$);

– задняя поверхность ($П_З$);

– переходный радиусный участок ($П_Р$).

Определяя интересующие нас закономерности на каждом участке в отдельности и суммируя результаты, получим единую математическую модель.

При резании округленным режущим клином весь срезаемый слой рассматривается как совокупность трех частей (слоев), для которых отдельно определяются силы резания (рис. 2).

При движении инструмента его скругленный участок *BD* сжимает слой h_1 материала заготовки, в результате чего на задней поверхности инструмента возникает нормальная сила N_1 и сила $F_{тр1}$ трения. Согласно работе [1], толщина этого слоя может быть определена по формуле

$$h_1 = r\left[1 - \frac{1+\mu}{\sqrt{2\left(1+\mu^2\right)}}\right], \qquad (1)$$

где r – радиус скругления режущей кромки; μ – коэффициент трения в окрестности точки D, приблизительно определяется по формуле

$$\mu \approx 80 / HB , \qquad (2)$$

где HB – твердость обрабатываемого материала по Бринеллю.

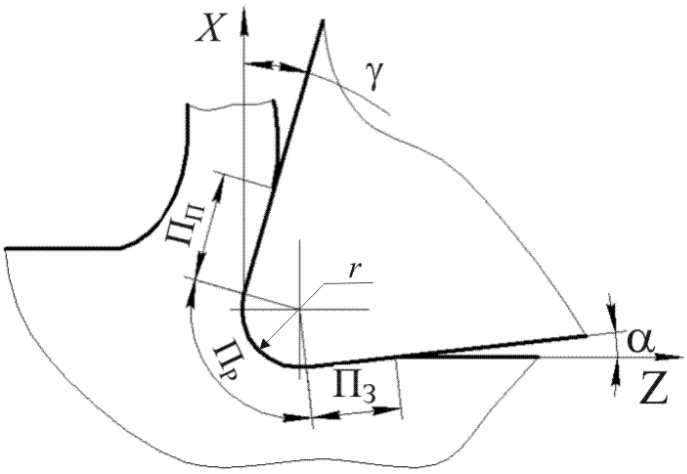


Рис. 1 Участки контакта на поверхности режущего клина

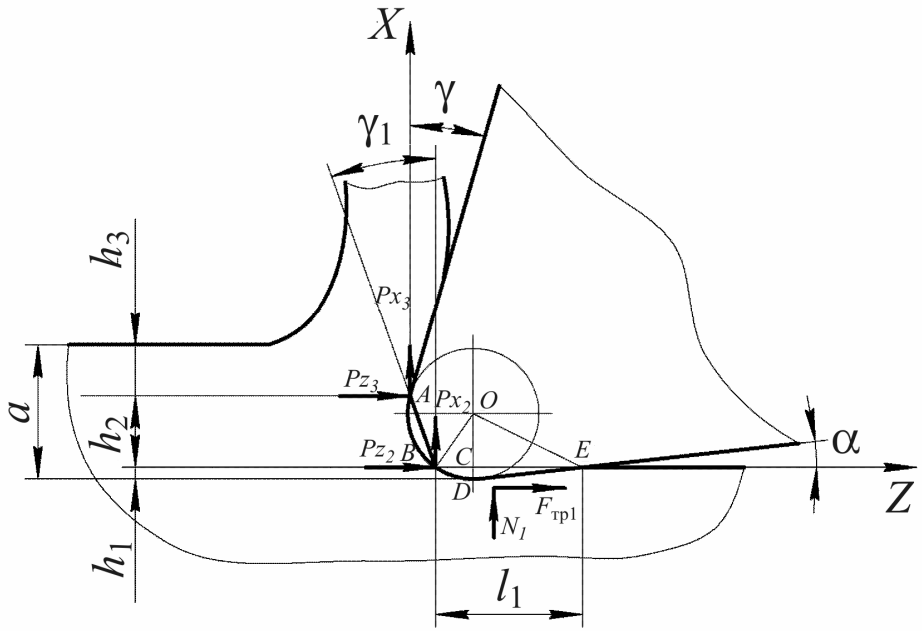


Рис. 2 Схема распределения припуска для инструмента со скругленной режущей кромкой

Для определения силы N_1 воспользуемся зависимостью из работы [2]:

$$N_1 = \frac{2h_1 E}{1-\nu^2}\sqrt{bl_1} , \qquad (3)$$

где E и ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона для обрабатываемого материала; b – ширина срезаемого слоя; l_1 – длина задней поверхности инструмента, контактирующей с обработанной поверхностью:

$$l_1 = BC + CE \approx \sqrt{r^2 - (r - h_1)^2} + h_1 \mathrm{ctg}\alpha\,. \tag{4}$$

Сила трения по задней поверхности равна

$$F_{\text{тр1}} = N_1 \mu\,. \tag{5}$$

Слой толщиной h_2 взаимодействует с радиусным участком инструмента и переходит в стружку, его толщина равна

$$h_2 = r + r\sin\gamma - h_1\,, \tag{6}$$

где γ – передний угол инструмента.

При этом для определения сил резания радиусный участок заменяется касательной фаской AB с передним углом γ_1:

$$\gamma_1 = \arccos\left(\frac{h_2}{AB}\right). \tag{7}$$

Хорда

$$AB = 2r\sin\frac{\pi/2 - \angle BOD + \gamma}{2}, \tag{8}$$

$$\angle BOD = \arccos\left(\frac{r - h_1}{r}\right). \tag{9}$$

На срезаемый слой толщиной h_2 действует сила стружкообразования R_2 (рис. 3). Проекция силы резания на ось Z Pz_2 может быть определена по формуле [3]

$$Pz_2 = \tau\frac{h_2 b}{\sin\beta_1}\frac{\cos\omega_1}{\cos(\omega_1 + \beta_1)}, \tag{10}$$

где τ – касательное напряжение на условной плоскости сдвига, которое можно определить, воспользовавшись зависимостью Н. Н. Зорева [3]:

$$\tau = \frac{0,6\sigma_B}{1 - 1,7\psi_B}, \tag{11}$$

где σ_B – предел прочности; ψ_B – равномерное относительное сужение поперечного сечения образца; ω_1 – угол действия, который равен [3]:

$$\omega_1 = \mathrm{arctg}\left(f_{\text{тр}}\right) + \gamma_1, \tag{12}$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; β_1 – угол сдвига.

Согласно Н. Н. Зореву [3], углы действия и сдвига взаимосвязаны, величина $c = \omega_1 + \beta_1$ постоянна и имеет следующие значения: при резании уг-

леродистых конструкционных сталей с содержанием углерода до 0,15% c = 40º и с содержанием углерода 0,15 – 0,5% c = 46°,

$$\beta_1 = c - \omega_1 . \tag{13}$$

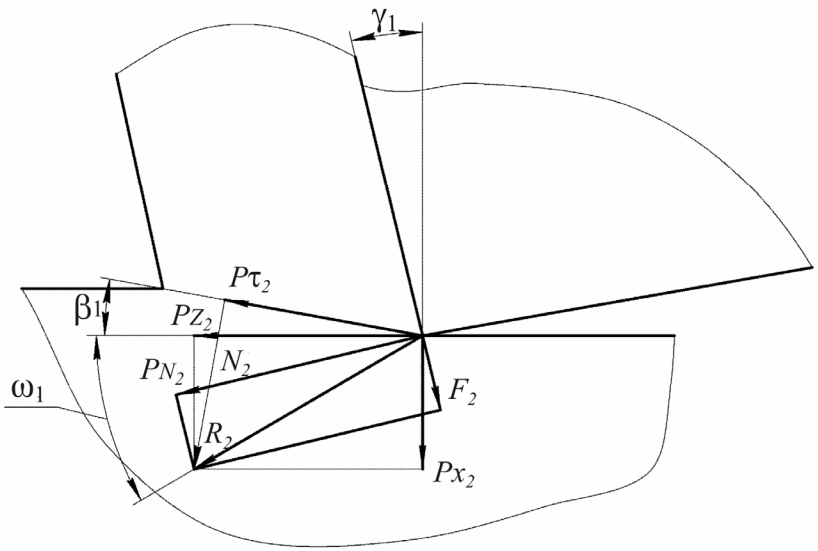


Рис. 3 Схема сил, действующих на радиусной поверхности инструмента

Проекция силы стружкообразования на ось X (рис. 3) Px_2 находится по формуле

$$Px_2 = \tau \frac{h_2 b}{\sin\beta_1} \frac{\sin\omega_1}{\cos(\omega_1 + \beta_1)}. \tag{14}$$

Основной характеристикой процесса контактирования двух поверхностей является коэффициент трения $f_{тр}$, представляющий собой отношение силы трения к нормальной силе. Можно считать, что характер контакта «инструмент–стружка» пластический [4, 5], т.к.:

– твердость инструментального материала, как правило, значительно выше твердости обрабатываемого материала, особенно в связи с разогревом последнего в процессе резания;

– высокие давления и температуры в зоне контакта способствуют внедрению микронеровностей поверхности режущего клина в материал стружки.

Коэффициент трения для пластического контакта [4]:

$$f_{тр} = f_{адг} + f_{мех} , \tag{15}$$

где $f_{адг}$ – адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения; $f_{мех}$ – механическая составляющая коэффициента трения.

Согласно биномиальному закону молекулярного трения [4]:

$$f_{адг} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta_м , \tag{16}$$

где τ_0 – постоянное сдвиговое сопротивление молекулярной связи; $\beta_м$ – пьезокоэффициент молекулярной составляющей коэффициента трения; p_r – фактическое давление, причем для пластического контакта,

$$p_r = k\sigma_т, \tag{17}$$

$\sigma_т$ – предел текучести обрабатываемого материала; k – коэффициент, учитывающий тип контакта, для пластического контакта $k = 3$ [4].

Механическая составляющая коэффициента трения:

$$f_{мех} = 0{,}55k_{\nu f}^{n}\Delta^{\frac{1}{2}}\left(\frac{2p_c}{c\sigma_Т}\right)^{\frac{1}{2\nu}}, \tag{18}$$

где p_c – контурное давление; $\Delta, \nu, k_{\nu f}^{n}$ – характеристики опорной кривой шероховатости. Для поверхностей, подвергнутых чистовой механообработке [4]:

$$\Delta \approx 0{,}01Ra, \tag{19}$$

$$\nu \approx 1{,}5 + 0{,}625Ra, \tag{20}$$

$$k_{\nu f}^{n} \approx 0{,}83 + 0{,}15\nu \approx 1{,}06 + 0{,}094Ra. \tag{21}$$

Контурное давление p_c в случае пластического контакта принимается равным пределу текучести обрабатываемого материала $\sigma_т$ [4].

Слой толщиной h_3 отделяется в стружку под действием плоской части режущего клина с передним углом γ:

$$h_3 = a - r\left(1 + \sin\gamma\right), \tag{22}$$

где a – толщина срезаемого слоя.

Проекция силы резания на ось Z Pz_3 (рис. 4) может быть определена по формуле [3]

$$Pz_3 = \tau\frac{h_3 b}{\sin\beta}\frac{\cos\omega}{\cos(\omega+\beta)}, \tag{23}$$

где ω – угол действия, который равен [3]

$$\omega = \operatorname{arctg}\left(f_{тр}\right) - \gamma, \tag{24}$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения; β – угол сдвига,

$$\beta = 40 - \omega. \tag{25}$$

Проекция силы стружкообразования на ось X Px_3 находится по формуле

$$Px_3 = \tau\frac{h_3 b}{\sin\beta}\frac{\sin\omega}{\cos(\omega+\beta)}. \tag{26}$$

Таким образом, проекции суммарной силы резания на оси *Z* и *X* равны:

$$Pz = F_{тр1} + Pz_2 + Pz_3 ; \quad (27)$$

$$Px = N_1 + Px_2 + Px_3 . \quad (28)$$

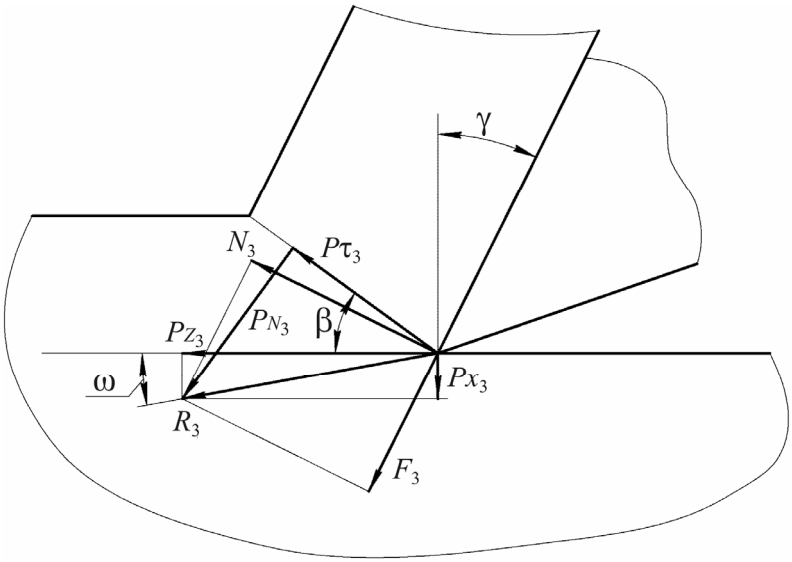


Рис. 4 Схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

Предлагаемая методика позволяет рассчитать силы резания, учитывая геометрические параметры инструмента (радиус скругления режущей кромки, передний и задний углы, шероховатость поверхностей), режимы резания и свойства обрабатываемого материала.

Результаты расчетов по предложенной методике приведены на рисунке 5.

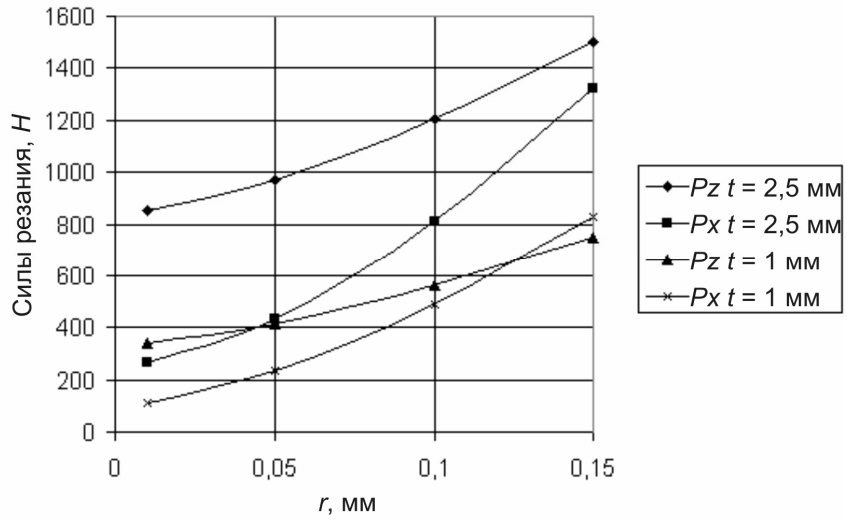


Рис. 5 Зависимость *Pz* и *Px* от радиуса *r* округления режущей кромки СМП

Расчеты выполнены для следующих условий обработки: продольное точение; обрабатываемый материал – Сталь Ст 3; толщина срезаемого слоя – 0,26 мм; ширина срезаемого слоя – 2,5 мм и 1 мм; скорость резания – 48 м/мин; передний угол инструмента – 7°; задний угол инструмента – 8°; угол в плане – 90°; угол наклона режущей кромки – 0°. Как видно из графика, при увеличении радиуса скругления режущей кромки увеличиваются и силы резания, при этом сила *Px* растет значительно быстрее, благодаря чему изменяется угол действия равнодействующей силы резания, и она смещается ближе к биссектрисе угла заострения, что ведет к изменению напряжений в режущем клине. С увеличением радиуса *r* округления режущей кромки растягивающие напряжения на передней поверхности инструмента уменьшаются и далее переходят в сжимающие.

