

# Автоматизация и Современные Технологии

---

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

---

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор  
В.Л. Белоусов

10  
—  
2011

РЕДАКЦИОННАЯ  
КОЛЛЕГИЯ:  
Бучаченко А.Л.  
Гусев А.А.  
Дегтярев Ю.И.  
Елисеев В.А.  
Иванов А.П.  
Мальцева С.В.  
Нефедов Е.И.  
Шебалин И.Ю.  
(заместитель главного редактора)

УЧРЕДИТЕЛИ:  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ  
ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

---

Журнал зарегистрирован 9 апреля  
1999 г. за № 018684 в Комитете  
Российской Федерации по печати

---

Журнал входит в перечень  
утверждённых ВАК РФ изданий  
для публикации трудов соискателей  
учёных степеней

---

ООО «Издательство Машиностроение»

РЕДАКЦИЯ:  
Шебалин И.Ю. — зам.главного редактора  
Гончарова Л.К. — научный редактор  
Осипова В.Г. — научный редактор  
Богус С.В. — секретарь

Адрес редакции:  
107076, Москва,  
Стромынский пер., 4  
Тел.: (499) 748 0290,  
E-mail: ast@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства:  
107076, Москва,  
Стромынский пер., 4  
Тел.: (499) 268 3858,  
факс: (499) 269 4897

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ

#### НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Тополянский П.А., Тополянский А.П., Соснин Н.А., Ермаков С.А. Автоматизация технологии финишного плазменного упрочнения .....	3
Баранов А.Н., Баранова Е.М., Булатов Л.А. Эксперимен- тальное определение стойкости пuhanсонов полутора- чего выдавливания .....	8

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ничков А.В., Префилов А.С., Ничков А.Г. Оптимизация параметров заборного конуса червячной модульной фрезы при нарезании цилиндрических зубчатых колёс .....	13
Хубаев Г.Н., Широбокова С.Н., Титаренко Е.В., Ткачен- ко Ю.В. Формализация и программное обеспечение процесса конвертирования IDEF0-моделей в UML-диаг- раммы .....	18
Кузнецов С.А. Разработка специализированных САПР – глав- ное направление при создании высокоэффективных программных продуктов .....	29
Либерман Я.Л., Антропов М.С. Система фаззи-управления скоростью робокара .....	34

### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ]

Белоусов В.Л., Вершин В.Е., Вершин О.В. Производст- венное планирование по технологическим переходам на базе математического пакета Mathcad .....	42
Семенюта И.С. Исследование эффективности системы составления расписаний методами теории массового обслуживания .....	45

### ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов .....	48
-----------------------------	----

## CONTENTS

### AUTOMATION

#### OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Topolyanskiy P.A., Topolyanskiy A.P., Sosnin N.A., Ermakov S.A. Automation of the finishing plasma harden- ing technology .....	3
Baranov A.N., Baranova E.M., Bulatov L.A. Experimental resistance definition of the half-hot extrusion punch .....	8

### MODERN TECHNOLOGIES

Nichkov A.V., Prefilov A.S., Nichkov A.G. Characteristic optimization of the modular worm hob lead taper when cylindrical gears cutting .....	13
Khubaev G.N., Shirobokova S.N., Titarenko E.V., Tkachen- ko Yu.V. IDEF0-models conversion process formalization and software in UML-diagrams .....	18
Kuznetsov S.A. Special САРР (ADS) development – princi- pal direction when designing high-performance program product .....	29
Liberman Ya.L., Antropov M.S. The fuzzy-control system of speed robocar .....	34

### ECONOMICS AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC AKTIVIES

Belosov V.L., Vershin V.E., Vershin O.V. Technological passes production planning from a mathematical package Mathcad .....	42
Semenyuta I.S. Schedule making efficiency research by methods of the mass service theory .....	45

### SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review .....	48
--------------------------	----

**Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении  
(индекс по каталогу «Роспечать» — 70537, по каталогу «Пресса России» — 27838, по «Каталогу российской прессы  
«Почта России» — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru),  
на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru) (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места);  
телефон для справок (499) 269 6600, 269 5298**

Художественный редактор Галицина Т.Н.  
Компьютерный набор Путинов В.Н.  
Компьютерная верстка Тугаринов А.А.

Набрано в ФГБНУ “Научно-исследовательский  
институт – Республиканский исследовательский  
научно-консультационный центр экспертизы”  
Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13. Тел.: (499) 795 1789

Сдано в набор 28.07.11. Подписано в печать 27.09.11.  
Формат 6088 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 5,88. Уч. изд. л. 7,0. Заказ 680. Цена свободная

Отпечатано в ООО «Подольская Периодика»  
142110, Московская обл., г. Подольск,  
ул. Кирова, 15

**Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна  
при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов  
ссылка на журнал «Автоматизация и современные технологии» обязательна.  
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель**

ООО «Издательство Машиностроение»,  
«Автоматизация и современные технологии», 2011 г.



## АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 65.011.56

**П.А. Тополянский**, канд. техн. наук, доц., **А.П. Тополянский**,  
**Н.А. Сосин**, д-р техн. наук, проф., **С.А. Ермаков**, канд. техн. наук, доц.  
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

conf@plasmacentre.ru

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

*Показано использование плазменной струи как датчика и дополнительного источника микротока, обеспечивающих автоматизацию контроля толщины наносимого покрытия в реальном масштабе времени.*

**Ключевые слова:** плазменная технология, нанопокрытие, плазменная струя, датчик, автоматизация контроля, толщина наносимого покрытия.

*Plasma jet utilization as transducer and additional microcurrent source that provide the control automation of the deposited coating thickness in the real time scale is shown.*

**Key words:** plasma technology, nanocoating, plasma jet, transducer, control automation, deposited coating thickness.

Технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) обеспечивает нанесение износостойких нанопокрытий с помощью электродугового плазмотрона без применения вакуума, отличается мобильностью и малым энергопотреблением (порядка 5 кВА) [1].

Наносимое покрытие на основе системы Si—O—C—N в технологии ФПУ при типичных скоростях перемещения плазменной струи 10–100 мм/с формируется слоями толщиной 30–3 нм. Общая толщина покрытия, дающего значимый эффект повышения эксплуатационной стойкости, составляет 0,5–2 мкм (рис. 1).

Анализ распределения атомов элементов по толщине нанесённого покрытия, проведённый с помощью Оже-электронной спектроскопии, позволяет условно выделить три зоны (рис. 2).

В поверхностном слое покрытия протяжённостью 0,05–0,5 мкм (первая зона) наблюдаются значительные колебания концентрации углерода, кислорода и кремния, что характеризует не только неоднородность состава, но и некоторую шероховатость поверхности покрытия в пределах контрольной площадки размером 2×2 мм при последовательном травлении покрытия по глубине ионной бомбардировкой.

Вторая зона наиболее стабильна по составу. Соотношение концентраций атомов Si, C и O, а также анализ спектров углерода указывают на то, что около 20–30 % кремния может быть связано в соединение SiC, а около 70–80 % – в SiO<sub>2</sub> (с некоторым отличием от стехиометрического состава).

В третьей, переходной зоне наблюдается плавное снижение концентрации элементов. Ширина этой зоны порядка 0,5 мкм.

Рентгенофазовый анализ нанопокрытия проводился на рентгеновском дифрактометре фирмы «Rigaku» (Япония). На полученных рентгенограммах пики Si, SiC, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и т. д., не относящихся к материалу подложки, отсутствовали. С учётом скорости охлаждения наносимого покрытия порядка ( $10^{10}$ – $10^{12}$ ) К/с [1] можно сделать вывод, что наносимое покрытие формируется в аморфном виде.

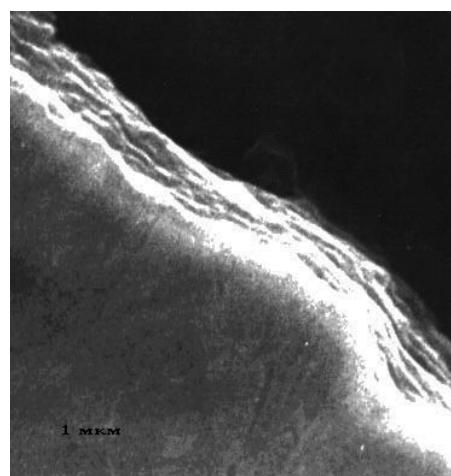


Рис. 1. Поперечный шлиф поверхности с покрытием толщиной 2 мкм ( $\times 5000$ )

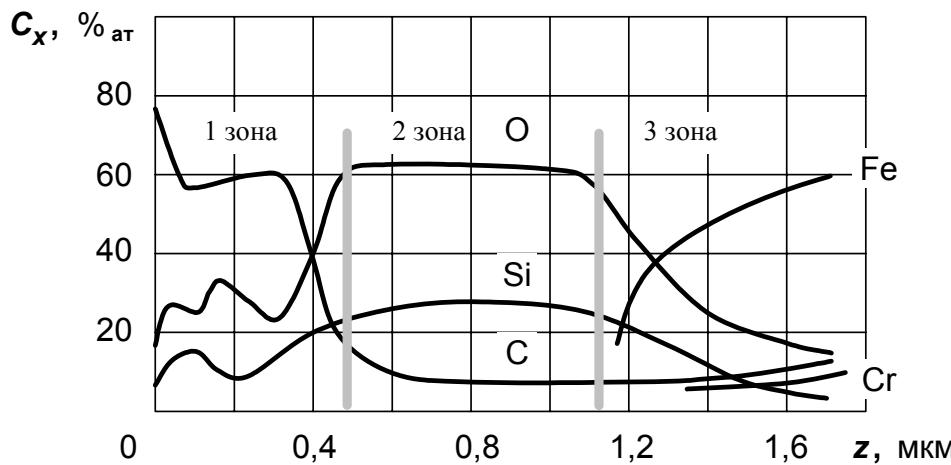


Рис. 2. Профили распределения атомов элементов по толщине упрочняющего нанопокрытия