Таким образом, полученная модель резания позволяет численно оценить влияние таких характеристик режущего инструмента, как радиус *r* округления режущей кромки, шероховатость *Ra* рабочих поверхностей на силы резания и может быть использована для определения значения радиуса *r* округления режущей кромки, при котором растягивающие напряжения на передней поверхности инструмента становятся сжимающими.

Список литературы

1. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машгиз, 1962. – 383 с.
2. **Галин, Л. А.** Контактные задачи упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин. – М. : Наука, 1980. – 256 с.
3. **Бобров, В. Ф.** Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
4. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Камбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
5. Трение, изнашивание и смазка : справочник : в 2-х кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, 1978. – 1 кн. – 400 с.
6. **Ящерицен, П. И.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицен [и др.]. – Мн. : Выш. шк., 1990. – 512 с.
7. Развитие науки о резании металлов / под ред. Н. Н. Зорева. – М. : Машиностроение, 1967. – 416 с.

УДК 621.357.7

С. Н. Виноградов, О. К. Метальникова

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО И КОРРОЗИОННО-СТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ СПЛАВОМ НИКЕЛЬ-ХРОМ

Рассматривается процесс электроосаждения износостойкого и коррозионно-стойкого блестящего покрытия сплавом никель-хром. Показано, что для предотвращения окисления ионов хрома (III) до хрома (VI) можно использовать дополнительную анодную ячейку с ионообменной перегородкой. Для поддержания концентрации хрома (III) в заданных пределах электролит периодически корректируется хромокалиевыми квасцами. С целью повышения буферных свойств электролита и увеличения pH гидратообразования хрома (III) в электролит вводят сульфат аммония.

В современном приборостроении и машиностроении большое внимание уделяется созданию и внедрению в производство новых прогрессивных технологий гальванопокрытий, обеспечивающих повышение твердости, износостойкости и коррозионной стойкости, снижение экологической опасности электролитов.

Экологическая опасность гальванического производства и, в частности, электролитов хромирования на основе хрома (VI) приводит к необходимости создания электролитов на основе хрома (III), качество покрытия из которых не хуже, чем покрытия из электролитов на основе хрома (VI).

Предварительные исследования показали, что блестящие покрытия сплавом никель-хром осаждаются из аммиачно-гликоколевого электролита.

Исследование комплексообразования никеля и хрома

Наличие в электролите двух лигандов может привести к образованию разнолигандных комплексов никеля и хрома (III), что в значительной степени может изменить кинетику и механизм разряда ионов на катоде.

Никель образует достаточно устойчивый комплекс с аммиаком с координационным числом, равным 4, типа $[Ni(NH_3)_4]^{2+}$, константа нестойкости которого равна $1,2 \cdot 10^{-8}$ [1, 2]. При большом избытке аммиака ($pH > 9,5$) возможно образование комплекса с координационным числом, равным 6. В слабокислой среде при pH 4,5 образование аммиачного комплекса протекает медленнее и при значительном избытке ионов аммония.

На рисунке 1 представлены кривые спектра поглощения сульфата никеля при pH 4,5 и раствора никеля в присутствии восьмикратного избытка ионов аммония. Как видно из графика, при длине волны 660 нм наблюдается увеличение плотности раствора. В растворе присутствуют в основном комплекс диакводиамминоникеля $[Ni(H_2O)_2(NH_4)_2]^{2+}$ и в незначительных количествах комплекс типа тетрамминоникеля $[Ni(NH_4)_4]^{2+}$.

При введении в аммиачный комплекс никеля аминоуксусной кислоты (АУК) максимум светопоглощения увеличивается, что указывает на образование смешанного амминоаминоуксусного комплекса типа $[Ni(NH_4)_2(АУК)]$. С увеличением соотношения аминоуксусной кислоты и аквааммичного ком-

плекса никеля максимум светопоглощения при $\lambda = 650$ нм увеличивается (рис. 1), что свидетельствует о внедрении во внутреннюю сферу комплекса соединения второй молекулы аминоуксусной кислоты с образованием диаминодиаминоацетатного комплекса никеля состава $[Ni(NH_4)_2(АУК)_2]^2$.

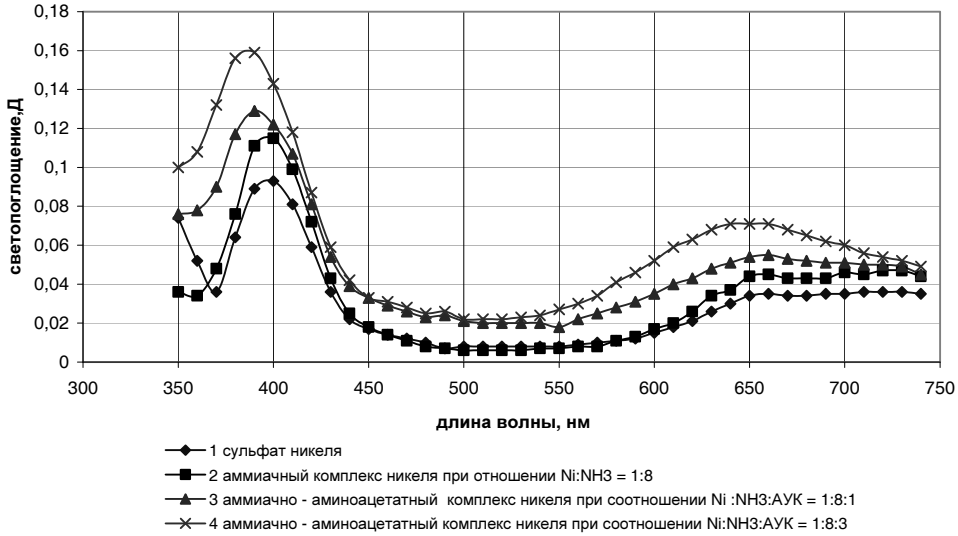


Рис. 1 Кривые светопоглощения растворов никеля

Хром (III) также образует комплексные соединения с аммиаком и гликоколем (рис. 2) [3]. Однако процесс образования идет очень медленно. В этом случае также происходит медленное образование разнолигандного аммиачногликоколевого комплекса, и только после выдержки раствора при температуре 90–95°С в течение 30 минут происходит завершение образования разнолигандного комплекса.

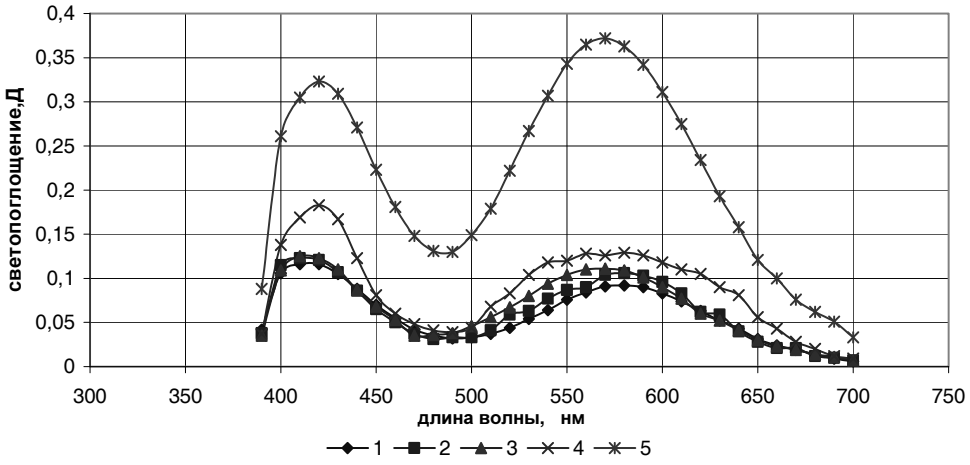


Рис. 2 Кривые светопоглощения растворов сульфата хрома (III) (1) и аммиачно-аминоацетатных комплексов хрома (III) (2–5). Время выдержки до измерения (час): 2 – 0,5 при t = 20°С; 3 – 24 при t = 20°С; 4 – 72 при t = 20°С; 5 – 0,5 при t = 90–95°С

Таким образом, в растворе электролита для осаждения сплава никель-хром ионы никеля и хрома (III) находятся в виде разнолигандных гликоколевоаммиачных комплексов.

Стабилизация электролита для осаждения сплава никель-хром

При электроосаждении сплава в кислом и слабокислом электролите на электродах протекают следующие реакции.

На катоде протекают реакции:

$Ni^{2+} + 2e = Ni$, $E^0 = -0{,}23$ В (1)

$[Ni(NH_3)_4]^{2+} + 2e = Ni + 4NH_3$, $E^0 = -0{,}49$ В (2)

$2H^+ + 2e = H_2$, $E^0 = 0{,}00$ В (3)

$Cr^{3+} + e = Cr^{2+}$, $E^0 = -0{,}41$ В (4)

$Cr^{3+} + 3e = Cr$, $E^0 = -0{,}74$ В (5)

$Cr^{2+} + 2e = Cr$, $E^0 = -0{,}91$ В (6)

Как видно из уравнений, на катоде может осаждаться сплав никель-хром по реакциям (1), (2), (5), (6). Вследствие высокой поляризации разряда никеля его потенциал легко достигает потенциала выделения хрома по реакции (5).

На свинцовом аноде в кислой среде протекают реакции:

$2H_2O = O_2\uparrow + 4H^+ + 4e$, $E^0 = +1{,}22$ В (7)

$2Cr^{3+} + 7H_2O = Cr_2O_7 + 14H^+ + 6e$, $E^0 = +1{,}33$ В (8)

Кислород на свинцовом электроде выделяется со значительным перенапряжением, которое при плотности тока 0,01 А/см^2 составляет $\eta_{O_2} = 1{,}19$ В, поэтому потенциал электрода превышает потенциал окисления хрома (III) до хрома (VI), и на аноде может протекать реакция (8), т.е. реакция окисления хрома (III). Кроме того, хром (III) в растворе будет окисляться выделяющимся на аноде кислородом.

Таким образом, в процессе электролиза электролит будет обогащаться хромом (VI), что скажется на качестве покрытия, составе сплава и скорости его осаждения.

Для предотвращения окисления хрома (III) до хрома (VI) в процессе электроосаждения анодное пространство отделили от катодного ионообменной перегородкой. В качестве ионообменной перегородки использовали анионообменную мембрану МА-40. Эта мембрана не пропускает из катодного пространства в анодное ионы никеля и хрома (III), поэтому окисления хрома (III) на аноде не будет (рис. 3).

В случае применения анионообменной мембраны в катодном пространстве находится электролит, содержащий гликоколево-аммиакатные комплексы никеля и хрома (III), в анодном пространстве находится серная кислота концентрации 30–50 г/л.

Из катодного пространства в анодное могут переходить анионы, в частности анионы SO_4^{2-}, а катионы никеля и хрома (III) переходить не будут. На катоде будут протекать реакции (1)–(5), на аноде – реакция (7).

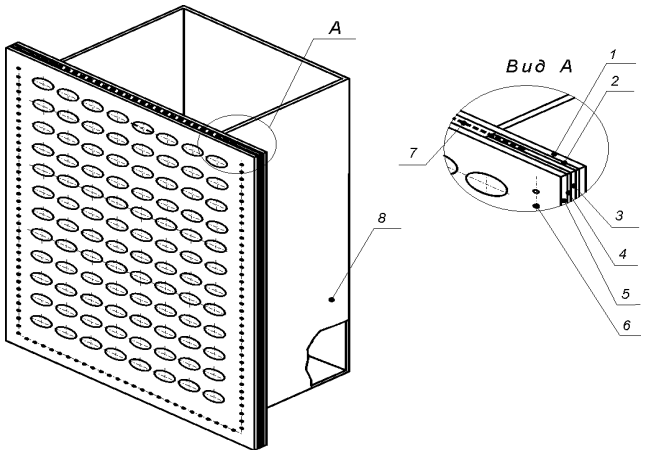


Рис. 3 Электрохимическая ячейка с анионообменной мембраной:
1, 5 – винипластовая, перфорированная перегородка; 2, 3, 4 – резиновые прокладки;
7 – анионообменная мембрана; 8 – корпус ячейки

В процессе электролиза катодный электролит будет обедняться ионами никеля и хрома (III), и для поддержания постоянства состава электролит приходится систематически корректировать по ионам никеля и хрома (III).

Анодное пространство будет обогащаться серной кислотой за счет перехода из катодного пространства анионов SO_4^{2-}. При этом электролит катодного пространства будет постепенно защелачиваться за счет реакции (3), поэтому периодически необходимо корректировать pH катодного электролита. Из анодного пространства периодически необходимо выводить серную кислоту вследствие ее накопления и корректировать ей pH катодного электролита.

Эти недостатки частично можно устранить, применив два анода: свинцовый – в анодном пространстве с ионообменной мембраной и растворимый никелевый анод – в электролите (рис. 4).

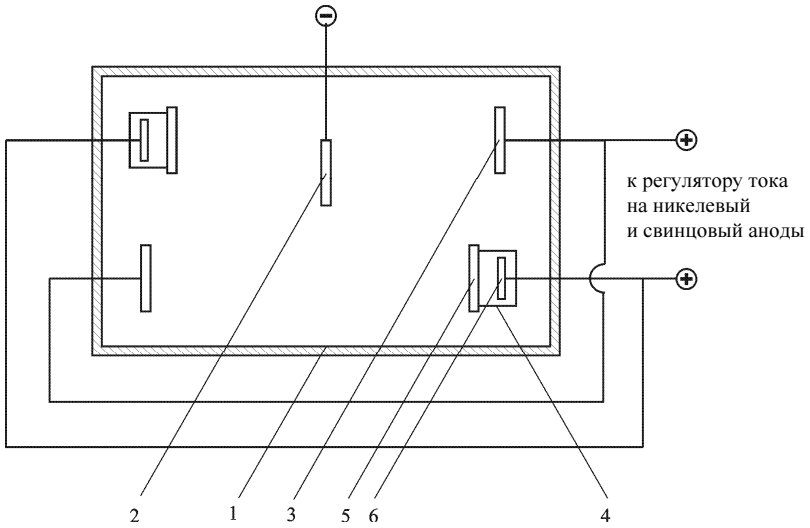


Рис. 4 Схема электроосаждения сплава никель-хром: 1 – гальваническая ванна;
2 – катод; 3 – никелевый анод; 4 – дополнительная анодная ячейка;
5 – ионитовая мембрана МА-40; 6 – аноды из нержавеющей стали или свинца

Ток от источника постоянного тока через делитель подается раздельно на свинцовый и никелевый анод. На свинцовом аноде протекает реакция (7), а на никелевом аноде реакция растворения анода

$$Ni = Ni^{2+} + 2e. \quad (9)$$

Плотность тока на никелевом аноде должна быть ниже величины, при которой потенциал анода достигает потенциала реакции (8) –окисления хрома (III) до хрома (VI).

Как видно из рисунка 5, при плотности тока приблизительно 2 А/дм^2 имеется площадка предельного тока, вызванная предельным током диффузии ионов никеля, и при потенциале от +0,5 В до +0,8 В протекает процесс растворения никеля и выделения кислорода. Однако скорость растворения никеля превышает скорость выделения кислорода, т.к. выход по току растворения никеля составляет около 80%. При потенциале +0,8 В и плотности тока 5 А/дм^2 наступает пассивация анода и ток резко снижается. Стабильное растворение никелевого анода может протекать до Е = +0,6 В, т.е. до плотности тока 3 А/дм^2. Рабочую плотность тока растворения никелевого анода необходимо поддерживать до 2 А/дм^2.

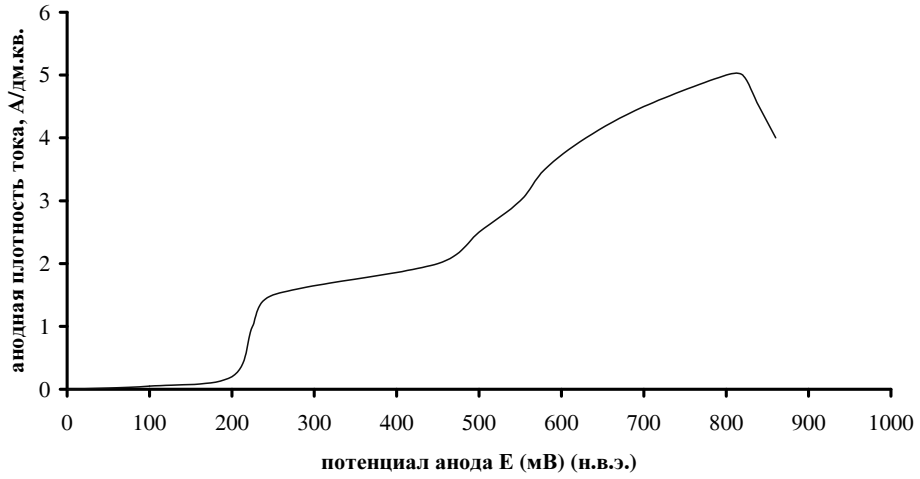


Рис. 5 Потенциодинамическая анодная поляризационная кривая никеля в электролите никелирования

Падение напряжения в системе катод – свинцовый анод равно сумме потенциала реакции (7), перенапряжения выделения кислорода, падения напряжения на анионообменной мембране, падения напряжения в электролите и потенциала катода

$$E_{\text{сист1}} = E_{O_2} + \eta_{O_2} + E_{\text{а.м}} + E_{\text{эл}} + E_{\text{кат}}\,. \quad (10)$$

Падение напряжения в системе катод – никелевый анод равен сумме потенциала никелевого анода, падения напряжения в электролите и потенциала катода

$$E_{\text{сист1}} = E_{\text{Ni, а}} + E_{\text{эл}} + E_{\text{кат}}\,. \quad (11)$$

В уравнениях (10) и (11) не учитываются падение напряжения на анодах и в контактах, т.к. они примерно равны в обеих системах.

Соотношение токов на свинцовом и никелевом анодах с учетом электрохимических эквивалентов, выхода сплава по току и содержания хрома в сплаве должно быть следующим:

– общий ток в ванне равен:

$$I_{\text{об}} = I_{\text{спл}} + I_{\text{H}_2} = I_{\text{Ni}} + I_{\text{Pb}},$$

где $I_{\text{спл}}$ – ток, идущий на осаждение сплава, $I_{\text{спл}} = 0,2\, I_{\text{об}}$; I_{H_2} – ток, идущий на выделение водорода, $I_{\text{H}_2} = 0,8\, I_{\text{об}}$; I_{Ni} – ток, идущий на никелевый анод, в относительных единицах:

$$I_{\text{Ni}} = \frac{m_{\text{Ni}}}{K_{\text{Ni}}} = \frac{0,85}{1,095} = 0,776 \approx 0,75;$$

I_{Pb} – ток, идущий на свинцовый анод для осаждения хрома и никеля на катоде, в относительных единицах:

$$I_{\text{Pb}} = \frac{m_{\text{Cr}}}{K_{\text{Cr}}} = \frac{0,15}{0,647} = 0,23 \approx 0,25,$$

где K_{Ni} и K_{Cr} – электрохимические эквиваленты никеля и хрома (III);

$$I_{\text{об}} = 0,2 \cdot 0,75\, I_{\text{об}} + 0,2 \cdot 0,25\, I_{\text{об}} + 0,8\, I_{\text{об}} = 0,15 I_{\text{об}} + 0,05\, I_{\text{об}} + 0,8\, I_{\text{об}}.$$

Общий ток на анодах делится пропорционально выделению никеля, хрома и водорода.

На свинцовый анод подается ток:

$$I_{\text{Pb}} = 0,05\, I_{\text{об}} + 0,8\, I_{\text{об}} = 0,85 I_{\text{об}}.$$

На никелевый анод подается ток:

$$I_{\text{Ni}} = 0,15 I_{\text{об}}.$$

К никелевому аноду и к свинцовому аноду, находящемуся в анодной ячейке, подается ток от анодной клеммы источника тока через делитель.

Электроосаждение вели из электролита состава (г/л): сульфат никеля – 80; хлорид никеля – 20; хромокалиевые квасцы – 40; аминоуксусная кислота – 220; сульфат аммония – 200; борная кислота – 30; 2-бутиндиол-1,4 – 0,3; сахарин – 1,5.

В интервале pH от 4,0 до 5,0 при температуре 60°С, плотности тока 4,0–6,0 А/дм^2 и концентрации хрома (III) 35–45 г/л осаждаются блестящие покрытия сплавом с содержанием хрома 17%. При pH ниже 3,5 и выше 5,5 осаждаются менее блестящие покрытия, что связано с режимом осаждения никеля.

Для оптимизации технологического процесса электроосаждения сплава было получено многофакторное уравнение, которое устанавливает зависимость критерия оптимизации с входными параметрами, влияющими на процесс [4].

Для сплава никель-хром критерием оптимизации является содержание хрома в сплаве, а входными параметрами – концентрация хрома (III) в электролите, плотность тока, температура и pH электролита.

Уравнение регрессии, адекватно описывающее влияние технологических факторов на состав сплава никель-хром, имеет вид

$$y = 10,86 + 1,46x_1 + 0,81x_2 + 1,34x_3 + 1,54x_4 + 0,11x_1x_2 + \\ + 0,11x_1x_3 - 0,11x_1x_2x_3 - 0,11x_1x_2x_4 + 0,11x_1x_2x_3x_4. \quad (12)$$

Как видно из уравнения, на состав сплава в значительной степени оказывают влияние единичные факторы: концентрация хрома (III) в электролите, плотность тока, температура и pH электролита. В меньшей степени оказывают влияние факторы взаимодействия: концентрация хрома (III) в электролите – плотность тока, температура – pH электролита, концентрация хрома в электролите – плотность тока – температура, концентрация хрома (III) в электролите – плотность тока – pH электролита. Такое влияние факторов на состав покрытия позволяет в процессе электроосаждения поддерживать состав сплава в заданных пределах путем изменения режима осаждения, не прибегая к корректированию электролита солями хрома (III).

Свойства электролитического сплава никель-хром

Исследование физико-механических и защитных свойств покрытия сплавом никель-хром проводили на образцах, полученных из разработанного электролита. Гальванические покрытия сплавом, осажденным при оптимальных режимах осаждения, полублестящие и блестящие белого цвета содержат 15–20% хрома.

Легирование никеля хромом значительно повышает твердость и износостойкость покрытия. На повышение твердости оказывает влияние дефектность кристаллического строения вещества, а также процентное содержание хрома.

Так, при нагрузке на пирамидку 50 г микротвердость составляет (таблица 1) для никеля и сплава никель-хром соответственно 4,5 и 4,95 ГПа. Повышение микротвердости вызвано внедрением в кристаллическую решетку никеля атомов хрома.

Необходимо отметить, что внутренние напряжения у покрытий сплавом значительно ниже, чем у чистого никеля. Это связано с меньшей наводороживаемостью покрытия сплавом никель-хром по сравнению с чистым никелем. Гальванические покрытия с меньшими значениями внутренних напряжений менее склонны к образованию микротрещин и отслаиванию покрытия от основы.

Легирование никеля хромом приводит к увеличению износостойкости покрытия более чем в 14 раз. Коррозионные испытания, проведенные в камере влаги в течение 56 суток и камере соляного тумана в течение 7 суток, показали, что после климатических испытаний внешний вид покрытий на образцах со сплавом никель-хром практически не изменился, а никелевое покрытие немного потускнело. После испытания в камере соляного тумана на никелевом покрытии появились незначительные очаги коррозии.

Таким образом, оптимальными режимами электролиза для получения блестящих покрытий сплавом никель-хром являются: плотность тока 4,0–

6,0 А/дм^2, температура 40–60°С, pH 4,0–5,0. Гальванические покрытия сплавом, осажденные при оптимальных режимах осаждения, содержат 15–20% хрома.

Таблица 1

Структурные и физико-механические свойства

	никель	никель-хром
Внешний вид	блестящий	полублестящий
Микротвердость, ГПа, при нагрузке на пирамидку P = 50 г.	4,5	4,95
Износостойкость при нагрузке на контакт 200 г/мм^2, количество переключений	10 000	148 000
Внутренние напряжения, МПа	320	120
Коррозионная стойкость:		
а) камера влаги (t = 40°С, влажность 95–98%), 56 суток	потемнение	изменений нет
б) камера соляного тумана (t = 270°С), 7 суток	очаги коррозии	изменений нет
Микроструктура	ГЦК	ОЦК
Структура покрытия	мелкозернистая	мелкозернистая с преобладанием частиц округлой формы

Список литературы

1. **Лурье, Ю. Ю.** Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. – М. : Химия, 1965. – 350 с.
2. **Ящимирский, К. Б.** Константы нестойкости комплексных соединений / К. Б. Ящимирский, В. П. Васильев. – М. : АН СССР, 1959. – 306 с.
3. Патент 2139368 РФ. Способ электрохимического нанесения хромовых покрытий на металлы и сплавы / Виноградов С. С., Кудрявцев В. Н., Ярлыков М. М., Шахамайер С. Б.
4. **Ахназарова, С. Л.** Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М. : Высшая школа. – 1978. – 319 с.

УДК 621.357:669.715

В. Н. Малышев

ОЦЕНКА УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МИКРОДУГОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Проведенные исследования влияния микродуговой обработки алюминиевых сплавов на их механические характеристики показали существенное повышение прочностных характеристик (в первую очередь модуля упругости) в области упругого деформирования. Результаты статических и динамических тестов подтвердили эффект упрочнения алюминиевых сплавов МДО-обработкой.

Введение

Оценка физико-механических свойств покрытий, сформированных микродуговым оксидированием, является необходимым и важным этапом исследования их характеристик, т.к. физико-механические свойства материала являются, как правило, определяющими при выборе его для тех или иных условий эксплуатации. В частности для оценки износостойкости и других триботехнических характеристик знание уровня физико-механических свойств покрытий позволяет, используя существующие зависимости между физико-механическими свойствами и износостойкостью [1, 2], прогнозировать работоспособность трущегося сопряжения в зависимости от внешних условий нагружения.

При микродуговом оксидировании (МДО) происходят сложные процессы окисления поверхностного слоя металла с образованием плотного, прочного покрытия. Высокий уровень механических свойств формирующихся покрытий в первую очередь обусловлен образованием в процессе МДО высокотемпературной модификации окиси алюминия α -Al_2O_3.

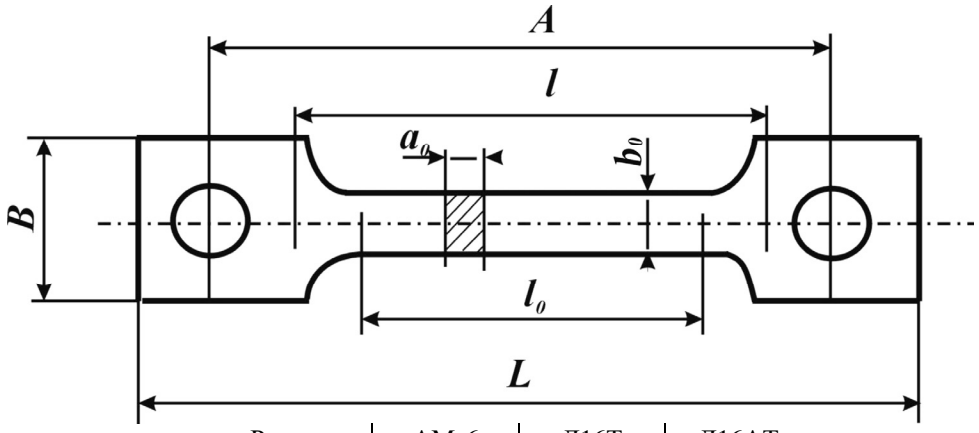
Изучение основных физико-механических характеристик МДО-покрытий (модуля упругости, пределов прочности и текучести, степени пористости и рыхлости и т.д.) с использованием обычных методов определения этих характеристик осложняется тем, что выделение в чистом виде участка покрытия в объеме, достаточном для проведения механических испытаний традиционными методами на растяжение или сжатие хотя бы на микрообразцах, является исключительно трудной задачей. С другой стороны, свойства покрытия, отделенного от подложки, в особенности его прочностные характеристики, будут значительно отличаться от свойств, определенных в условиях, когда покрытие с подложкой составляют единое целое.

В связи с этим основная оценка физико-механических характеристик покрытий, сформированных методом МДО, была осуществлена ранее методом кинетической микротвердости [3, 4].

Тем не менее испытания алюминиевых сплавов со сформированным на их поверхности МДО-покрытием традиционным способом на статический разрыв образцов позволяют получить информацию о степени упрочнения материала и проследить кинетику изменения механических характеристик от прикладываемого разрывного усилия.

Цель исследования. Оценить эффект упрочнения алюминиевых сплавов, обработанных методом микродугового оксидирования, используя традиционные методы испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и т.п.

Материалы и методика эксперимента. Исследования проводили на сплавах алюминия Д16, Д16АТ и АМг6 [5–8]. Плоские образцы стандартной формы (рис. 1) вырезались из листов толщиной 3 и 1,5 мм соответственно. Анодно-катодную обработку микродуговым методом проводили на конденсаторном источнике питания в слабощелочном электролите при плотности анодного тока ≈ 10 А/дм^2 и соотношении I_k/I_a = 0,95. При этом получали несколько серий образцов (по 6–7 образцов в каждой серии), отличающихся по толщине сформированного покрытия. Кроме того, для выявления характера влияния покрытия на прочностные характеристики алюминиевых сплавов часть образцов покрывали наполовину рабочей длины *l*.



Размеры	АМг6	Д16Т	Д16АТ
b_0, мм	3	3	20
l_0, мм	45	60	150
A, мм	60	75	210
B, мм	15	15	75
L, мм	75	90	250

Рис. 1 Вид и размеры образцов стандартной формы для испытаний на статическое растяжение (АМг6, Д16Т) и циклическое растяжение-сжатие (Д16АТ)

Испытания при статических нагрузках осуществляли растяжением образцов на установке ИМАШ «АЛА-ТОО» при скорости нагружения 4 мм/мин и постоянной нагрузке. Запись диаграмм растяжения проводили на двухкоординатном самописце Н306.