Зависимости напряжения между анодом плазмотрона и обрабатываемым изделием  $U_{\text{аи}}$  и микротока  $I_{\text{аи}}$ , протекающего по цепи: дополнительный источник питания – анод плазмотрона – плазменная струя – изделие от напряжения ДИП и расстояния сопло плазмотрона – изделие

$l_{\text{си}}$ , мм	$U_{\text{ДИП}} = 0$ В		$U_{\text{ДИП}} = 10$ В		$U_{\text{ДИП}} = 20$ В		$U_{\text{ДИП}} = 30$ В	
	$U_{\text{аи}}$ , В	$I_{\text{аи}}$ , мА	$U_{\text{аи}}$ , В	$I_{\text{аи}}$ , мА	$U_{\text{аи}}$ , В	$I_{\text{аи}}$ , мА	$U_{\text{аи}}$ , В	$I_{\text{аи}}$ , мА
5	-3,9	13,6	-0,8	35,5	3,6	56,1	6,9	83,3
10	-2,7	9,4	3,3	23,3	12,1	27,2	16	53,03
15	-1,7	7,4	5,8	13,6	15	16,7	24,3	19,7
20	-0,7	3,3	7,3	10,2	16,5	11,2	26,5	12,7
25	-0,6	1,9	8,3	5,8	17,6	7,9	27,6	9,2
35	-0,2	0,8	9,3	2,7	18,9	3,6	28,8	4,5

По методике работы [2] проводились измерения комплексного сопротивления наносимого нанопокрытия на основе анализа электротехнической схемы замещения, включающей ёмкость и сопротивление. Было установлено, что удельное электрическое сопротивление характеризует плазменное упрочняющее нанопокрытие системы Si–O–C–N как диэлектрик ( $\rho = 10^6$  Ом·м).

Проведённые исследования позволили выявить закономерности изменения микротока  $I_{\text{аи}}$ , протекающего по цепи: дополнительный источник питания (ДИП) – анод плазмотрона – плазменная струя – изделие при использовании в качестве датчика самой плазменной струи.

В таблице приведены значения  $I_{\text{аи}}$  и  $U_{\text{аи}}$  при различных расстояниях между соплом плазмотрона и изделием  $l_{\text{си}} = (5–35)$  мм и разном выходном напряжении дополнительного источника питания  $U_{\text{ДИП}} = (0–30)$  В.

Из таблицы видно, что наиболее информативным параметром является микроток  $I_{\text{аи}}$  во всём диапазоне нанесения покрытия и при разных выходных напряжениях дополнительного источника питания.

На рис. 3 показано изменение микротока в зависимости от выходного напряжения ДИП при постоянной дистанции  $l_{\text{си}} = 10$  мм. Из рис. 3 видно, что с увеличением выходного напряжения ДИП от 0 до 30 В микроток возрастает примерно в 5 раз и только в диапазоне от 10 до 20 В мало зависит от напряжения ДИП.

Таким образом, предварительные исследования показали, что наиболее перспективным для оценки изменения проводимости измерительной цепи при нанесении упрочняющего нанопокрытия является микроток при подключении к аноду плазмотрона дополнительного источника питания напряжением 10–20 В.

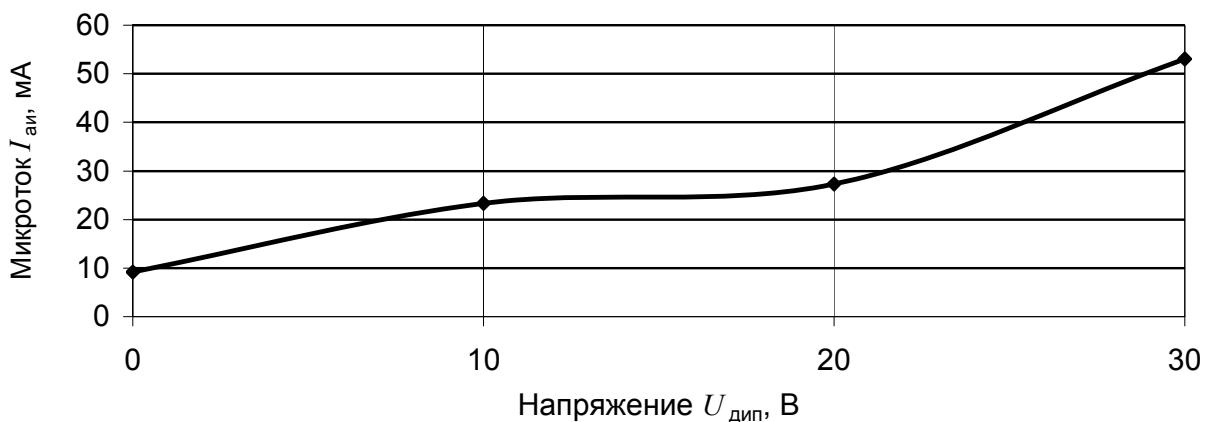


Рис. 3. Зависимость микротока от напряжения дополнительного источника питания при дистанции  $l_{\text{си}} = 10$  мм

Данный метод проверялся при нанесении покрытия на цилиндрическую фрезу диаметром  $d = 25$  мм.

На основании проведённых исследований и статистических экспериментальных данных по повышению стойкости аналогичного инструмента минимум в 2 раза после упрочнения расчётное общее время нанесения покрытия определяется по формуле

$$t_{\text{об}} = S_p / P,$$

где  $S_p$  – расчётная площадь поверхности, подлежащая упрочнению;  $P$  – производительность процесса.

При нанесении покрытия толщиной  $F = 0,5$  мкм на локальный кольцевой участок производительность процесса  $P = 2,2/F = 4,4$  мм<sup>2</sup>/с ( $F$  измеряется в микрометрах).

Расчётная площадь упрочняемой поверхности  $S_p$  при длине рабочей зоны (по оси фрезы)  $l_{\text{раб}} = 120$  мм равна реальной (заданной) площади упрочнения  $S$ :

$$S_p = S = \pi d l_{\text{раб}} = 9425 \text{ мм}^2.$$

Расчётное общее время нанесения покрытия

$$t_{\text{об}} = 9425 / 4,4 = 2142 \text{ с.}$$

Число локальных (кольцевых) участков упрочнения на длине цилиндрической рабочей зоны 120 мм равно  $K = 120/8 = 15$  участков. Расчётное время обработки одного локального (кольцевого) участка равно  $t_{\text{уц}} = 2142 / 15 = 142,8$  с.

Процесс нанесения покрытия на фрезу осуществлялся при режиме: ток сжатой дуги  $I = 100$  А, расход плазмообразующего газа  $G_{\text{пг}} = 2,4$  л/мин, расход защитного газа  $G_{\text{зг}} = 1,2$  л/мин, расход транспортирующего газа  $G_{\text{тг}} = 1,1$  л/мин, рас-

стояние между соплом плазмотрона и изделием  $l_{\text{си}} = 17$  мм, напряжение дополнительного источника питания 20 В.

В процессе нанесения покрытия автоматически измерялось значение микротока, протекающего по цепи: дополнительный источник питания – анод плазмотрона – плазменная струя – изделие в зависимости от времени нанесения покрытия. На рис. 4 приведена зависимость значений микротока при вращении фрезы без осевого смещения плазмотрона.

Таким образом, установлено, что по мере роста толщины покрытия микроток нелинейно уменьшается.

Как видно из графика (рис. 4), на одном локальном участке время нанесения покрытия, оцениваемое по среднестатистическому микро-

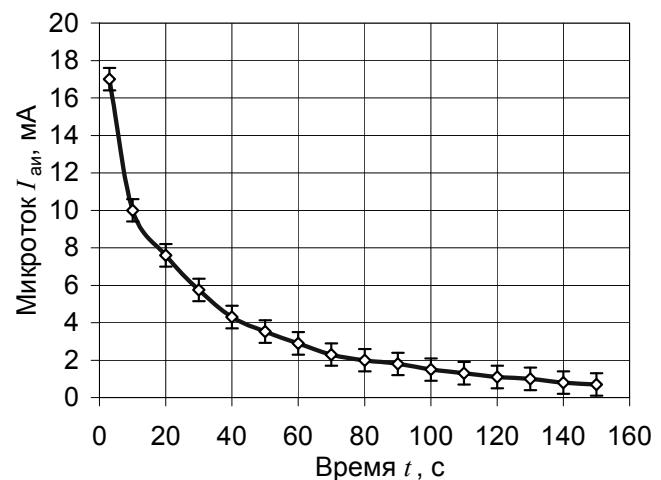
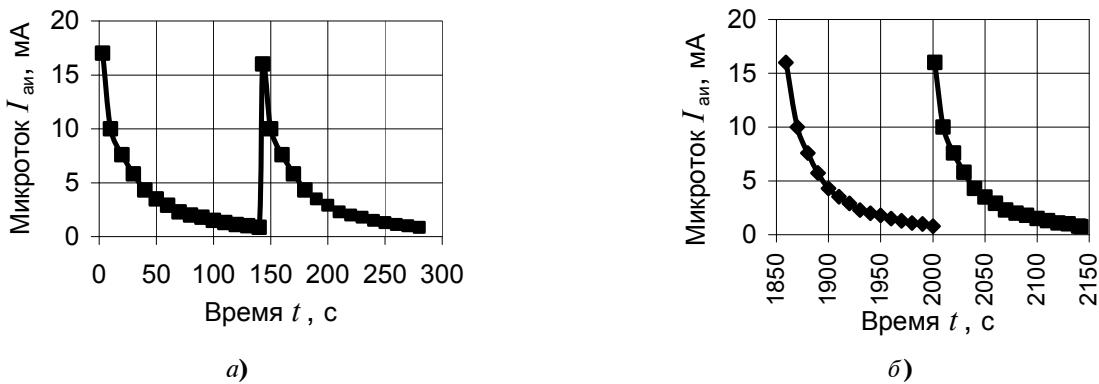
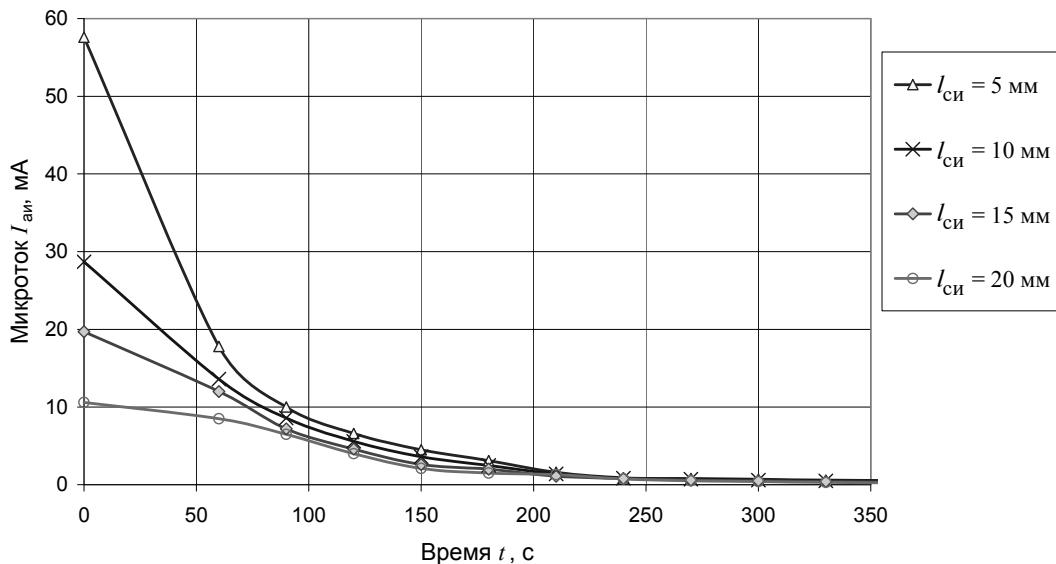