Для динамических испытаний использовали образцы, вырезанные из алюминиевого сплава Д16АТ по размерам, указанным на рисунке 1, с последующей обработкой методом МДО и симметричным нагружением их растяжением-сжатием. Для сравнения результатов испытаний использовали такие же образцы без обработки МДО, но с концентраторами напряжений в виде отверстий под болтовые соединения, а также при наличии фреттинг-коррозии.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 2 приведены типичные диаграммы растяжения образцов, а на рисунке 3 – характерные кривые зависи-

мости напряжения σ от относительной деформации ε, построенные по диаграммам растяжения. Обработка результатов испытаний показала, что влияние МДО-покрытия на прочностные характеристики алюминиевых сплавов проявляется двояко. В таблице 1 приведены основные механические характеристики алюминиевых сплавов, упрочненных методом МДО, в сравнении с неупрочненными.

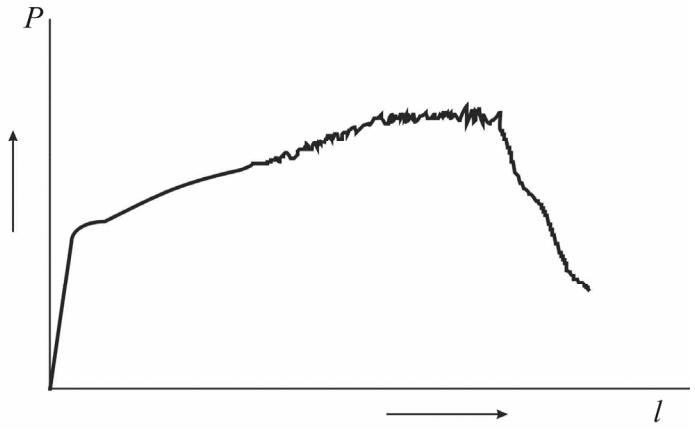


Рис. 2 Типичная диаграмма растяжения образцов с МДО-покрытием

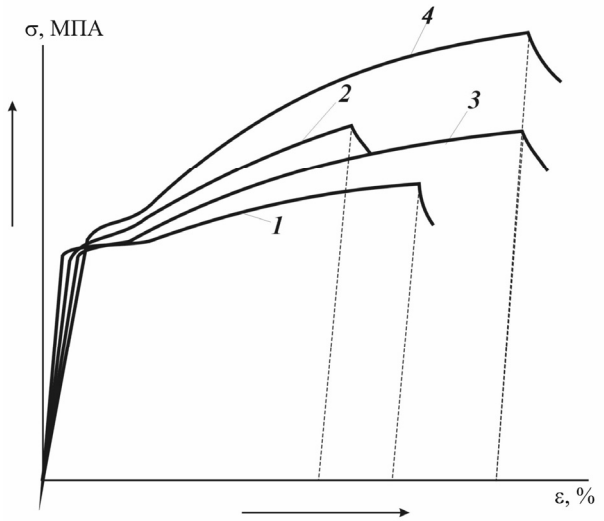


Рис. 3 Характерные кривые напряжение–деформация для алюминиевых сплавов с МДО-покрытием: 1 – образцы с покрытием толщиной 240 мкм; 2 – образцы с покрытием толщиной 240 мкм, сформированным на половине рабочей длины образцов; 3 – образцы с покрытием толщиной 120 мкм; 4 – образцы неупрочненного сплава алюминия

В области упругого деформирования наблюдается эффект упрочнения. Здесь модуль Юнга возрастает до значений E = 110–220 ГПа (относительно исходного модуля упругости алюминиевых сплавов E = 65–71 ГПа) и приближается к модулю упругости самого материала покрытия (E = 120–290 ГПа), определенного из испытаний по методу кинетической микротвердости [4].

Таблица 1

Механические характеристики алюминиевых сплавов, упрочненных методом МДО, при статическом испытании растяжением

№ п/п	Характеристика образцов		Исходные данные				Механические характеристики				
			a_0, мм	b_0, мм	l_0, мм	F_0, мм^2	σ_b, МПа	σ_y, МПа	$\sigma_т$, МПа	E, ГПа	δ, %
1	Упрочнение МДО на толщину λ = 240 мкм на длину l	АМг6	1,46	3,41	33,6	5,01	193,8	117,8	125,7	229	11,8
		Д16Т	3,3	3,3	45,0	10,9	399	297	329	112	8,84
2	Упрочнение МДО на толщину λ = 240 мкм на длину $l/2$	АМг6	1,45	3,23	35,9	4,74	201,1	117,5	126,5	120	8,9
		Д16Т	3,3	3,3	45,0	10,9	413	306	336	89	7,85
3	Упрочнение МДО на толщину λ = 120 мкм на длину l	АМг6	1,40	3,3	33,6	4,55	237,7	140	146,6	212	14,5
		Д16Т	3,2	3,2	45,0	10,3	379	279	303	100	10,6
4	Неупрочненные сплавы	АМг6	1,3	3,23	34,1	4,18	305,4	142,1	157,9	62,6	17,2
		Д16Т	3,15	3,2	45,0	10,1	455	322	374	65,7	9,7

Материал упрочненного слоя начинает разрушаться в зоне между пределами упругости (σ_y или $\sigma_п$) и текучести ($\sigma_т$ или σ_{02}). Затем нагрузка прикладывается к основному материалу. При этом сопротивление материала уменьшается. Характерно, что упрочняющий эффект имеет место до появления первой трещины, которая отмечается в области предела упругости (рис. 4). Визуальное наблюдение в микроскоп в процессе растяжения образцов позволяло фиксировать момент образования первых трещин. После нарушения сплошности покрытия наблюдается повышенная, по сравнению с исходным материалом, пластическая деформация.

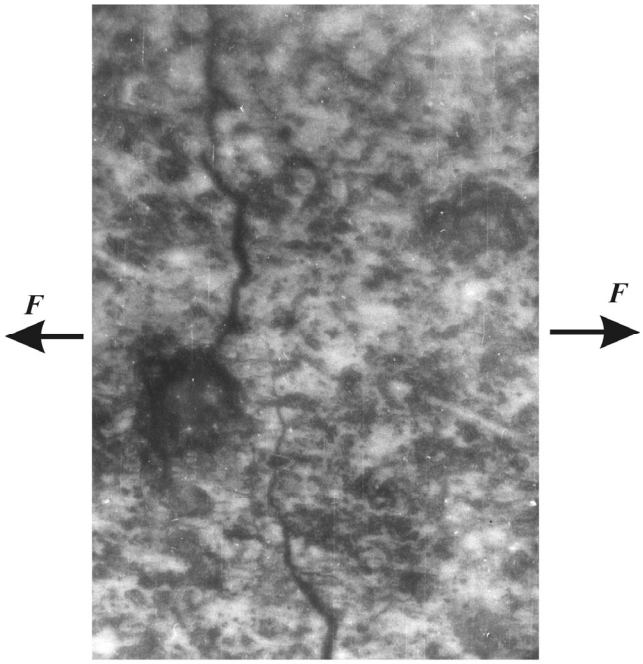


Рис. 4 Характерный вид первой трещины, появляющейся при деформации растяжением МДО-покрытий в диапазоне нагрузок выше области упругости

Как и следовало ожидать, поведение образцов, обработанных наполовину рабочей длины, при растяжении имеет нестабильный характер. Разрушение их происходило чаще по границе обработанной и необработанной поверхностей, однако наблюдались разрушения и в других сечениях. Поэтому сечение по границе обработанной и необработанной поверхностей однозначно нельзя считать концентратором напряжений.

Повышение модуля Юнга для образцов с покрытием сопровождается некоторым снижением их предела упругости, однако это не должно препятствовать применению этих покрытий в конструкциях, испытывающих растяжение, изгиб, сжатие и т.п., поскольку напряжения, возникающие в процессе их работы, значительно ниже предела упругости.

Расположение кривых в области пластического деформирования (рис. 3) явно указывает на разупрочнение алюминиевого сплава, тем большее, чем большей толщины сформировано покрытие. Это объясняется, очевидно, тем, что с ростом толщины уменьшается площадь поперечного сечения алюминиевого сплава, поскольку покрытие при микродуговом оксидировании на

60–90% формируется в глубь материала. При разрушении покрытия и нарушении его сплошности оно уже не оказывает сопротивления деформации растяжения. Аналогичные результаты были получены авторами [9] и на более крупных образцах, при других нагрузках, что подтверждает отсутствие проявления масштабного эффекта. Влияние МДО-обработки сказывается и на пластических характеристиках алюминиевых сплавов, а именно на относительном удлинении δ, которое уменьшается с ростом толщины покрытия.

При проведении усталостных испытаний образцов с покрытиями, сформированными на сплаве Д16АТ, в условиях симметричного нагружения растяжением-сжатием (при изгибе с защемленным концом) получены данные (рис. 5), показывающие повышение пределов выносливости примерно на 20% относительно образцов с концентраторами напряжений (отверстия под болтовое соединение) и при наличии фреттинг-коррозии, и примерно на такую же величину понижение относительно исходных образцов, но без концентраторов напряжений. То есть микродуговая обработка, даже при некотором уменьшении сечения образца, что является, по-видимому, одной из причин более низкой усталостной прочности, в отличие от необработанных образцов, обеспечивает повышение прочности при циклических нагрузках, по сравнению с образцами, имеющими концентраторы напряжений.

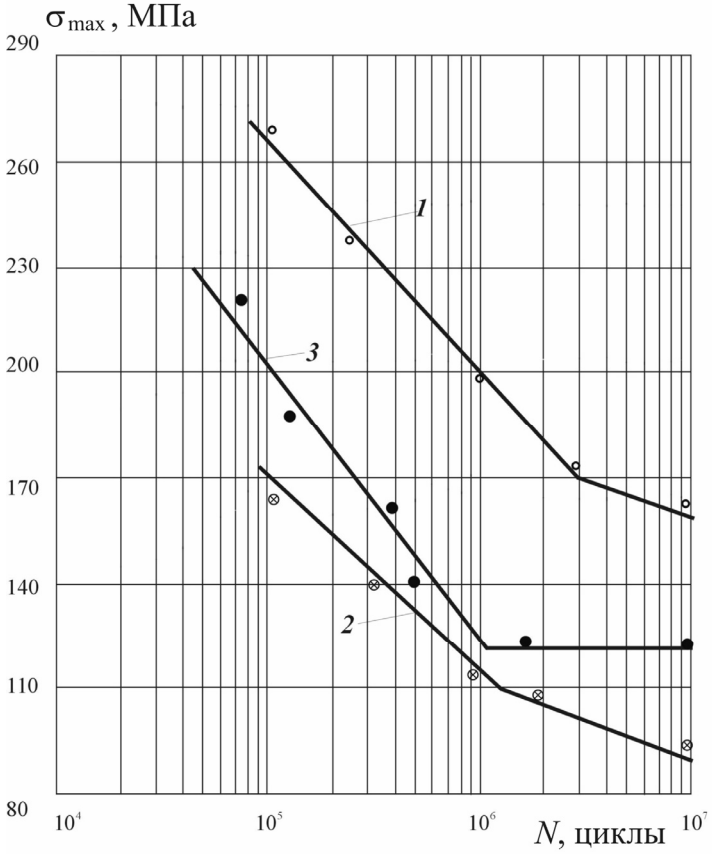


Рис. 5 Кривые усталости при растяжении–сжатии с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0$: 1 – исходного сплава Д16АТ; 2 – сплава Д16АТ при наличии фреттинг-коррозии; 3 – сплава Д16АТ, упрочненного методом МДО

Заключение

Таким образом, наличие эффекта упрочнения алюминиевых сплавов при их обработке микродуговым оксидированием позволяет использовать метод анодно-катодного МДО как эффективное средство упрочнения различных изделий из алюминиевых сплавов.

Список литературы

1. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, В. С. Камбалов, М. Н. Добычин. – М. : Машиностроение, 1980. – 450 с.
2. **Сорокин, Г. М.** Аналитические критерии оценки износостойкости материалов / Г. М. Сорокин // Заводская лаборатория. – 1994. – № 9. – С. 42–48.
3. **Булычев, С. И**. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
4. **Малышев, В. Н.** Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / В. Н. Малышев, С. И. Булычев, Г. А. Марков [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 1. – С. 82-87.
5. **Малышев, В. Н.** Влияние анодно-катодной микродуговой обработки на механические характеристики алюминиевых сплавов / В. Н. Малышев, Н. В. Малышева // Анод-88 : тезисы докл. научно-технического семинара. – Казань, 1988. – С. 88–89.
6. **Малышев, В. Н.** Исследование структуры и износостойкости покрытий, формируемых методом анодно-катодного микродугового оксидирования / В. Н. Малышев // Анод-88 : тезисы докл. научно-технического семинара. – Казань, 1988. – С. 82–83.
7. **Малышев, В. Н.** Упрочнение деталей узлов трения формированием покрытий анодно-катодным микродуговым методом / В. Н. Малышев, М. В. Голуб, В. И. Струнец // Проблемы современной триботехнологии : тезисы докл. ВНТК. – Николаев, 1988. – С. 16–17.
8. **Малышев, В. Н.** Повышение долговечности соединений при циклических нагрузках / В. Н. Малышев, В. И. Драган // Тез. докл. научно-технической конференции БрПИ. – Брест, 1991. – С. 36.
9. **Александров, В. С.** Влияние поверхностной обработки сплава Д16 методом микродугового оксидирования на его прочностные характеристики при статическом нагружении / В. С. Александров, А. Г. Кан, Н. Абдельбаки, В. А. Федоров // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1988. – № 9. – С. 27–28.

УДК 621.793.6:669.056.9

И. А. Казанцев, А. Е. Розен, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ, ФОРМИРУЕМЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ

Рассматривается механизм формирования покрытий микродуговым оксидированием. Даны подробные сведения о влиянии химического состава электролита на коррозионную стойкость покрытий. Представлены данные о коррозионной стойкости защитных покрытий на изделиях специального назначения.

Алюминий и его сплавы, отличаясь многими ценными технологическими и эксплуатационными качествами (малая плотность, высокие тепло- и электропроводность), занимают особое место среди применяемых в промышленности материалов. Научно-технический прогресс способствует расширению областей их использования, особенно с нанесенными на них оксидными покрытиями, благодаря чему успешно решается вопрос защиты изделий от коррозии, механического износа, нежелательного воздействия внешних тепловых потоков, их декоративной отделки. Ядерная физика, авиация, космическая техника, судостроение и автомобилестроение, архитектура, строительство, медицина, производство товаров массового спроса – вот далеко не полный перечень областей применения продукции из алюминиевых сплавов с оксидным покрытием, полученных как традиционным анодированием, так и по технологии микродугового оксидирования (МДО). Надежно служит оно в качестве тепло- и электроизоляции, антипригарных, антикоррозионных покрытий, катализаторов, фильтров для вирусов, датчиков во влагомерах, окон и подложек в камерах рассеивания.

Алюминий и его сплавы в естественных условиях покрыты оксидной пленкой толщиной порядка 4…5 нм. Эта пленка сообщает металлу некоторую пассивность, однако вследствие малой толщины, высокой пористости и низкой механической прочности она не в состоянии обеспечить надежную защиту основы от внешних неблагоприятных воздействий. Этот недостаток может быть в той или иной мере устранен созданием на поверхности алюминия искусственных оксидных пленок значительной толщины методом МДО.