Рис. 4. Зависимость микротока в цепи анод плазмотрона – изделие от времени нанесения покрытия на одном локальном участке при упрочнении цилиндрической фрезы по кольцевой траектории



**Рис. 5. Изменение микротока в разных промежутках времени нанесения покрытия на локальные кольцевые участки фрезы:**  
а – первый и второй участки; б – четырнадцатый и пятнадцатый участки



**Рис. 6. Изменение микротока в зависимости от длительности процесса  $t$  и расстояния сопло плазмотрона – изделие  $l_{\text{си}}$  при нанесении покрытия на образцы из стали Х12 при температуре предварительного подогрева 60–80 °C**

току уставки 0,6–0,9 мА, составляет в среднем приблизительно 150 с и отличается на 5 % от расчётного времени обработки одного локального участка (142,8 с) для толщины покрытия 0,5 мкм.

На рис. 5 показано изменение микротока в разные промежутки времени нанесения покрытия на всю фрезу. В процессе нанесения покрытия на локальные участки фрезы при шаговом перемещении по оси вращения с шагом 8 мм микроток  $I_{\text{au}}$  в начальный момент на всех участках, начиная с первого и заканчивая последним, пятнадцатым, составляет 17 мА, в процессе дальнейшего нанесения покрытия на каждом локальном участке  $I_{\text{au}}$  плавно падает до 0,7 мА.

Таким образом, на примере нанесения покрытия на фрезу показана эффективность разрабо-

танного метода, который в реальном масштабе времени обеспечивает контроль нанесения покрытия.

Также исследовалось влияние дистанции нанесения покрытия и температуры предварительного и сопутствующего подогрева изделия на характер изменения микротока. Эксперименты проводились на образцах из трёх материалов: углеродистая сталь У8, хромистая сталь Х12, быстрорежущая сталь Р6М5. Образцы представляли собой пруток диаметром 40 мм, длиной  $l = 80$  мм, изготовленные механической обработкой с последующей термической обработкой и шлифовкой цилиндрической поверхности.

Процесс нанесения покрытия проводился при том же режиме (см. выше).



**Рис. 7. Процесс финишного плазменного упрочнения фрезы (а) и прибор контроля нанесения покрытия (б)**

Образцы из сталей У8 и Х12 предварительно нагревались до температуры 60–80 °С, а образцы из стали Р6М5 – до 180–200 °С. Покрытие наносили на образцы при разных расстояниях сопло плазмотрона – изделие:  $l_{си} = (5; 10; 15; 20)$  мм.

На рис. 6 представлены графики изменения микротока в зависимости от длительности нанесения покрытия и дистанции сопло плазмотрона – изделие при обработке образцов диаметром 40 мм из стали Х12. Как видно из рис. 6, длительность нанесения покрытия для микротока уставки 0,6–0,9 мА практически не зависит от дистанции обработки и находится в диапазоне 210–270 с при расчётом общем времени обработки 229 с для толщины покрытия 0,5 мкм.

При нанесении покрытия на образцы, изготовленные из сталей Х12, У8, Р6М5 при дистанции нанесения покрытия от 5 до 20 мм, зависимости  $I_{ai}(t)$  (см. рис. 6) практически показывают одинаковую длительность обработки, которая находится в отмеченном выше диапазоне. Таким образом, отсутствует зависимость длительности нанесения покрытия от химического состава материала упрочняемого изделия.

На рис. 7, а показан процесс финишного плазменного упрочнения фрезы, а на рис. 7, б – общий вид прибора автоматического контроля к

установке для плазменного нанесения упрочняющего нанопокрытия, в котором реализован описанный принцип контроля процесса ФПУ.

Таким образом, из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

изменение дистанции нанесения покрытия от 5 до 20 мм и температуры предварительного и сопутствующего подогрева изделия от 60 до 200 °С не влияет на закономерности изменения микротока;

выявленные закономерности изменения микротока, протекающего по цепи дополнительный источник питания – анод плазмотрона – плазменная струя – обрабатываемое изделие, при увеличении толщины наносимого покрытия могут быть использованы для автоматизации контроля процесса нанесения упрочняющего нанопокрытия в реальном масштабе времени.

#### **Библиографические ссылки**

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во политехн. ун-та. СПб., 2008. 406 с.

2. Калмыков А.В., Тополянский П.А. Исследование электрических характеристик тонких кремнийуглеродосодержащих покрытий // Дефектоскопия. 2003. № 10. С. 38–44.

## **Уважаемые читатели!**

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 621.983.4: 621.9.073: 681.3.06

**А.Н. Баранов**, канд. техн. наук, доц., **Е.М. Баранова**, канд. техн. наук, доц.,  
**Л.А. Булатов**, канд. техн. наук, доц. (Тульский государственный университет)

stroymaster@tula.net

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПУАНСОНОВ ПОЛУГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

*Указаны особенности конструкции установки для определения значений стойкости образцов-пуансонов, приведена методика регистрации параметров процесса полугорячего выдавливания с указанием названий всех регистрирующих приборов. Описана подготовка и проведение эксперимента по определению стойкости образцов-пуансонов.*

**Ключевые слова:** эксперимент, стойкость, пuhanсон, полугорячее выдавливание, трещина, установка, термомеханика, усталость.

*Features of the facility design for punch-pattern resistance value definition are pointed. Characteristic registration methodology of the half-hot extrusion process with all recording equipments name indication is adduced. Experiments preparation and realization for punch-pattern resistance definition are described.*

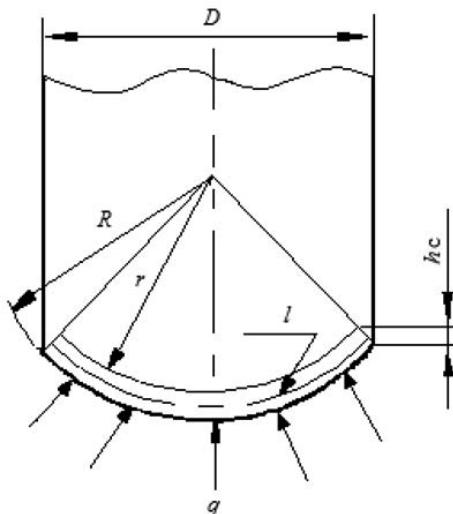
**Key words:** experiment, resistance, punch, half-hot extrusion, crack, facility, thermomechanics, fatigue.

Как показывает практика, при обработке металлов давлением наиболее неблагоприятным режимом для инструмента является диапазон температур полугорячего выдавливания. В процессе полугорячего выдавливания максимально подвержены разрушению пуансоны, испытывающие циклическое термосиловое нагружение. В условиях массового производства изготовление пуансонов становится серийным, что значительно повышает себестоимость изделий, получаемых полугорячим выдавливанием. В настоящее время существует ряд производственных наработок по стойкости инструмента. Однако имеющиеся данные неприменимы к современным технологическим процессам, поскольку для обеспечения наибольшей их технологичности необходимо прогнозирование стойкости пуансонов, изготовленных из различных материалов и работающих при иных технологических режимах [1].

Обоснованное прогнозирование стойкости позволит оптимизировать расходы, связанные с изготовлением инструмента для процесса полугорячего выдавливания.