В данной работе были поставлены эксперименты, направленные на установление влияния химического состава электролита на коррозионную стойкость покрытий. Исследования проводили на сплаве АМг3. В качестве электролитов использовали 3 раствора на основе технического жидкого стекла ($n Na_2O \cdot m SiO_2$) с концентрацией до 150 г/л. Помимо жидкого стекла, в растворы вводили фосфат натрия (Na_3PO_4) до 100 г/л, гидроксид калия (КОН) до 20 г/л, метаалюминат натрия ($NaAlO_2$) до 20 г/л, комплексные соединения циркония (Zr^{4+}) и титана (Ti^{4+}). Плотность тока составляла 25...30 А/дм^2, время оксидирования до 90 мин. За это время на образцах формировались покрытия толщиной 250...450 мкм с пористостью до 20%. Определение толщины оксидного слоя на образцах проводили прямым измерением на поперечных шлифах на металлографическом микроскопе МИМ-8, а также с помощью окулярмикрометра. Для исследований были отобраны образцы, толщина покрытия которых составляла 250 мкм, пористость 10...12%.

Испытания коррозионной стойкости проводили в следующих растворах:

1. Бихромат калия ($K_2Cr_2O_7$) 3 г/л, соляная кислота (HCl, плотность 1,19 г/см^3) 25 мл, вода 75 мл.

2. Хлорид натрия (NaCl;) 25 г/л, уксусная кислота (CH_3COOH) ледяная 15 мл/л, перекись водорода 30 % (H_2O_2) 3 мл/л, вода до 1 л.

3. Гидроксид натрия (NaOH) 5 г/л.

Коррозионные испытания проводили в определенных, искусственно созданных лабораторных условиях. Испытания состояли собственно из эксперимента и его оценки. При этом длительность эксперимента составляла 600 часов для растворов № 2, 3 и 100 часов для раствора № 1. Для достоверности результатов в каждой точке испытания проводили на трех образцах. Образцы, представляющие собой пластины размером 20×30 мм и толщиной 1 мм, помещались в емкость с коррозионной средой, выдерживались в течение указанного времени, после чего промывались водой, просушивались и проходили стадию оценки результатов коррозионных испытаний.

Согласно указанной в работе [6] методике, проводили расчет скорости коррозии, предварительно измерив массу образцов до и после испытаний, определив тем самым коррозионные потери. В таблице 1 представлены значения скорости коррозии покрытий для различных коррозионных сред.

Таблица 1

Значения скорости коррозии покрытий в различных коррозионных средах

№ испытательного раствора	Потеря массы после испытаний, г · м^2 · ч		
	Раствор № 1 (силикатный)	Раствор № 2 (с комплексом циркония (Zr^{4+}))	Раствор № 3 (с комплексом титана (Ti^{4+}))
1	0,018	0,010	0,011
2	0,007	0,001	0,002
3	0,009	0,005	0,007

Как видно из таблицы 1, скорость коррозии образцов, подвергнутых МДО, уменьшается в 20...40 раз по сравнению с анодированными и эматалированными образцами [2], что указывает на то, что использование оксидных покрытий в качестве защиты металла основы от неблагоприятного влияния окружающей среды является весьма эффективным и перспективным. Это связано с образованием в покрытии пассивирующих слоев бемита, байерита, диоксида кремния, комплексных соединений циркония и титана с материалом основы.

Кроме того, проведены исследования коррозионной стойкости сплава АМг3 в морской воде, 3% и 5% растворах лимонной и уксусной кислот на образцах с оксидными слоями толщиной до 10 мкм, полученными оксидированием в растворе щавелевой кислоты.

Коррозионные испытания проводили в лабораторных условиях. При этом длительность эксперимента составляла 500 часов.

На рисунке 1 представлены зависимости скорости коррозии от толщины оксида для различных коррозионных сред. Как видно из графиков, скорость коррозии существенно уменьшается с увеличением толщины оксида и

замедляется при толщине 2…4 мкм, оставаясь в дальнейшем практически неизменной при увеличении толщины оксидного слоя.

Следует отметить, что скорость коррозии образцов, подвергнутых оксидированию, уменьшается в 2...4 раза.

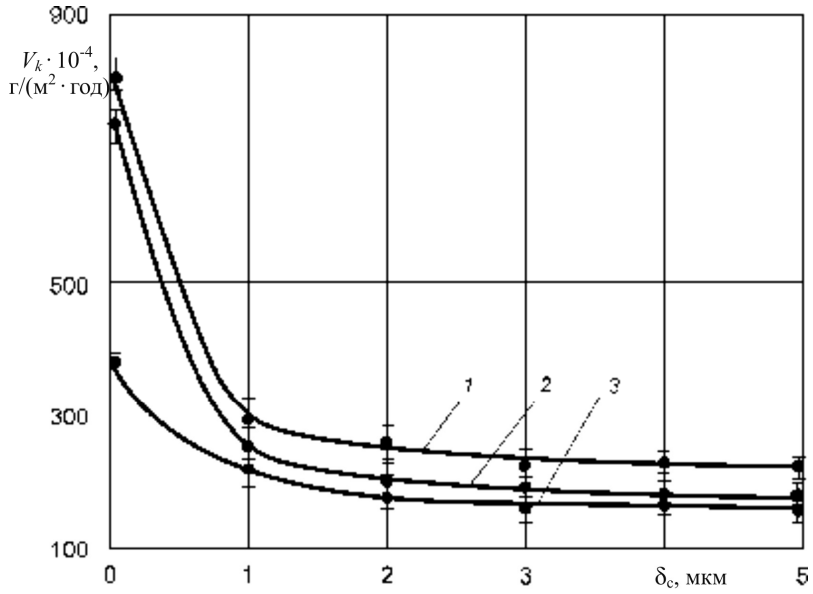


Рис. 1 Зависимость скорости коррозии от толщины оксида:
1 – в растворе лимонной кислоты; 2 – в морской воде;
3 – в растворе уксусной кислоты

Кроме того, проводили серию испытаний по установлению возможности применения технологии оксидирования для получения коррозионно-стойких защитных оксидных покрытий на изделиях специального назначения взамен применяемых, а также использования оксидного слоя в качестве основы для улучшения адгезии материала основы с лакокрасочными покрытиями.

Испытаниям подвергались промышленные образцы, изготовленные из сплавов АМг3 и АК4, представленные на рисунках 2, 3.

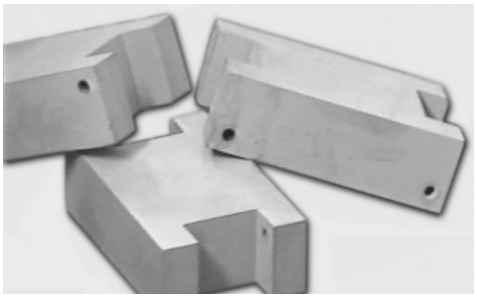


Рис. 2 Деталь электромеханического запирающего устройства, обработанная МДО

Проводимые испытания соответствовали условиям эксплуатации аппаратуры исполнения 1.4.1 (УХЛ) (аппаратура стационарная, предназначенная для работы на открытом воздухе) по ОСТ В95 2446-84.

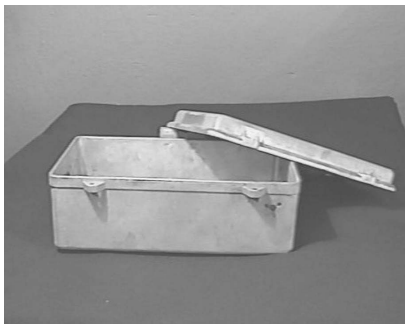


Рис. 3 Корпус устройства для охраны периметра, обработанный МДО

Испытания проводились по методам ОСТ 95 2548-80 и включали в себя:

– синусоидальную вибрацию с амплитудой ускорения 19,2 м/с^2 при частоте 25 Гц в течение 30 минут;

– атмосферные конденсированные осадки (роса, иней);

– атмосферные выпадаемые осадки (дождь);

– динамическую пыль (песок);

– воздействие температуры (–50…+60°С);

– морской (соляной) туман.

Детали электромеханических запирающих устройств специального назначения (рис. 2) обрабатывали оксидированием в растворе щавелевой кислоты с целью получения на поверхности износостойкого и антикоррозионного оксидного слоя.

Изделие коробчатой формы (рис. 3) используется в качестве сохраняющего контейнера и предназначено для изоляции содержимого (стационарной аппаратуры) от внешнего атмосферного воздействия.

Применение технологии оксидирования позволило в значительной степени повысить ресурс указанных изделий.

Оксидированием (с целью получения тонкого (4…6 мкм) оксидного подслоя для лакокрасочного покрытия взамен используемого грунтования поверхности) обрабатывали корпусную деталь изделия «Уран-М», применяемого в системах охраны периметра и предназначенного для изоляции содержимого от неблагоприятного влияния атмосферы (влага, температура, пыль), а также для защиты от внешнего механического воздействия. С целью замедления процесса коррозии на предварительно грунтованную поверхность изделия наносили защитное порошковое покрытие.

В результате применение технологии оксидирования за счет замены традиционно используемого грунтования поверхности позволило снизить затраты на производство указанного изделия на 16,8%.

Кроме того, использование оксидного слоя позволило значительно увеличить степень адгезии наружного покрытия с материалом корпуса, показав тем самым преимущество использования оксидных покрытий взамен традиционных в качестве предварительной обработки изделий из алюминиевого сплава перед нанесением защитного лакокрасочного покрытия.

Также были проведены исследования по возможности использования оксидных покрытий в качестве коррозионно-стойких взамен применяемых лакокрасочных. С этой целью в качестве исследуемого образца был выбран замок специальной конструкции, входящий в систему охраны периметра, из-

готовленный из алюминиевого сплава АМг3, способный выдерживать повышенные механические внешние нагрузки.

Обработку замков производили в щавелевокислом электролите на режимах, обеспечивающих получение твердых, плотных оксидных покрытий максимально возможной толщины. Для конкретного случая толщина оксидного покрытия составила 35…40 мкм.

Результаты испытаний показали перспективность использования оксидных покрытий в качестве коррозионно-стойких. В итоге срок службы изделий увеличился с 10 до 14 лет.

Таким образом, установлена возможность применения МДО как эффективного средства защиты изделий от коррозии.

Тем не менее, вопрос о возможности применения технологии оксидирования как эффективного средства от коррозии для широкого круга сплавов и других агрессивных сред требует проведения дальнейших научно-практических исследований.

Список литературы

1. **Тимошенко, А. В.** Исследование свойств оксидных покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах методом микродугового оксидирования / А. В. Тимошенко, Б. К. Опара // Анод-88 : материалы республ. научно-технической конференции. – Казань, 1988. – С. 43–45.
2. **Аверьянов, Е. Е.** Справочник по анодированию / Е. Е. Аверьянов. – М. : Машиностроение, 1988. – С. 7–15.
3. **Скачков, В. С.** Изменение химического состава щелочных сред, используемых для микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / В. С. Скачков, О. Е. Чуфистов, И. А. Казанцев // Современные материалы и технологии– 2002 : сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2002. – С. 231–233.
4. **Черкинский, Ю. С.** Химия полимерных неорганических вяжущих веществ / Ю. С. Черкинский. – Л. : Химия, 1967. – С. 78–83.
5. **Черненко, В. И.** Получение покрытий анодно-искровым электролизом / В. И. Черненко, Л. А. Снежко, И. И. Папанова. – Л. : Химия, 1991. – 126 с.
6. Испытание материалов : справочник / под ред. Х. Блюменауэра ; пер. с нем. – М. : Металлургия, 1979. – 448 с.

УДК 621.318.12

В. Г. Андреев, С. Б. Меньшова

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ АГРЕГИРОВАННОСТИ ПОРОШКОВ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫХ Mn-Zn ФЕРРИТОВ*

Исследована связь между процессами эволюции структуры при спекании заготовок Mn-Zn ферритов и формированием свойств готовых изделий: механической прочности, газопроницаемости, магнитной проницаемости, величины электромагнитных потерь. Процессы формирования свойств тесно связаны с формированием вида пористой структуры, определяемой строением и расположением пор в сырых заготовках и их эволюцией в процессе спекания. Сделан вывод о влиянии степени агрегированности порошков на процессы формирования свойств ферритовых изделий при спекании.

Введение

Многочисленные исследования показывают, что механические и электромагнитные свойства ферритов зависят от плотности (пористости) и параметров микроструктуры [1, 2]. Однако в этих исследованиях не учитывается конкретный вид пористости ферритов, что не позволяет однозначно предсказать свойства ферритов по величине пористости.

Ферриты, полученные по керамической технологии, по своей структуре можно отнести к дисперсным системам, состоящим как минимум из двух фаз: ферритовой фазы, образующей сплошную среду, и раздробленной газообразной или дисперсной фазы, представленной порами. Поры по своему строению и расположению подразделяются на внутризеренные и межзеренные, изолированные и канальные, сферические и цилиндрические и т.д. [3].

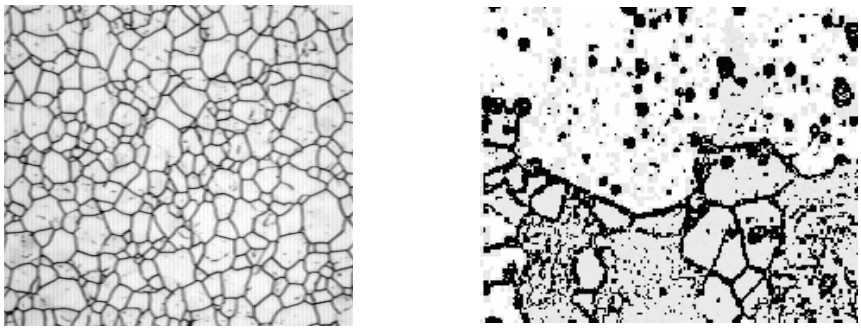
Пористая структура ферритов формируется при спекании и определяется структурой сырых заготовок, которая, в свою очередь, зависит от агрегированности исходных порошков. В большинстве исследований, посвященных изучению процессов формирования структуры и свойств ферритовых изделий, практически не рассматриваются механизмы формирования структуры и свойств ферритовых материалов при спекании.

В целом ферритовые дисперсные системы (порошки, полуфабрикаты и изделия) по степени неоднородности можно подразделить на гомодисперсные и гетеродисперсные. Гомодисперсные системы однородны по структуре (рис. 1,а), а распределение по размерам частиц или зерен таких систем соответствует распределению Гаусса. Для гетеродисперсных систем характерно более сложное строение, их элементами являются как сами зерна, так и более крупные их вторичные образования – агрегаты, гранулы (рис. 1,б), размеры которых на 1–2 порядка превышают размеры самих зерен. Кривая распределения элементов структуры по размерам имеет несколько максимумов.

Гетеродисперсные структуры образуются на промежуточных стадиях технологического процесса получения ферритовых материалов (рис. 2). С це-

* Работа выполнена в рамках госконтракта № 02.442.11.7412 (заказчик – Федеральное агентство по науке и инновациям) на тему «Разработка ресурсосберегающих технологий производства ферритов путем управления реологическими свойствами нанодисперсных ферритовых порошков».

лью изучения закономерностей формирования плотной однородной структуры ферритовых изделий необходимо изучать процессы эволюции гетеродисперсных систем на разных этапах техпроцесса: при гранулировании, прессовании и спекании. В данной работе акцент сделан на изменении структуры гетеродисперсных систем в процессе спекания.



а) б)

Рис. 1 Типичные микроструктуры ферритов:
а – гомодисперсная; б – гетеродисперсная

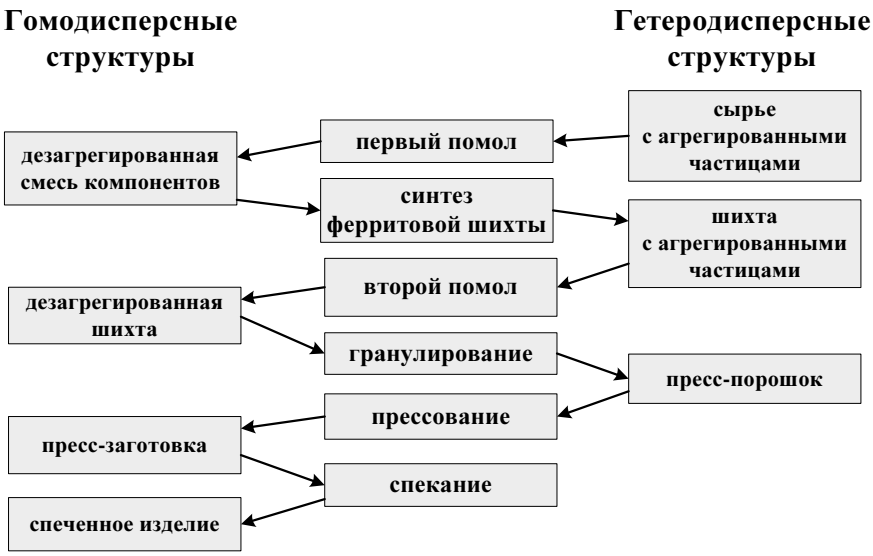


Рис. 2 Технологическая схема производства ферритовых материалов
и классификация дисперсных систем в производстве ферритов

Целью данной работы является исследование особенностей формирования пористой структуры и свойств Mn-Zn ферритов при спекании.

Методика эксперимента

Mn-Zn ферриты марки 6000НМ синтезировали с использованием исходных компонентов Fe_2O_3 (ТУ6-09-4816-80 марки ММ-2), $MnCO_3$ (ТУ6-09-5131-83 квалификации «ч.д.а.») и ZnO (ГОСТ10262-72 квалификации «ч.д.а.»). Исходные компоненты смешивали и измельчали мокрым помолом в аттриторе в течение 1–30 часов с добавлением ПАВ (цитрата триэтанаммония). Пол-

ноту дезагрегации шихты при измельчении оценивали по насыпной плотности и по разности значений удельных поверхностей, полученных на газовом хроматографе ЛХМ-8МД и на приборе АДП-4 методом контроля газопроницаемости (Козени-Кармана). По величине удельной поверхности на газовом хроматографе можно оценить размеры первичных частиц, а по величине удельной поверхности на приборе АДП-4 – средний размер агрегатов, поскольку газопроницаемость агрегированных порошков определяется межагрегатными порами. Ферритизацию шихты осуществляли прокалкой в печи KILS при температуре 930°С. Ферритизованную шихту измельчали мокрым помолом в аттриторе в течение 1–20 часов с добавлением ПАВ. Из высушенной шихты изготавливали гранулированный порошок с использованием в качестве связки поливинилового спирта в количестве 0,8% масс. Из гранулированного порошка прессовали кольцевые заготовки $10\times5\times2,5$ мм на прессе РУЕ-10 под давлением 40–200 МПа. Заготовки спекали в вакуумной печи с регулируемым вакуумом при скорости нагрева 150°С /ч.

Величина свободной поверхности заготовок (суммарная поверхность частиц, контактирующих с внешней средой посредством пространственной системы пор) измерялась с помощью газового хроматографа ЛХМ-8МД. Сквозная пористость оценивалась по газопроницаемости заготовок с помощью прибора Товарова при перепаде давления 10 кПа. Схема измерения показана на рисунке 3. Плотность изделий вычисляли по их массе и геометрическим размерам. Прочность изделий на разрыв определяли по величине усилия, необходимого для их разрыва при скорости нарастания усилия 0,01 Н/с.

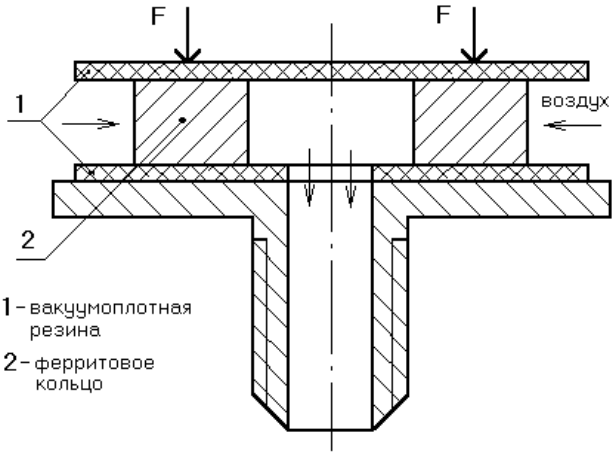


Рис. 3 Схема измерения газопроницаемости кольцевых заготовок

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов показали, что при нагреве заготовок под спекание сначала происходит увеличение газопроницаемости заготовок и снижение свободной поверхности (рис. 4), объясняемое формированием контактных шеек между частицами. Так проходит начальная стадия спекания, которая для Mn-Zn ферритов соответствует интервалу температур 700–950°С. Заметное возрастание газопроницаемости связано с процессами цилиндризации канальных пор (рис. 5).

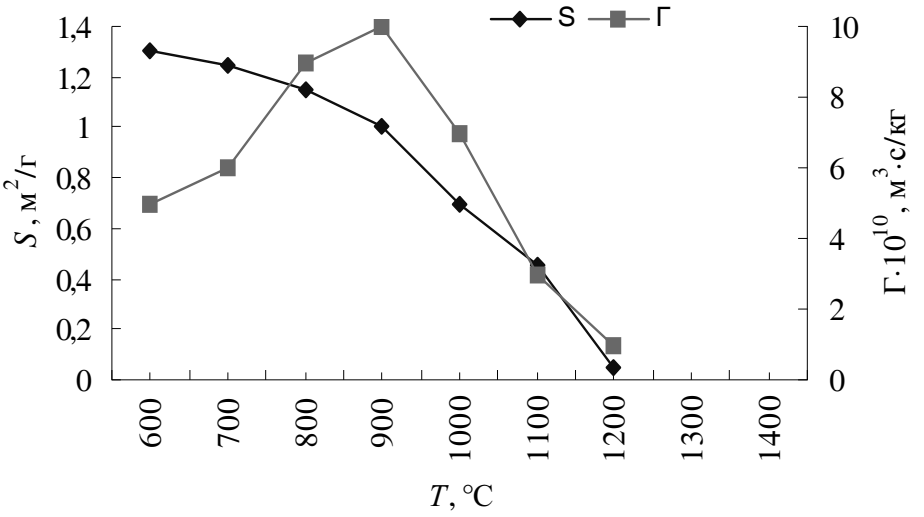


Рис. 4 Влияние температуры спекания на свободную поверхность (*S*) и газопроницаемость (Г) заготовок Mn-Zn ферритов

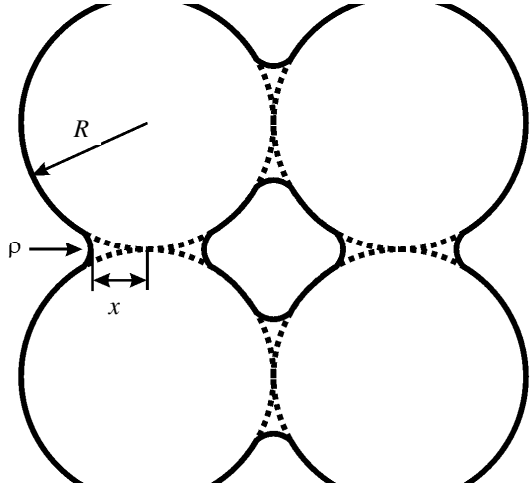


Рис. 5 Схема формирования цилиндрической поры на стыке четырех частиц при спекании

В интервале 950–1230°С, соответствующем второй стадии спекания, происходит резкое снижение газопроницаемости и свободной поверхности заготовок до нуля. Это обусловлено сужением канальных пор. Плотность и механическая пористость при этом заметно возрастают (рис. 6).

И при температуре 1230°С начинается заключительная стадия спекания с соответствующими процессами рекристаллизации и роста зерен. Исчезновение сквозной пористости соответствует распаду пространственной сетки пор на изолированные поры. В результате поры и границы зерен приобретают способность к миграции. На заключительной стадии спекания происходит снижение механической прочности заготовок (рис. 6). Из рисунка 6 видно, что максимальная механическая прочность изделий соответствует началу заключительной стадии спекания.

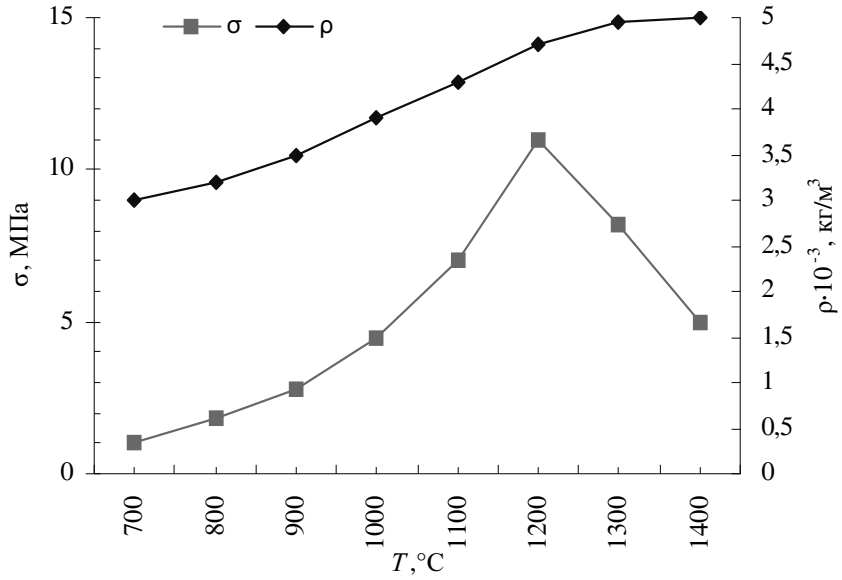


Рис. 6 Влияние температуры спекания на прочность (σ)
и плотность (ρ) заготовок Mn-Zn ферритов

Известно [2], что наличие межгранульных пор и агрегированности частиц ферритовой шихты отрицательно влияет на процессы спекания и параметры изделий. Как правило, размеры агрегатов на 1–2 порядка превышают размеры частиц. Крупные канальные поры между этими агрегатами не исчезают при прессовании и даже на заключительной стадии спекания, что приводит к повышенной пористости и ухудшению магнитных свойств [3]. С целью разрушения агрегатов и формирования гомодисперсной структуры в данной работе проводили длительное мокрое измельчение смеси исходных компонентов (рис. 7) и последующее мокрое измельчение ферритизованной шихты в аттриторе.

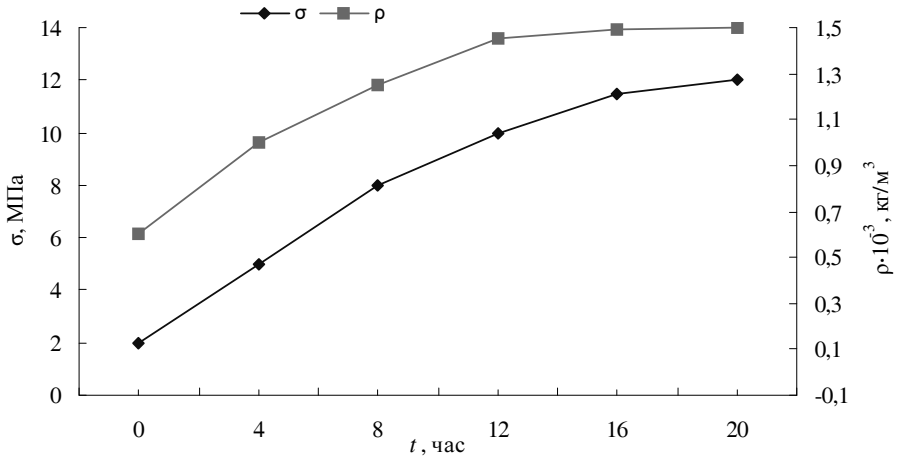


Рис. 7 Влияние длительности мокрого помола смеси исходных компонентов
на насыпную плотность шихты (ρ) и максимальную
механическую прочность спеченных изделий (σ)

Контроль полноты дезагрегации шихты осуществляли по кинетике изменения насыпной плотности шихты. Оптимальное время измельчения (около 12 ч) соответствует выходу на насыщение кривой зависимости насыпной плотности шихты от времени измельчения (рис. 7). Достижение максимальной насыпной плотности позволяет повысить магнитную проницаемость ферритов в результате увеличения плотности сырых заготовок и спеченных изделий.

Из данных, приведенных в таблице 1, видно, что увеличение длительности мокрого помола шихты повышает уровень электромагнитных свойств ферритов. Это можно связать с процессами дезагрегации шихты и переходом гетеродисперсной структуры в гомодисперсную, что и обеспечивает повышение плотности ферритовых изделий после спекания. Из данных таблицы 1 также следует, что минимальные значения электромагнитных потерь соответствуют началу заключительной стадии спекания.

Таблица 1

Влияние температуры спекания и времени помола смеси исходных компонентов на начальную проницаемость $\mu_н$ и относительный тангенс угла потерь $tg\delta/\mu_н$ в поле 0,4 А/м Mn-Zn ферритов

T, °C	$\mu_н$		$tg\,\delta/\mu_н \cdot 10^{-6}$	
	t = 4 ч	t = 24 ч	t = 4 ч	t = 24 ч
1000	490	870	606	427
1100	2250	3950	203	98
1150	3640	4960	76	35
1200	4920	5440	43	19
1250	5340	6280	40	12
1300	5680	6820	49	17
1350	5450	6890	67	36

Увеличение электромагнитных потерь на заключительной стадии спекания, видимо, связано с возрастанием потерь на вихревые токи с ростом размеров зерен. Снижение механической прочности связано с ростом среднего размера зерна в процессе рекристаллизации.

Заключение

Впервые установлены закономерности изменения свободной поверхности, газопроницаемости, плотности и механической прочности заготовок Mn-Zn феррита, полученных прессованием гранулированных порошков при нагреве под спекание.

Выявлено, что существенным препятствием для получения высокоплотных изделий и требуемого уровня механических и электромагнитных свойств является агрегированность частиц ферритовой шихты. Крупные канальные поры между агрегатами не удаляются на операциях прессования и спекания, в результате повышается пористость готовых изделий. Установлено, что для полноты дезагрегации частиц необходимы длительные (более 12 ч) мокрые измельчения смеси исходных компонентов и ферритизованной шихты. Для удаления межгранульных пор в заготовках необходимо увеличение давления

прессования. Исследования также показали, что максимальный уровень механических и электромагнитных свойств соответствует началу заключительной стадии спекания, поскольку рост зерен на заключительной стадии спекания снижает механическую прочность заготовок и повышает электромагнитные потери ферритов.

Список литературы

1. **Snelling, E.** Soft Ferrites. Properties and applications / E. Snelling. – London : Butter Words & Co.,1988. – P. 502.
2. Проблемы порошкового материаловедения / В. Н. Анциферов, Л. М. Летюк, В. Г. Андреев [и др.]. Ч. IV : Материаловедение поликристаллических ферритов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 396 с.
3. **Летюк, Л. М.** Технология производства материалов магнитоэлектроники / Л. М. Летюк, А. М. Балбашов, Д. Г. Крутогин [и др.]. – М. : Металлургия, 1994. – 416 с.