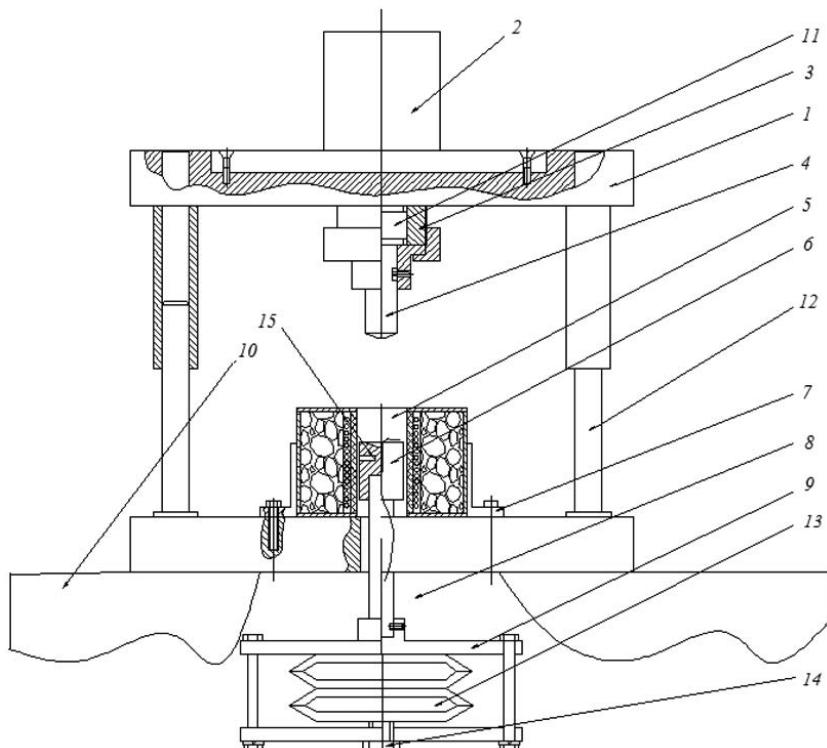
Вопрос определения стойкости пуансонов можно решить экспериментальным путём с применением установки для определения стойкости пуансонов полугорячего выдавливания при повышенных температурах. Предложенная установка позволяет по известным или предварительно рассчитанным характеристикам технологического режима полугорячего выдавливания, температуре нагрева заготовки, максимальной удельной силе и производительности определять стойкость образцов-пуансонов.

Для оценки термомеханической стойкости пуансонов с применением установки использовался метод физического моделирования процесса полугорячего выдавливания, основанный на испытаниях универсального образца-пуансона (рис. 1) на термомеханическую усталость и учиты-



**Рис. 1. Схема образца-пуансона:**

*D – диаметр образца-пуансона; R – наружный радиус скругления приконтактного слоя; r – внутренний радиус скругления приконтактного слоя; l – срединный радиус скругления приконтактного слоя;  $h_c$  – толщина приконтактного слоя;  $q$  – удельная сила, действующая на приконтактный слой пуансона*



**Рис. 2. Штамп установки для определения стойкости пуансонов полугорячего выдавливания**

вающий реальные условия взаимодействия контактирующих инструмента и нагретой заготовки.

При моделировании процесса полугорячего выдавливания использовался метод подобия, заключающийся в замене наиболее нагруженной рабочей поверхности пуансона пропорциональной по площади поверхностью шарового сегмента торца образца-пуансона. Метод подобия использовался для обеспечения одинаковых по величине воздействий теплового и силового нагружения на каждую единицу площади [2].

На рис. 2 показана схема штампа установки для определения стойкости пуансонов полугорячего выдавливания.

В соответствии с рис. 2 штамп 1 крепится хвостовиком 2 к ползуну пресса. К верхней плите штампа с помощью пуансонодержателя 3 и винта прикреплён быстрозъёмный образец-пуансон 4. На нижней плите установлено нагревательное устройство 5 (печь сопротивления), предназначенное для нагрева ударной пяты 6. Нагревательное устройство установлено на нижнюю плиту штампа с помощью креплений 7, которые обеспечивают надёжную фиксацию и центрирование печи. Обеспечиваемая нагревательным устройством температура регулируется изменением напряжения, подаваемого через трансформатор на спираль печи. Ударная пята, выполненная из термостойкого сплава ЖСб-У, размещена внутри в центре нагревательного устройства. Нижней частью она закре-

плена на толкателе 8, который служит для передачи силы на демпфирующее устройство 9. Толкатель связан с демпфирующим устройством через нижнюю плиту штампа и стол пресса 10. Мессдоза 11, предназначенная для измерения силы, действующей на пуансон, закреплена между образцом-пуансоном 4 и калёной прокладкой верхней плиты штампа. Этот штамп снабжён направляющими колонками и втулками 12 для обеспечения точности хода образца-пуансона.

Протарированное демпфирующее устройство 9, предназначенное для воздействия на образец-пуансон 4 в процессе нагружения удельной силы сопротивления со стороны ударной пяты 6, равной удельной силе выдавливания, состоит из упругого элемента 13, размещенного в специальном блоке, и регулировочного болта 14. Необходимое значение удельной силы устанавливается с помощью регулировочного болта 14, расположенного на демпфирующем устройстве. Регулируется удельная сила за счёт изменения силы поджатия упругого элемента. Температура нагрева ударной пяты 6 контролируется с помощью термопары 15.

Предварительно перед испытаниями образцов-пуансонов на стойкость определяется технологический режим операции. Устанавливается число ходов ползуна пресса в минуту, ударная пята прогревается до устойчивой температуры, фиксируется удельная сила сопротивления деформирующего устройства, развивающаяся при малом

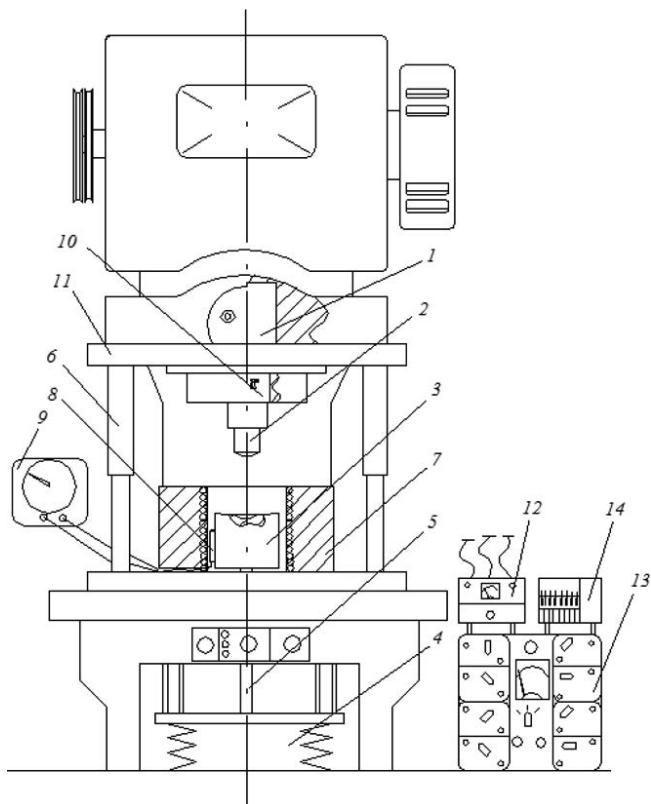


Рис. 3. Установка для определения стойкости пuhanсонов

ходе (4–5 мм) ударной пятки под действием образца-пуансона в конце его рабочего хода. Установка базируется на механическом прессе К2130Б с силой 1 МН [3, 4].

На рис. 3 показана схема смонтированной установки.

Хвостовик 1 крепится в ползуне пресса. Во время рабочего хода вниз образец-пуансон 2 входит в контакт с рабочей поверхностью гнезда ударной пятки 3 и перемещается совместно с ней на 4–5 мм, подвергаясь тепловому и силовому воздействию за время, соответствующее реальному процессу контакта инструмента и заготовки при полугорячем выдавливании. Перемещение передаётся на демпфирующее устройство 4 через толкателем 5. Центрирование движения образца-пуансона осуществляется направляющими колонками штампа 6. Тепловое воздействие обеспечивается нагревательным устройством 7. Температура контролируется термопарой 8 и пирометрическим милливольтметром с двухпозиционным регулирующим устройством 9 типа МР-64-02.

Основная погрешность показаний потенциометра на всех отметках шкалы при температуре окружающего воздуха 20 °С не превышает  $\pm 0,5\%$ . Выпуклая сегментная поверхность образца-пуансона и соответствующая вогнутая поверхность

ударной пятки способствуют их полному контакту и воздействию удельной силы сопротивления по нормали к поверхности образца-пуансона. Действующая на образец-пуансон 2 сила задаётся изменением жёсткости демпфирующего устройства 4 и регистрируется с помощью месседзы 10, установленной между образцом-пуансоном 2 и верхней плитой 11, передающей импульс через усилитель 12 на тензостанцию 13. Значения силы регистрируются графически на самопищущем быстродействующем приборе (Н327-5) 14. Циклические силовые нагрузки записываются с помощью тензодатчиков, наклеенных на месседзу. Силовой режим варьируется изменением силы сопротивления демпфирующего узла, основу которого составляют пластинчатые пружины [5].

Варьирование технологическими режимами позволяет определять стойкость любого типа пуансонов, работающих в различных режимах полугорячего выдавливания. Уникальность установки заключается в том, что с помощью описанного выше штампа возможна реализация режимов полугорячей обработки металлов давлением.

В ходе эксперимента деформируемым материалом являлась ударная пятка из жаропрочного материала ЖСб-У. Температура нагрева ударной пятки измерялась термопарой ВР (А)-2, подключённой к милливольтметру. Значения температуры устанавливались по градуировочному графику, представляющему собой зависимость напряжения от температуры (рис. 4).