УДК 620.9:662.92; 621.9

А. В. Тарнопольский, С. Н. Курносов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИХРЕВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ

Показаны возможности повышения эффективности ряда технологических операций машиностроительного производства и некоторых видов теплотехнического оборудования за счет использования вихревых гидравлических теплогенераторов. Проведены исследования характера вихревых потоков и сопутствующих эффектов, установлены теплоэнергетические характеристики вихревых теплогенераторов. Разработаны варианты применения вихревых гидравлических теплогенераторов. Приведены примеры практической реализации разработок. Показана перспективность разработки на основе термодинамического диспергатора-распылителя устройств для аэрации сточных вод и их окисления.

Экономика России в настоящее время в сравнении с индустриально-развитыми странами потребляет энергоресурсов в 3…4 раза больше на единицу произведенной продукции [1]. Решению проблемы экономии энергоресурсов способствует применение вихревых гидравлических теплогенераторов [2], являющихся одним из новых видов промышленных теплоэнергетических устройств. Их применяют в основном для нагрева жидких теплоносителей с целью автономного теплоснабжения различных объектов. Нагрев жидкости происходит при ее многократной циркуляции по контуру: насос – вихревая камера – насос. Центробежный электронасос подает жидкость в вихревую камеру теплогенератора, выполненную в виде полого цилиндра, через тангенциальный ввод, обеспечивающий закрутку потока. Из вихревой камеры жидкость выходит через диафрагмы определенных размеров, установленные на торцах камеры. После выхода из вихревой камеры жидкость направляется по трубопроводу на всасывающий патрубок насоса, тем самым образуя замкнутый контур циркуляции. Типичная температура теплоносителя 70…80°С, но в некоторых установках возможен нагрев теплоносителя до 100°С и более.

На первом этапе моделирования движения вихревого потока жидкости для определения давления p в закрученном потоке можно использовать уравнение Эйлера:

$$\frac{u^2}{r} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}, \qquad (1)$$

где u – скорость вихревого потока; r – радиус вращения; p – давление в вихревом потоке; ρ – плотность жидкости.

Интегрируя его по r, получим

$$p = \rho \int \frac{u^2}{r} dr + C, \qquad (2)$$

или с учетом соотношения $u = \Omega r$

$$p = \rho\left(\frac{\Omega^2 r^2}{2}\right) + C = \rho\frac{u^2}{2} + C\,. \qquad (3)$$

Давление и скорость на поверхности вихревого шнура радиусом $r_в$ соответственно равны $p_в$, $u_в = \Omega r_в$, отсюда

$$C = p_в - \rho\frac{u_в^2}{2}, \qquad (4)$$

и давление внутри вихревого шнура

$$p = \rho\frac{u^2 - u_в^2}{2} + p_в\,. \qquad (5)$$

Разность давлений на поверхности вихревого шнура и в его центре, где $u = 0$, равна

$$\Delta p = \frac{\rho u_в^2}{2}. \qquad (6)$$

В предельных случаях вихревое течение жидкости сопровождается кавитацией. Она возникает в результате местного понижения давления в жидкости ниже критического значения, которое приблизительно равно давлению насыщенного пара этой жидкости при данной температуре. Понижение давления может происходить вследствие местного повышения скорости в потоке жидкости (гидродинамическая кавитация) или вследствие прохождения в жидкости акустических волн (акустическая кавитация).

При высокой интенсивности закручивания потока в результате снижения давления в осевой зоне вихревой камеры наблюдается разрыв сплошности жидкости, вначале с образованием двухфазной жидкостно-газовой среды, а затем полого газового канала, расположенного в осевой зоне вихревой камеры радиусом $r_в$, что подтвердилось в результате визуальных наблюдений при проведении экспериментальных исследований течения вихревых потоков жидкости в оптически прозрачной вихревой камере (рис. 1).

В периферийных вихревых потоках и перед выходом из вихревой камеры, где скорость потока жидкости резко уменьшается, а давление, соответственно, увеличивается, происходит схлопывание кавитационных пузырьков и выделение тепла [3].

Скорость нагрева теплоносителя и удельное потребление энергии существенно зависят от проходных сечений диафрагм. При увеличении сечения отверстия в диафрагме для выхода потока из вихревой камеры его скорость увеличивается и в осевой зоне может происходить разрыв сплошности жидкости с образованием парогазового канала. При определенном сочетании сечений диафрагм и установке тормоза увеличивается число мелких паровоздушных пузырьков, которые распространяются практически по всей длине вихревой камеры. В зависимости от соотношения сечений диафрагм для выхода жидкости из вихревой камеры возможно образование противотока в осевой зоне.

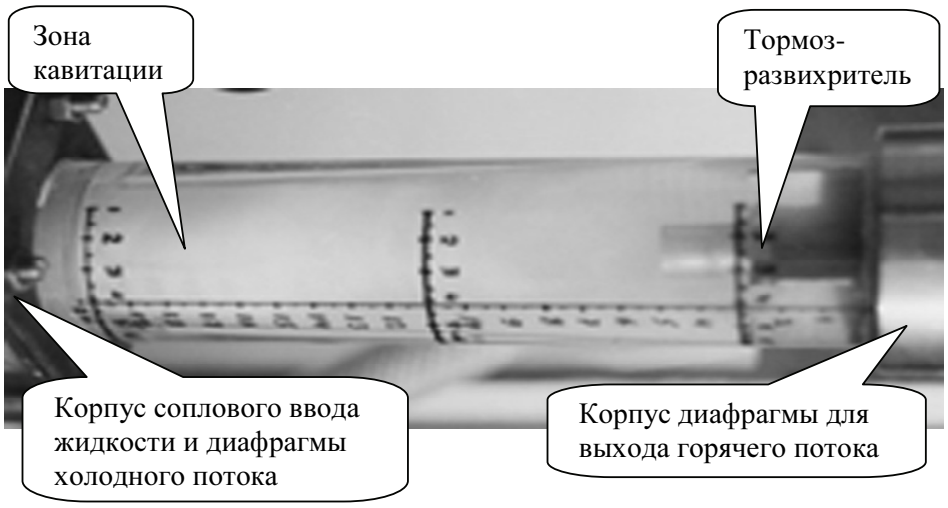


Рис. 1 Характер и расположение зоны кавитации в вихревой камере

Установлено, что процессы тепло- и массопереноса более интенсивно протекают в вихревых потоках при использовании тормоза в виде крестовины с цилиндрической втулкой на конце (рис. 1). Установка тормоза-развихрителя на торцовой стенке вихревой камеры перед отверстием для выхода жидкости усиливает турбулентность вихревого потока, что способствует образованию в осевой области обширной зоны, заполненной вращающейся паро-газо-жидкостной средой.

В слоях жидкости, контактирующих со стенками вихревой камеры, за счет сил трения образуется пристеночное вихревое течение, снижающее тангенциальную составляющую периферийного потока. При этом уменьшается разрежение вихревого потока в осевой зоне. Для эффективного тепло- и массопереноса необходимо обеспечить условия для разрыва сплошности жидкости в вихревом потоке, сообщив ему максимально высокую скорость до момента набегания на лопасти тормоза-развихрителя. Для этого внутренняя поверхность вихревой камеры должна быть выполнена с минимальным коэффициентом трения за счет подбора соответствующего материала и его обработки.

На рисунке 2 показана уникальная конструкция вихревого теплогенератора, который весьма эффективно применяется для отопления и горячего водоснабжения жилых, общественных и производственных помещений.

Основное преимущество вихревых теплогенераторов заключается в том, что с их помощью можно нагревать практически любые жидкости, в то время как тепловые электрические нагреватели (ТЭНы) требовательны к качеству подогреваемой воды. Главное их преимущество перед тепловыми электронагревателями – это отсутствие жестких требований по подготовке воды, отсутствие накипи и отложений на элементах устройства и возможность работы на различных видах жидкости, в том числе незамерзающих, химически агрессивных и пожароопасных.

Проведенные исследования показали, что проточно-накопительный водонагреватель на базе вихревого термогенератора на 15–20% эффективнее проточного водонагревателя модели DB-13 производства Германии аналогичной мощности и может работать в двух режимах: как проточном, так и

накопительном (рис. 3). Выполненные разработки превосходят известные отечественные и мировые аналоги, имеют патентную защиту, просты и высоконадежны, электробезопасны и экологически безопасны. Коэффициент полезного действия вихревых теплогенераторов достигает 95%, поскольку «потери» электрической энергии в насосе (с КПД ~ 70%), располагающемся в рабочей жидкости, полностью идут на ее нагрев.

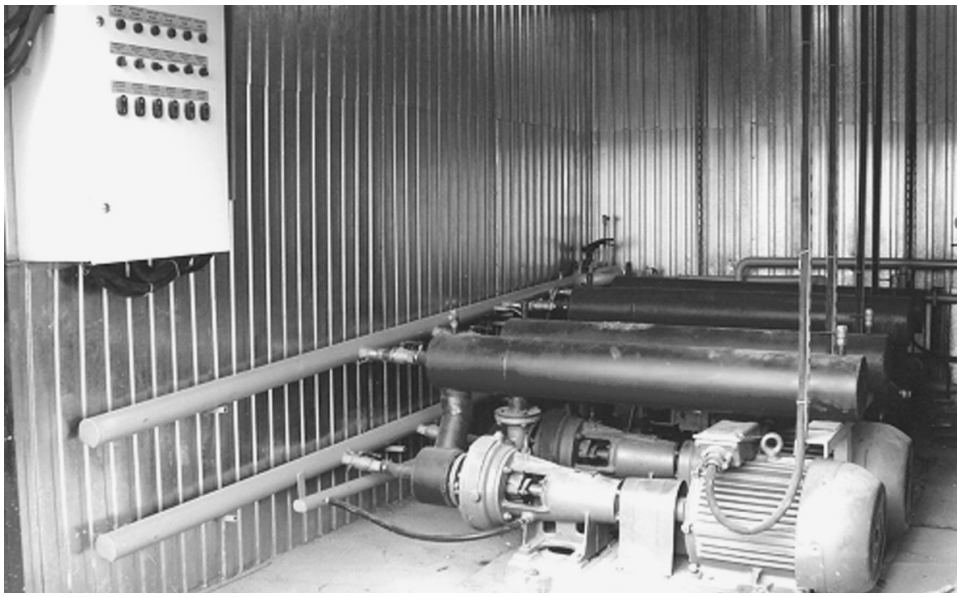


Рис. 2 Теплогенераторы, подключенные к системе отопления

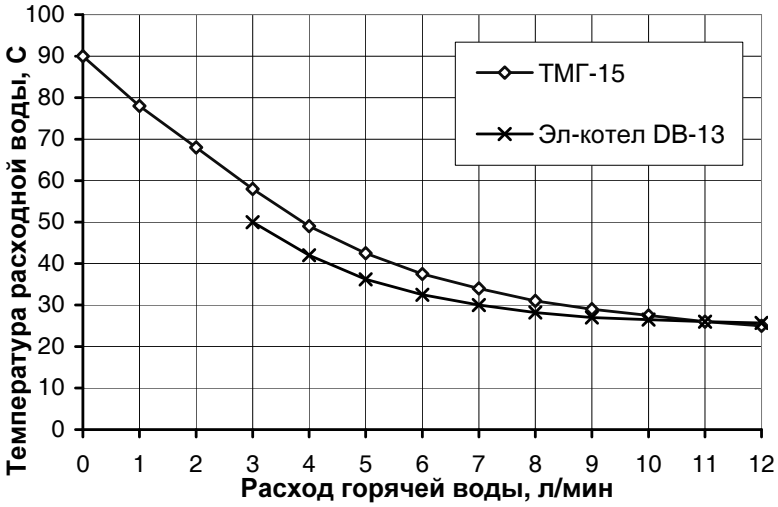


Рис. 3 Сравнительные характеристики водонагревателей вихревого и электрического типов

Высокая надежность, безопасность и экономичность делают применение вихревых гидравлических теплогенераторов в качестве автономного источника теплоснабжения технологического оборудования более экономич-

ным по сравнению с электронагревателями и паром. Их применение обеспечивает заданный температурный режим гальванических ванн. Четырехлетний опыт применения вихревых гидравлических теплогенераторов для теплоснабжения гальванических ванн в ОАО «Дизель» (Краснодарский край) и в ОАО «Кузнецкий завод приборов и конденсаторов» показал их высокую надежность, при этом обеспечивается экономия энергоресурсов до 20% (рис. 4).

Рис. 4 Вихревой теплогенератор обеспечивает автономное теплоснабжение гальванических ванн

Важной характеристикой вихревого гидравлического теплогенератора является автономность и возможность его многофункционального использования. При вихревом течении закрученных потоков жидкости проявляются несколько физических эффектов: нагрев, перемешивание и диспергирование разнородных жидкостей, образование двухфазных жидкостно-газовых сред, разрыв межмолекулярных связей в воде и др. В результате взаимного усиления указанных эффектов в вихревых потоках жидкости протекают интенсивные процессы тепло- и массопереноса, изменяющие физические характеристики рабочей среды и ее состояние [3]. В связи с этим вихревые теплогенераторы, кроме отопления и горячего водоснабжения жилых, общественных и производственных помещений, теплоснабжения производственного оборудования, находят применение для перемешивания и диспергирования технических жидкостей, приготовления эмульсий и моющих растворов, для мойки деталей машин при их изготовлении и ремонте.

Применяемые в процессе механической обработки материалов смазывающе-охлаждающие технологические среды (СОТС) в виде водомасляных эмульсий являются питательной средой для размножения бактерий. В результате жизнедеятельности бактерий эмульсия разлагается, выделяется сероводород, и она истощается, т.е. становится непригодной для дальнейшего использования. Традиционно используемые методы приготовления эмульсий путем пе-

ремешивания (рамными, лопастными и якорными мешалками, барботажем, перекачиванием насосами и др.) неэффективны [4]. Эмульсия получается при этом крупнодисперсная, с размерами частиц эмульсола от 3 до 8 мкм и более. Крупные капельки эмульсола замасливают инструмент и обрабатываемые детали. Только в однородных, нерасслаивающихся эмульсиях в каждой капле жидкости имеются все необходимые компоненты СОТС. Кавитационные пузырьки, образующиеся в воде, существенно влияют на жизнестойкость микроорганизмов, значительно понижая последнюю. При кавитационной обработке устойчивость СОЖ к биопоражению достигала 3 месяцев, тогда как обычная СОЖ при отсутствии биоцидных добавок в летнее время склонна к развитию микроорганизмов уже через 5…7 суток эксплуатации. Чем выше дисперсность частиц эмульсола, тем более однородна и стабильна эмульсия.