Пята предварительно нагревается в печи сопротивления до нужной температуры, которая поддерживается автоматически в течение периода испытаний. Точность контролируемой температуры составляет  $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Температура испытаний принимается от 600 до 900  $^{\circ}\text{C}$ . Экспериментальные испытания на термомеханическую усталость образцов-пуансонов проводились на установке производительностью 40 и 80 ходов в минуту. Испытывались три марки стали – Р6М5, 4Х5МФС, 3Х3М3Ф. Перед экспе-

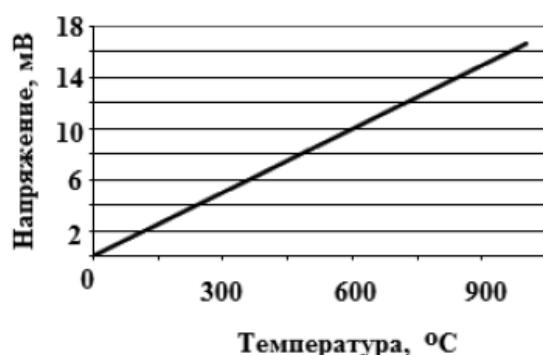


Рис. 4. Зависимость напряжения от температуры

риментом на установке выставлялись требуемые значения технологических параметров. Через 1 ч работы установки в автоматическом режиме (при мерно 2000 циклов) пресс выключался. Испытываемый образец-пуансон извлекался из установки и подвергался визуальному осмотру при сильном освещении и десятикратном увеличении. Результатом обследования являлись разгарные трещины. Если трещины имели зарождающийся характер, испытания прекращались, и делалось заключение о полной стойкости с увеличением числа циклов в 1,85 раза. Если трещины имели развитые характер (глубина, протяжённость), время испытаний нового образца уменьшалось до 30 мин. Если трещины не обнаруживались, испытания продлевались с последующим осмотром образца-пуансона через каждые 50 циклов [5].

По результатам эксперимента были получены уравнения регрессии, позволяющие определять

значения стойкости пуансонов полугорячего выдавливания, изготовленных из сталей Р6М5, 4Х5МФС, 3Х3М3Ф:

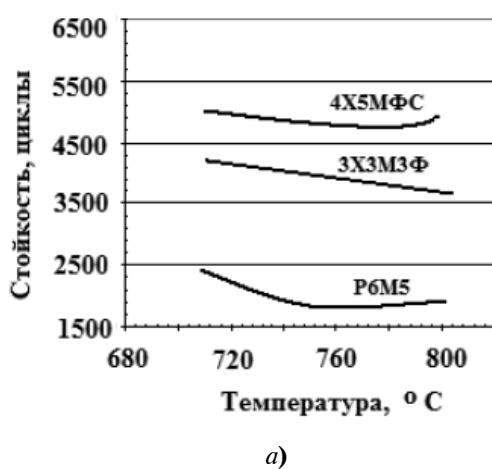
$$N = 7075 - 3,375t - 2,25q - 40,9375n;$$

$$N = 7575 - 1,875t - 1,25q - 18,125n;$$

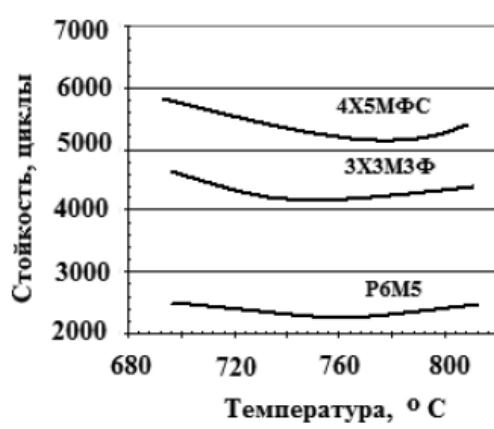
$$N = 7450 - 2,375t - 1,5q - 37,1875n,$$

где  $t$  – температура нагрева образца-пуансона;  $q$  – удельная сила, действующая на образец-пуансон;  $n$  – количество циклов до возникновения трещины.

Анализ уравнений регрессии позволил сделать вывод о том, что в большей степени на разрушение рабочей поверхности пуансонов влияет удельная сила процесса и производительность, тогда как температура на появление усталостных микротрещин оказывает второстепенное воздействие.

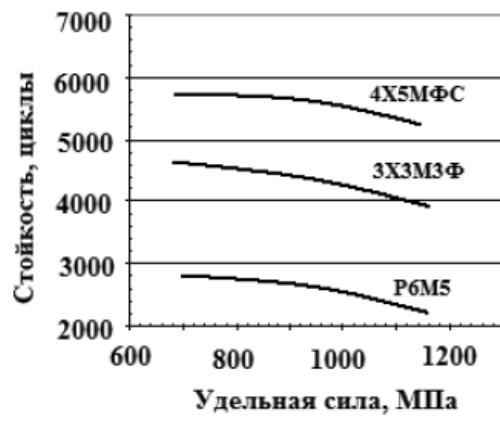


a)

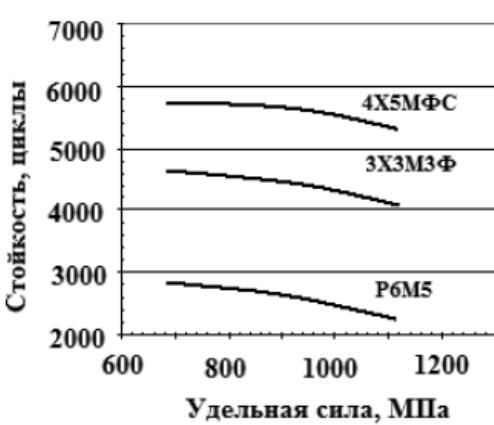


б)

**Рис. 5. Зависимость стойкости от температуры для различных сталей при фиксированной производительности:**  
а –  $q = 1100 \text{ МПа}, n = 80 \text{ мин}^{-1}$ ; б –  $q = 700 \text{ МПа}, n = 80 \text{ мин}^{-1}$

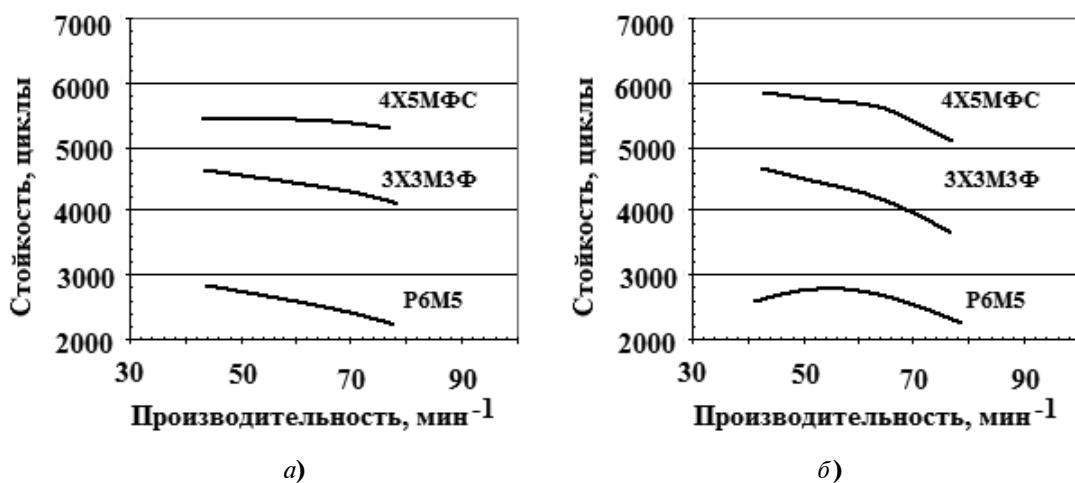


а)



б)

**Рис. 6. Зависимость стойкости от удельной силы для различных сталей при фиксированной производительности:**  
а –  $t = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}, n = 80 \text{ мин}^{-1}$ ; б –  $t = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}, n = 80 \text{ мин}^{-1}$



**Рис. 7. Зависимость стойкости от производительности для различных сталей при фиксированной удельной силе:**  
 а –  $t = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $q = 1100 \text{ MPa}$ ; б –  $t = 700 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $q = 1100 \text{ MPa}$

Результаты эксперимента по определению стойкости пuhanсонов представлены графиками зависимостей стойкости от технологических параметров исследуемого процесса (рис. 5–7).

Из приведённых зависимостей видно, что с увеличением значений основных параметров изучаемого процесса количество циклов до появления усталостной трещины (стойкость) уменьшается. Наибольшей стойкостью при одинаковых значениях технологических параметров обладает сталь 4ХМФС (5800 циклов), наименьшей – сталь Р6М5 (3250 циклов). Реализация полученных результатов исследования необходима для оптимизации технологических параметров полугорячего выдавливания по полученной характеристике стойкости, а также для выбора соответствующей марки инструментальной стали с целью повышения экономического эффекта путём сокращения затрат на производство единицы циклов.

#### Библиографические ссылки

1. **Баранов А.Н.** Методика экспериментального прогнозирования стойкости пuhanсонов полугорячего выдавливания: Сб. материалов науч.-техн. конференции

«Наука глазами молодых учёных XXI века». Тула: ТулГУ, 2005. С. 57–61.

2. **Баранов А.Н.** Программное обеспечение для расчёта стойкости пuhanсонов полугорячего выдавливания. Изв. вузов. Серия: Машиностроение, системы приводов и деталей машин. Сб. трудов науч.-техн. конф. «Творческое наследие В.Ф. Прейса». Тула: ТулГУ, 2006. С. 279–283.

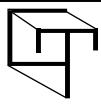
3. **Лялин В.М., Баранов А.Н., Петров В.И.** Экспериментальное исследование стойкости пuhanсонов полугорячего выдавливания. Изв. вузов. Серия: Машиностроение, системы приводов и деталей машин. Сб. трудов науч.-техн. конф. «Творческое наследие В.Ф. Прейса». Тула: ТулГУ, 2006. С. 291–295.

4. **Лялин В.М., Баранов А.Н., Петров В.И.** Экспериментальное определение стойкости пuhanсонов полугорячего выдавливания с применением разработанного программного обеспечения. Изв. ТулГУ. Серия: Механика деформированного твёрдого тела и обработка металлов давлением. Вып. 1. Тула: ТулГУ, 2006. С. 272–280.

5. **Патент 2284024 РФ МПК G01N 3/18 G01M 13/00.** Установка для определения стойкости пuhanсонов, предназначенных для выдавливания при повышенных температурах/ В.М. Лялин, В.И. Петров, А.Н. Баранов. Тульский государственный университет. № 2005116950; Заяв. 02.06.2005; Опубл. 20.09.2006, Бюл. № 26.

#### Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присыпаемых для публикации,  
 можно найти на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)



УДК 621.9.02

**А.В. Ничков**, канд. техн. наук, доц., **А.С. Префилов**, аспирант, **А.Г. Ничков**, докт. техн. наук, проф. (Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

nav8080@rambler.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАБОРНОГО КОНУСА ЧЕРВЯЧНОЙ МОДУЛЬНОЙ ФРЕЗЫ ПРИ НАРЕЗАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

*Приведены результаты исследования процесса нарезания зубьев колеса червячной фрезой с заборным конусом. Рассмотрено влияние параметров (угла и местоположения) заборного конуса на размеры зоны резания, длину загруженного участка фрезы, путь врезания, размеры срезаемых слоев и износ зубьев фрезы. На одном из примеров показана последовательность решения задачи по определению оптимального заборного конуса червячной фрезы и его местоположения для обеспечения наименьшего износа фрезы при нарезании зубьев колеса.*

**Ключевые слова:** зубофрезерование, червячная фреза, заборный конус, зона резания, износ.

*Research results of the gear teeth cutting by worm hob with lead taper are adduced. Lead taper parameters influence (angle and location) on cutting zone size, loaded hob zone length, penetration way, sliced layers sizes and hob teeth wear is considered. Example of the task decision sequence at optimal worm hob lead taper and its location definition for the least hob wear when gear teeth cutting is shown.*

**Key words:** hobbing, worm hob, lead taper, cutting zone, wear.

Червячные модульные фрезы с заборным конусом на входной стороне применяют, как правило, при недостаточной их длине для избежания перегрузки зуба, первым вступающим в резание, а на выходной стороне – во избежание измельчения срезаемых слоев. При этом не уделяется достаточного внимания износу зубьев червячной фрезы, её эксплуатационным возможностям, циклам обработки зубчатых колес, возможностям осевых перестановок фрезы в зависимости от угла заборного конуса, его длины и местоположения при нарезании зубьев колеса.

В данной работе вопрос об оптимизации параметров заборного конуса и его местоположения при зубофрезеровании рассматривался с позиций минимизации износа фрезы и возможности улучшения её эксплуатационных возможностей. Исследование проведено при следующих исходных параметрах зубофрезерования: число нарезаемых зубьев колеса  $z_1 = 80$ , модуль  $m = 9$  мм, угол наклона зубьев колеса  $\beta = 29^\circ$ , материал колеса сталь 34ХН1М, фреза однозаходная диаметром 140 мм и длиной режущей части 140 мм, осевая подача  $s_0 = 2$  мм/об. Угол заборного конуса червячной фрезы принимался равным 0, 5 и  $10^\circ$ . Расстояние  $L_{\text{ц}}$ , от межосевого перпендикуляра до конца цилиндрической части фрезы и начала заборного ко-

нуса принималось равным 0,35 и 70 мм. Исследование проводилось для одной из технологических схем зубофрезерования: направление витков фрезы и зубьев колеса одноименное, подача попутная.

Для решения поставленной в работе задачи использована расчётно-экспериментальная методика, изложенная в работе Ничкова А.Г. «Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колёс червячными фрезами» (Автореф. дис. докт. техн. наук. Тула, 1991), в основе которой лежит понятие о зоне резания как пространстве, в пределах которого происходит резание вершинными кромками зубьев фрезы, размерах срезаемых слоёв и влиянии последних на износ зубьев фрезы. Согласно этой методике было разработано программное обеспечение для ЭВМ и выполнены расчеты зон резания, размеров срезаемых слоев, износа зубьев червячной фрезы, построены графики распределения износа по зубьям фрезы в зависимости от параметров и местоположения заборного конуса и проведён сравнительный анализ результатов исследования по определению оптимального заборного конуса при нарезании зубьев колеса. Ниже приведены результаты проведённого исследования.

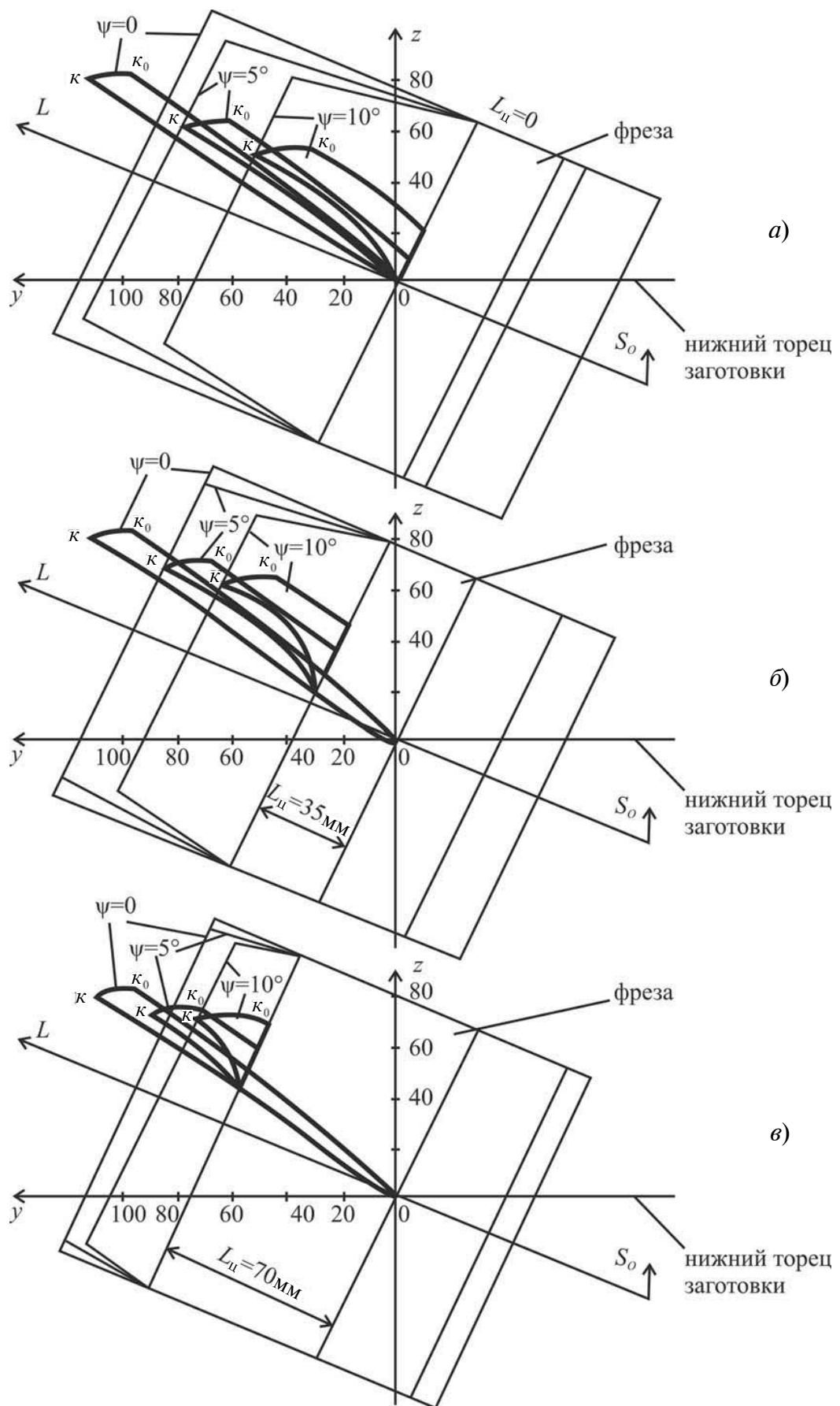


Рис. 1. Влияние параметров заборного конуса на зону резания

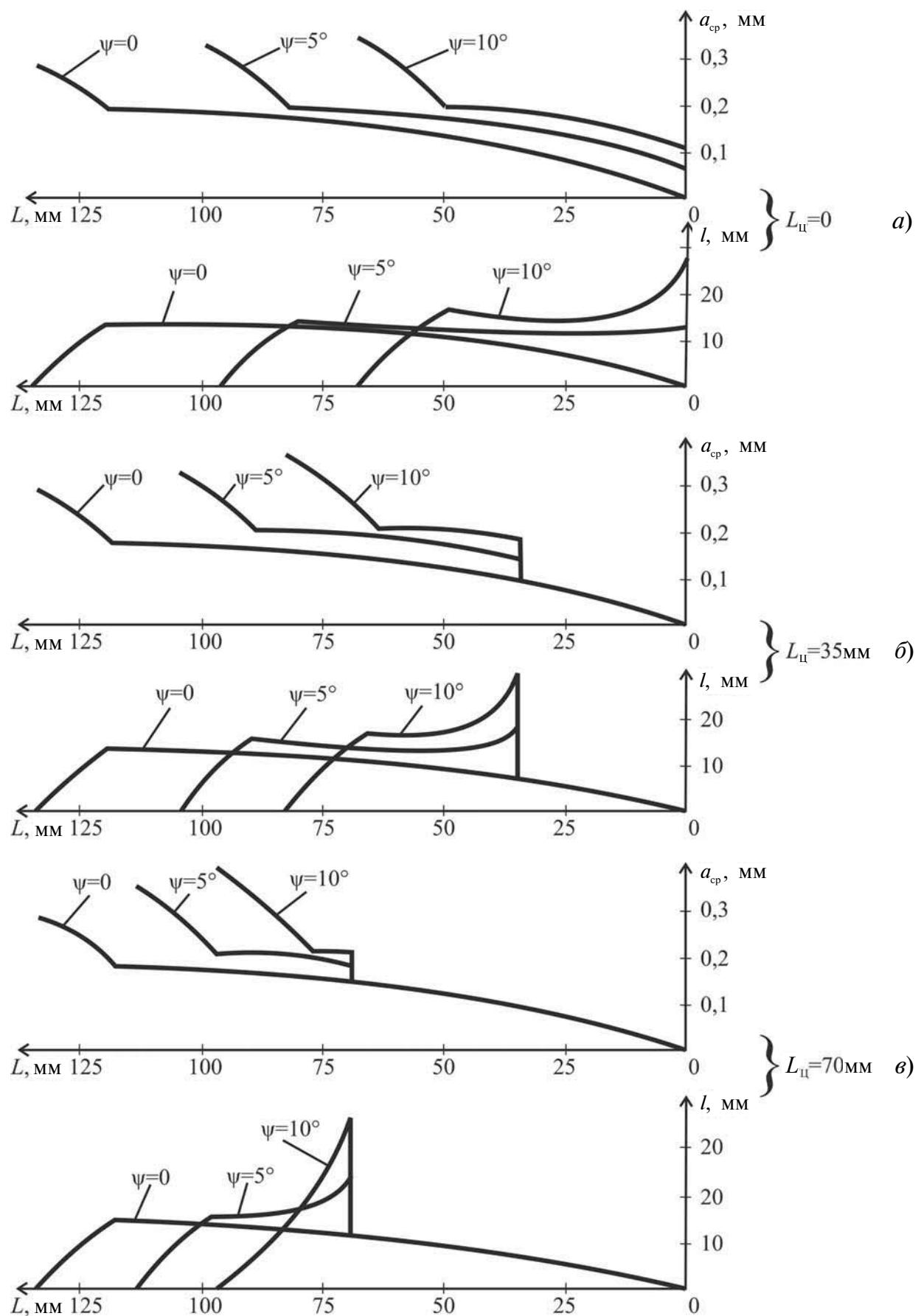


Рис. 2. Влияние параметров заборного конуса на размеры срезаемых слоев

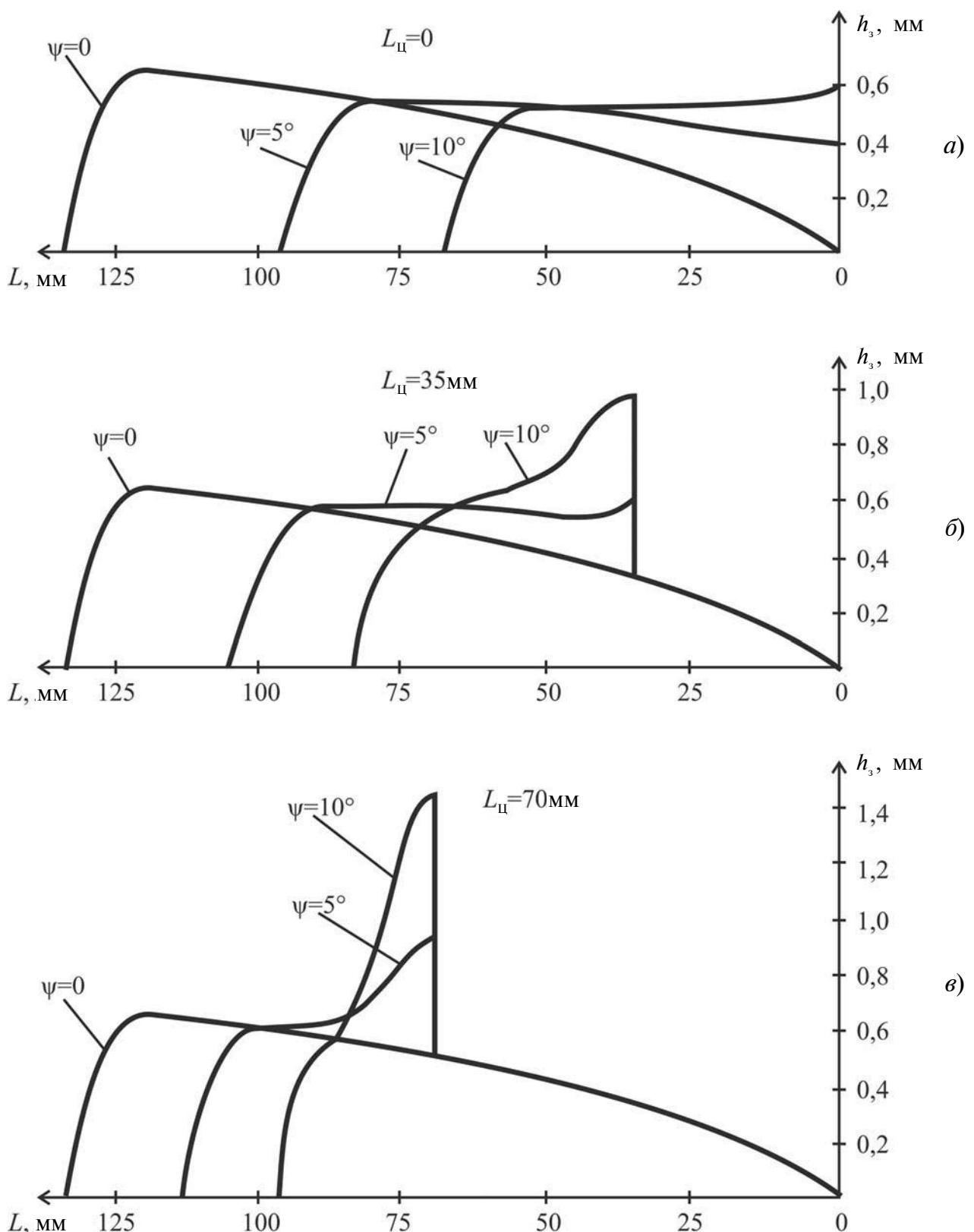


Рис. 3. Влияние параметров заборного конуса на износ зубьев червячной фрезы

На рис. 1 изображены зоны резания ( $kk_00$ ), в пределах которых происходит срезание слоёв вершинными кромками зубьев червячной фрезы для трёх местоположений заборного конуса, характеризуемых величиной  $L_{\text{ц}}$ , и трёх значений его угла  $\psi = 0, 5$  и  $10^\circ$ :  $L_{\text{ц}} = 0$  мм (рис. 1, *a*),  $L_{\text{ц}} = 35$  мм (рис. 1, *б*),  $L_{\text{ц}} = 70$  мм (рис. 1, *в*). Из рис. 1 виден характер изменения зон резания с изменением параметров заборного конуса, а также длина  $L$  загруженного участка фрезы и путь врезания фрезы в заготовку, определяемый ординатой точки  $k_0$ .

Из рис. 1, *a* ( $L_{\text{ц}} = 0$  мм) видно, что при  $\psi = 0$ , т. е. когда заборный конус у фрезы отсутствует, зона резания не перекрывается полностью червячной фрезой из-за недостаточной её длины, поэтому первый вступающий в резание зуб фрезы будет перегружен. При  $\psi = 5^\circ$  зона резания сокращается и длины фрезы становятся достаточно для её перекрытия даже с некоторым запасом. При  $\psi = 10^\circ$  зона резания ещё более сокращается, длина неиспользованной части фрезы возрастает, появляется возможность применить осевую перестановку фрезы, т. е. повысить коэффициент использования её режущих возможностей.

Из рис. 1, *б* ( $L_{\text{ц}} = 35$  мм) видно, что при  $\psi = 5^\circ$  длины фрезы достаточно для перекрытия зоны резания и полного профилирования зубьев нарезаемого колеса цилиндрической её частью. При  $\psi = 10^\circ$  часть фрезы не будет использована, а на осевую перестановку её явно недостаточно.

На рис. 1, *в* ( $L_{\text{ц}} = 70$  мм) видно, что при  $\psi = 5^\circ$  зона резания не перекрывается, поэтому первый вступающий в резание зуб фрезы будет перегружен, и только при  $\psi = 10^\circ$  длина фрезы становится достаточной.

Из рис. 1 видно, что длина зоны резания уменьшается с увеличением угла заборного конуса и тем больше, чем меньше величина  $L_{\text{ц}}$ . Следует обратить ещё внимание на то, что зона резания на участке заборного конуса существенно увеличивается по ширине с приближением к цилиндрическому участку фрезы, что, очевидно, должно повлиять на размеры срезаемых слоёв и в конечном итоге на износ зубьев фрезы.

Для всех представленных на рис. 1 зон резания по указанной выше расчётно-экспериментальной методике и разработанного программного обеспечения были вычислены на ЭВМ для каждого зуба червячной фрезы размеры срезаемого им слоя: средняя толщина  $a_{\text{ср}}$  и длина  $l$  среза. На основе результатов этих вычислений построены графики изменения  $a_{\text{ср}}$  и  $l$  на зубьях фрезы: рис. 2, *a* – для зон резания, изображенных на рис. 1, *a*; рис. 2, *б* – для зон резания на рис. 1, *в*; рис. 2, *в* – для зон резания на рис. 1, *в*.

Из рис. 2 видно, что с появлением заборного конуса увеличивается  $a_{\text{ср}}$  на этом участке фрезы по сравнению с тем же участком фрезы без заборного конуса и тем больше, чем больше этот угол. Это же происходит и с длиной срезаемого слоя правее точки  $k_0$  (см. рис. 1), особенно с приближением к цилиндрической части фрезы.

На основе результатов расчета  $a_{\text{ср}}$  и  $l$  и формулы из работы [1], связывающей износ зуба фрезы с размерами срезаемого слоя, построены графики (рис. 3) распределения износа по зубьям  $h_3$  червячной фрезы: рис. 3, *а* в соответствии с рис. 1, *a* и 2, *а*; рис. 3, *б* в соответствии с рис. 1, *б* и 2, *б*; рис. 3, *в* в соответствии с рис. 1, *в* и 2, *в*.

Из рис. 3, *а* ( $L_{\text{ц}} = 0$  мм) видно, что с увеличением угла заборного конуса и связанного с ним перераспределения нагрузки между зубьями червячной фрезы износ на зубьях, расположенных ближе к межосевому перпендикуляру (началу координат), увеличился, но не превысил наибольшего износа (0,6 мм) фрезы без заборного конуса, при этом для  $\psi = 10^\circ$  существенно сократилась длина загруженного участка фрезы.