Для решения задач приготовления высококачественных СОТС и поддержания их в рабочем состоянии предложено применять вихревой теплогенератор [5]. При движении вихревого потока жидкости в оптически прозрачной вихревой камере теплогенератора было отмечено образование огромного количества мельчайших пузырьков. Пузырьки движутся вместе с вихревым потоком жидкости, распространяются на большую часть вихревой камеры. Совместное воздействие кумулятивных струек, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков, гидродинамических ударов и ультразвукового поля приводят к стерилизации обрабатываемой жидкости, эмульгированию обычно не смешиваемых продуктов, гомогенизации обрабатываемого продукта. В процессе приготовления СОТС с использованием вихревого теплогенератора проявляется синергетический эффект взаимного усиления процессов перемешивания, диспергирования, нагрева, обеззараживания и активации СОТС при движении жидкости в вихревых потоках. При этом возможно повысить срок службы эмульсии за счет снижения бактериальной поражаемости. Применение небольших по мощности теплогенераторов, работающих в режиме кавитации, обеспечит качественное приготовление в производственных условиях мелкодисперсных трудно расслаивающихся эмульсий смазывающе-охлаждающих технологических средств (СОТС), используемых при обработке материалов резанием. Использование мелкодисперсных эмульсий, приготовленных с использованием кавитационных технологий, позволит повысить производительность станков, сократить расход режущего инструмента, улучшить качество обрабатываемых поверхностей.

Интенсифицировать процесс очистки и мойки деталей при ремонте, после механической обработки, перед сборкой и нанесением гальванических покрытий поверхности позволит применение вихревого гидродинамического нагревателя жидкости. При прокачивании моющего раствора электронасосом через вихревую камеру вихревые потоки моющего раствора нагреваются, насыщаются мельчайшими паровоздушными пузырьками и при направленной подаче в моечный бак обеспечивают качественную мойку и очистку поверхности деталей. Всепроникающие пузырьки, лопаясь на поверхности деталей, интенсифицируют процесс очистки их поверхностей, обеспечивают экономию моющих средств и энергии.

Кроме того, вихревые теплогенераторы могут использоваться для насыщения газом жидкости, например при аэрации сточных вод и их окислении. На эффективность кавитации не влияет ни мутность, ни солевой состав воды, ни цветность.

Список литературы

1. Энергоэффективность – основа устойчивого развития экономики России : материалы Всероссийского совещания. – М., 2002.
2. **Курносов, Н. Е.** Система отопления и горячего водоснабжения на основе вихревого термогенератора / Н. Е. Курносов, А. В. Тарнопольский, В. М. Пичугин, П. А. Цветков // По всей стране. – 2002. – № 8. – С. 12–13.
3. **Федоткин, И. М.** Интенсификация процессов смешения и диспергирования гидродинамической кавитацией / И. М. Федоткин, И. С. Гулый, В. В. Боровский. – Киев : Арктур-Л, 1998. – 128 с.
4. **Костров, С. А.** Применение волновой технологии для улучшения СОЖ / С. А. Костров // Вестник машиностроения. – 1988. – № 6. – С. 56–58.
5. **Евстифеев, В. В.** Использование вихревого гидравлического теплогенератора для приготовления эмульсий / В В. Евстифеев, А. В. Тарнопольский // Ресурсосбережение и инновации: проблемы и решения : сборник статей Международной научно-практической конференции. – Пенза : Изд-во Приволжск. дома знаний, 2006. – С. 35–39.

АННОТАЦИИ

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.5.03

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ С ПОВТОРНЫМ ВЫПОЛНЕНИЕМ НЕКАЧЕСТВЕННО ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ. *Буряков В. А., Щербаков М. А.* –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 3–12.

Разработан метод оценки длительности обработки в иерархической системе с повторным выполнением некачественно выполненных работ, реализующий схему обработки с дискретными результатами контроля и сложными циклами, имеющими постоянные вероятности повторения. Данный метод, в отличие от классического метода критического пути, позволяет получать более точные результаты для рассматриваемого класса систем.

УДК 681.324

СЕТИ АБСТРАКТНЫХ МАШИН ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ И СЕТЕЙ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ (БАЗОВЫЙ ФОРМАЛИЗМ И ЕГО РАСШИРЕНИЯ). *Зинкин С. А.* –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 13–22.

Рассматриваются проблемы интеграции формальных представлений распределенных процессов и объектов, взаимодействующих через общее структурированное пространство памяти. Предложен новый формализм для описания согласованных взаимодействий процессов и объектов в системах и сетях хранения и обработки данных, базирующийся на декларативном и процедурном подходах к представлению знаний о функционировании распределенных систем.

УДК 519.7

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕВЕРСИВНЫХ ЧАСТИЧНО МАРКИРОВАННЫХ *SNCES*-СЕТЕЙ.
Дубинин В. Н. , Ханиш Х.-М., Миссал Д. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 23–34.

В данной работе предлагаются методы интерпретации реверсивных частично маркированных безопасных *NCES*-сетей (*RsNCES*-сетей), основанные на представлении сетевых моделей в виде булевых функций и их последующей минимизации. Приведен алгоритм построения графа достижимости для *RsNCES*-сетей.

УДК 519.816

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ОБРАЗОВАНИЯ В ВУЗЕ.

Волчихин В. И., Прошкина Е. Н. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 35–43.

Предлагается математическая модель системы принятия решений по управлению качеством образования. Модель разработана на основе метода вербального анализа решений. В статье рассматриваются математические аспекты реализации модели в среде MathCAD.

УДК 681.3.25: 621.382

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К АНАЛОГОВОЙ, ЦИФРОВОЙ И АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИЯМ ОБРАБОТКИ.

Пальченков Ю. Д. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 44–55.

Предлагается схема классификации и сравнения моделей аналоговых вычислений, структурная схема простой непрерывной машины, использующая динамическую систему и развитие теории $(\mathbb{Z},\mathbb{Q})$-систем.

УДК 004.932.4

РЕАЛИЗАЦИЯ SD-ROM ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ. *Сорокин С. В., Щербаков М. А.* –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 56–65.

Рассмотрена реализация SD-ROM фильтра с использованием нечеткой логики. В результате проведенного сравнительного анализа SD-ROM и медианных фильтров в задачах удаления импульсного шума подтверждается превосходство SD-ROM фильтрации. Применение концепции нечеткой логики при реализации SD-ROM фильтров позволяет практически полностью удалить шум на изображении.

УДК 330.1, 65.0

МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА.

Мещеряков В. А. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 66–70.

Определены основные составляющие механизма управления системой менеджмента качества (СМК) государственного университета и результаты их применения. Управление СМК рассматривается в виде процесса, входом которого являются проблемы развития СМК, а выходом-результатом – управляемость самой системы.

УДК 330.1, 65.0
ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ КАФЕДРЫ.
Мещеряков В. А., Мурашкина Т. И., Суровицкая Г. В. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 71–79.

В статье представлена методика оценки результативности процессов кафедры с использованием данных самооценки, внутренних аудитов и данных, традиционно собираемых кафедрой. Предложены показатели процессов кафедры и порядок их расчета. На основе значений этих показателей в анализируемом периоде рекомендовано оценивать результативность процессов кафедры.

Электроника, измерительная техника и радиотехника

УДК 621.3.087.92
∑Δ-АЦП: АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОТ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ.
Чувыкин Б. В., Шахов Э. К., Ашанин В. Н. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 80–90.

В третьей из серии статей, посвященных синтезу структур ∑Δ-АЦП средствами имитационного моделирования, исследуется погрешность от краевых эффектов для ряда структур ∑Δ-АЦП, приведенных в предшествующих статьях серии. Для понимания материала данной статьи полезно ознакомиться с упомянутыми статьями серии.

УДК 62–82
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ С МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ.
Волков П. Ю., Демин С. Б., Регеда В. В. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 91–96.

Рассмотрена математическая модель двухкаскадного электрогидравлического усилителя сопло–заслонка с магнитострикционным преобразователем повышенной точности в первом каскаде усиления, который может использоваться в составе типовых электрогидравлических приводов гидрофицированного технологического оборудования.

УДК 621.316.722.4
ВАКУУМНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ИИС И АСУ ТП. *Воронов А. П., Юрков Н. К.* –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 97–104.

Представлен ряд вакуумных емкостных делителей напряжений для систем автоматического регулирования и контроля рабочих режимов высоковольтных (более 1 кВ) высокочастотных (до 90 МГц) цепей. Рассмотрены преимущества их использования в качестве средств измерений. Приведены математические выражения для оценки погрешностей.

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.755-251

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИСБАЛАНСА ЖЕСТКИХ РОТОРОВ В РЕЖИМЕ СФЕРИЧЕСКОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ.

Кочкин С. В., Малёв Б. А. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 105–115.

В статье рассмотрен новый метод измерения дисбаланса жестких роторов при их балансировке в режиме сферического циркуляционного движения (сферической вибрации), приведена кинематическая схема его реализации, получены дифференциальные уравнения движения колебательной системы под действием неуравновешенных сил инерции.

УДК 621.9.027

РАСЧЕТ СИЛ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТА СО СКРУГЛЕННОЙ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ. *Трилисский В. О., Большаков Г. С.* –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 116–122.

Предложен метод расчета сил резания при обработке инструментом со скругленной режущей кромкой. Получены расчетные зависимости для определения проекций результирующей силы резания. Определено влияние радиуса закругления режущей кромки на численные значения составляющих силы резания и характер их изменения.

УДК 621.357.7

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО И КОРРОЗИОННО-СТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ СПЛАВОМ НИКЕЛЬ-ХРОМ. *Виноградов С. Н., Метальникова О. К.* –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 123–130.

Рассматривается процесс электроосаждения износостойкого и коррозионно-стойкого блестящего покрытия сплавом никель-хром. Показано, что для предотвращения окисления ионов хрома (III) до хрома (VI) можно использовать дополнительную анодную ячейку с ионообменной перегородкой. Для поддержания концентрации хрома (III) в заданных пределах электролит периодически корректируется хромокалиевыми квасцами. С целью повышения буферных свойств электролита и увеличения pH гидратообразования хрома (III) в электролит вводят сульфат аммония.

УДК 621.357:669.715

ОЦЕНКА УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МИКРОДУГОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.

Малышев В. Н. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 131–137.

Проведенные исследования влияния микродуговой обработки алюминиевых сплавов на их механические характеристики показали существенное повышение прочностных характеристик (в первую очередь модуля упругости) в области упругого деформирования. Результаты статических и динамических тестов подтвердили эффект упрочнения алюминиевых сплавов МДО-обработкой.

УДК 621.793.6:669.056.9

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ, ФОРМИРУЕМЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ.

Казанцев И. А., Розен А. Е., Кривенков А. О., Чугунов С. Н. –
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 138–142.

Рассматривается механизм формирования покрытий микродуговым оксидированием. Даны подробные сведения о влиянии химического состава электролита на коррозионную стойкость покрытий. Представлены данные о коррозионной стойкости защитных покрытий на изделиях специального назначения.

УДК 621.318.12

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ АГРЕГИРОВАННОСТИ ПОРОШКОВ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫХ Mn-Zn ФЕРРИТОВ. *Андреев В. Г., Меньшова С. Б.* –

Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 143–149.

Исследована связь между процессами эволюции структуры при спекании заготовок Mn-Zn ферритов и формированием свойств готовых изделий: механической прочности, газопроницаемости, магнитной проницаемости, величины электромагнитных потерь. Процессы формирования свойств тесно связаны с формированием вида пористой структуры, определяемой строением и расположением пор в сырых заготовках и их эволюцией в процессе спекания. Сделан вывод о влиянии степени агрегированности порошков на процессы формирования свойств ферритовых изделий при спекании.

УДК 620.9:662.92; 621.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИХРЕВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ. *Тарнопольский А. В., Курносов С. Н.* –

Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки, 2007, № 3, с. 150–156.

Показаны возможности повышения эффективности ряда технологических операций машиностроительного производства и некоторых видов теплотехнического оборудования за счет использования вихревых гидравлических теплогенераторов. Проведены исследования характера вихревых потоков и сопутствующих эффектов, установлены теплоэнергетические характеристики вихревых теплогенераторов. С

учетом результатов исследований разработаны варианты применения вихревых гидравлических теплогенераторов для автономного отопления и горячего водоснабжения помещений и технологического оборудования, приготовления эмульсий, очистки и мойки деталей при ремонте, после механической обработки, перед сборкой и нанесением гальванических покрытий. Приведены примеры практической реализации разработок. Показана перспективность разработки на основе термодинамического диспергатора-распылителя устройств для аэрации сточных вод и их окисления.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ашанин Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и транспортного электрооборудования Пензенского государственного университета.

Андреев Валерий Георгиевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой естественнонаучных и технических дисциплин Кузнецкого института информационных и управленческих технологий (филиала Пензенского государственного университета), лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники.

Большаков Герман Сергеевич – аспирант кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов Пензенского государственного университета.

Буряков Владимир Анатольевич – аспирант кафедры автоматики и телемеханики Пензенского государственного университета.

Виноградов Станислав Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химического машиностроения и электрохимического производства Пензенского государственного университета, заслуженный деятель науки РФ.

Волков Павел Юрьевич – доцент кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов Пензенского государственного университета.

Волчихин Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, ректор Пензенского государственного университета.

Воронов Александр Павлович – ведущий инженер ФГУП НИИМП.

Демин Станислав Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники Пензенской технологической академии.

Дубинин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Пензенского государственного университета.

Зинкин Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Пензенского государственного университета.

Казанцев Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры сварочного производства и материаловедения Пензенского государственного университета.

Кочкин Сергей Вячеславович – научный сотрудник ООО «НПП «Техника».

Кривенков Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и материаловедения Пензенского государственного университета.

Курносов Станислав Николаевич – аспирант кафедры транспортно-технологических машин и оборудования Пензенского государственного университета.

Малёв Борис Авраамович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и телемеханики.

Малышев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры износостойкости машин и оборудования и технологий конструкционных материалов Московского РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина.

Меньшова Светлана Борисовна – аспирант кафедры сварочного производства и материаловедения Пензенского государственного университета

Метальникова Ольга Константиновна – инженер кафедры химического машиностроения и электрохимического производства Пензенского государственного университета.

Мещеряков Виктор Афанасьевич – кандидат технических наук, профессор, первый проректор, представитель высшего руководства по качеству Пензенского государственного университета.

Миссал Дирк – аспирант кафедры техники автоматизации университета Мартина Лютера (Германия).

Мурашкина Татьяна Ивановна – доктор технических наук, профессор, начальник управления системой качества Пензенского государственного университета.

Пальченков Юрий Дмитриевич – кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем Пензенского государственного университета.

Прошкина Елена Николаевна – аспирант кафедры вычислительной техники Пензенского государственного университета.

Регеда Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент, начальник учебно-методического управления Пензенского государственного университета.

Розен Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства и материаловедения Пензенского государственного университета.

Сорокин Сергей Викторович – аспирант кафедры автоматики и телемеханики Пензенского государственного университета.

Суровицкая Галина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела планирования и анализа УСК Пензенского государственного университета.

Тарнопольский Александр Владимирович – кандидат технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин и оборудования Пензенского государственного университета.

Трилисский Владимир Овсеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлообрабатывающих станков и комплексов Пензенского государственного университета.

Ханиш Ханс-Михаэль – доктор наук, профессор, заведующий кафедрой техники автоматизации университета Мартина Лютера (Германия).

Чувыкин Борис Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры информационно-вычислительных систем Пензенского государственного университета.

Чугунов Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и материаловедения Пензенского государственного университета.

Шахов Эдуард Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-вычислительных систем Пензенского государственного университета.

Щербаков Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и телемеханики, проректор по научной работе Пензенского государственного университета.

Юрков Николай Кондратьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры Пензенского государственного университета.

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 – 250 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 второе полугодие 2008 г. можно также оформить по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ» «Газеты. Журналы» тематический раздел «Известия высших учебных заведений». Подписной индекс – 36966

– –

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 2008 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 «____» _____ 2008 г.