На рис. 3, *б* ( $L_{\text{ц}} = 35$  мм) видно, что при  $\psi = 5^\circ$  длина червячной фрезы оказалась достаточной, а наибольший износ (0,6 мм) практически не изменился по сравнению с фрезой без заборного конуса. При увеличении  $\psi$  до  $10^\circ$  резко вырос наибольший износ (до 1 мм) зубьев на коническом участке фрезы ближе к её цилиндрической части. Поэтому в данном случае следует выбрать для использования вариант фрезы с  $\psi = 5^\circ$ .

На рис. 3, *в* ( $L_{\text{ц}} = 70$  мм) видно, что при  $\psi = 5^\circ$  и длина червячной фрезы недостаточна, и наибольший износ увеличился (до 0,95 мм) по сравнению с фрезой без заборного конуса. При  $\psi = 10^\circ$  длины червячной фрезы уже достаточно, но наибольший износ увеличился до 1,5 мм, т. е. в 2,5 раза по сравнению с фрезой без заборного конуса.

Таким образом, результаты проведённого исследования показали, что если операция зубофрезерования черновая и допускается некоторое недопрофилирование зубьев колеса, то оптимальным будет вариант червячной фрезы с углом заборного конуса  $\psi = 10^\circ$  и установкой её с  $L_{\text{ц}} = 0$  мм. Если недопрофилирование зубьев колеса не допускается, то оптимальным будет вариант при  $\psi = 5^\circ$  и  $L_{\text{ц}} = 35$  мм. Всё это справедливо для данного конкретного случая нарезания зубчатого колеса по указанной технологической схеме и заданных параметрах червячной фрезы. Очевидно, поиск оптимального решения задачи в более широком диапазоне изменения параметров зубофрезерования требует дополнительных исследований, при этом в качестве критерия оптимальности может служить не только износ, но также производительность и себестоимость операции зубонарезания.

УДК 004.942

**Г.Н. Хубаев**, д-р экон. наук, проф. (Ростовский государственный экономический университет),  
**С.Н. Широбокова**, канд. экон. наук, доц., **Е.В. Титаренко, Ю.В. Ткаченко** (Южно-Российский  
государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт))

gnh@donpac.ru

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕРТИРОВАНИЯ IDEF0-МОДЕЛЕЙ В UML-ДИАГРАММЫ

*Рассмотрен процесс конвертирования IDEF0-моделей в UML-диаграммы. Представлены математическое описание, алгоритмы и результаты преобразования визуальных моделей, созданных с использованием инструментария IDEF0, в диаграммы языка UML. Показано, что совместное использование конвертера и системы автоматизированного синтеза СИМ-UML позволяет на основе ранее созданных визуальных IDEF0-моделей строить с минимальными трудозатратами имитационные модели бизнес-процессов и осуществлять имитационное моделирование.*

**Ключевые слова:** конвертирование IDEF0-моделей в UML-диаграммы, моделирование бизнес-процессов, визуальные и имитационные модели, математическое описание процесса конвертирования, программная система автоматизированного синтеза имитационных моделей.

*IDF0-models conversion process in UML-diagrams is considered. Mathematical description, algorithms and transformation results of the visual models, developed with utilization of instruments IDEF0, in the language diagrams UML are represented. It is shown that combined utilization of converter and automatic synthesis system СИМ-UML permits to construct business-process simulation models and to implement simulation modeling with minimum working hours from earlier created visual IDF0-models.*

**Key words:** IDF0-models conversion in UML-diagrams, business-process simulation, visual and simulation models, conversion process mathematical description, program system of the simulation models automatic synthesis.

**Постановка задачи.** Известно, что инструментарий IDEF0, разработанный в начале 70-х гг. и реализованный в различных программных системах, занял прочные позиции на рынке программных продуктов. С его помощью построены многие визуальные модели деловых процессов в различных областях экономики. Однако, чтобы оценить характеристики бизнес-процесса, включая затраты различных ресурсов (трудовых, материальных, энергетических и др.) на его реализацию, и выполнить инжиниринг и реинжиниринг этого процесса, необходимо сначала пройти весьма трудоёмкий этап создания имитационной модели процесса и осуществить имитационное моделирование. Сложившуюся ситуацию в области моделирования деловых процессов можно охарактеризовать следующим образом: с одной стороны, в ведущих экономиках мира сформирована огромная база визуальных IDEF0-моделей бизнес-процессов, с другой — чтобы использовать эти продукты интеллектуальной деятельности для повышения эффективности общественного производства, необходимо привлечь достаточно большие объёмы финансовых и трудовых ресурсов для построения имитационных моделей на

основе ранее созданных визуальных IDEF0-моделей управлеченческих и производственных процессов. В то же время система автоматизированного синтеза имитационных моделей на основе языка UML «СИМ-UML» [1], минута трудоёмкие этапы программирования и тестирования, автоматизированно создаёт имитационную модель по UML-диаграмме выбранного процесса и осуществляет моделирование.

Таким образом, чтобы обеспечить возможность построения с минимальными трудозатратами имитационных моделей различных процессов и получить отдачу от созданных IDEF0-моделей бизнес-процессов, а также облегчить разработку новых инструментальных средств моделирования процессов и систем, необходимо дать формализованное описание процесса конвертирования визуальных IDEF0-моделей в UML-диаграммы и создать программную систему, реализующую этот процесс. На рис. 1 представлена общая схема взаимодействия автоматизированного конвертера моделей IDEF0 в диаграммы языка UML «ToAD-Converter» (далее конвертер) с системой [1], в комплексе с которой предполагается использовать конвертер.

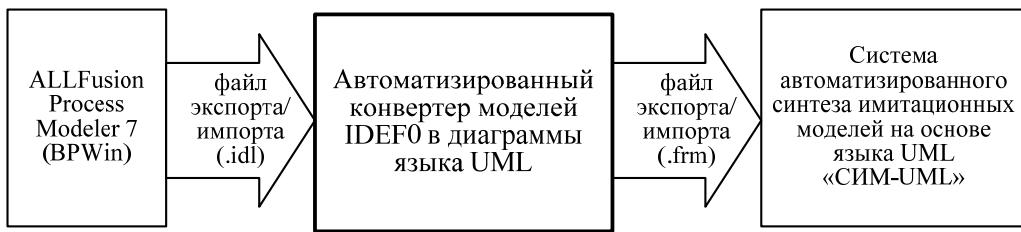


Рис. 1. Схема взаимодействия конвертера и системы «СИМ-UML»

**Формализованное описание процесса конвертирования.** В работе [2] предложены оригинальные концептуальные правила преобразования моделей IDEF0 в диаграммы языка UML. Для алгоритмизации этапов преобразования построена формализованная модель, описывающая структуры исходной модели IDEF0 и итоговой диаграммы деятельности языка UML [3].

Задачу конвертирования диаграмм IDEF0 в UML-диаграммы деятельности формализованно можно представить в виде

$$DD_m \xrightarrow{\text{conv}} d_m^A,$$

где  $d_m^A$  – диаграмма деятельности UML.

Модель стандарта IDEF0 представляется четырёхкой вида

$$BP^{IDEF0} = \langle Q, L, DC, DD_m \rangle,$$

где  $Q$  – число диаграмм в модели;  $L$  – число уровней детализации в модели;  $DC$  – контекстная диаграмма модели;  $DD_m$  – детализирующие диаграммы модели;  $m = 2, \overline{Q}$  – множество детализирующих диаграмм IDEF0, описывающих функциональную структуру бизнес-процессов предприятия.

Контекстная диаграмма в каждой модели всегда единственна. Формально её можно описать следующим образом:

$$DC = \langle b, qar, AR^{DC} \rangle,$$

где  $b$  – блок контекстной диаграммы, определяющий основную функцию (работу) всего бизнес-процесса, описанного моделью;  $qar$  – число всех стрелок (входа, управления, механизма и выхода), связанных с блоком основной работы;  $AR^{DC} = \{ar_k^{DC}\}$ ,  $k = 1, \overline{qar}$  – множество стрелок контекстной диаграммы.

В простом случае модель может иметь одну детализирующую диаграмму, раскрывающую основную функцию бизнес-процесса. Подразумевается, что таких диаграмм может быть множество, и они позволяют детализировать работы на разных уровнях модели, описывающей бизнес-

процесс организации. Поэтому формально описать диаграмму детализации можно в виде

$$\begin{aligned} DD_m = & \langle name_m, d_m, qb_m, B_m^{DD}, qar_m, AR_m^{DD}, qmech_m, \\ & FIRST_m, POZ_m, WAY_m, LOOP_m, LOBR_m \rangle, \end{aligned}$$

где  $name_m$  – наименование диаграммы;  $d_m$  – уровень детализации;  $qb_m$  – количество блоков диаграммы;  $B_m^{DD} = \{b_t^m\}$ ,  $t = 1, \overline{qb_m}$  – множество блоков диаграммы;  $qar_m$  – количество стрелок диаграммы;  $AR_m^{DD} = \{ar_k^m\}$ ,  $k = 1, \overline{qar_m}$  – множество стрелок диаграммы;  $qmech_m$  – количество механизмов, выполняющих работы процесса, описанного диаграммой  $m$ .

$FIRST_m = |first_t^m|$ ,  $t = 1, \overline{qb_m}$  – массив, в котором отмечены первые работы процесса, описанного диаграммой декомпозиции IDEF0. Если работа  $t$  является первой в процессе, то элемент  $first_t^m = 1$ .

$POZ_m$  – матрица, содержащая информацию о каждой стрелке и её взаимосвязях с блоками. Матрица проиндексирована по осям множеством блоков работ  $B_m^{DD}$  и множеством стрелок  $AR_m^{DD}$ . Элемент матрицы принимает значение  $poz_{kt}^m = 1$ , если стрелка  $ar_k^m$  является выходом из блока  $b_t^m$ ;  $poz_{kt}^m = 2$  – если стрелка  $ar_k^m$  является входом типа Input в блок  $b_t^m$ ;  $poz_{kt}^m = 3$  – если стрелка  $ar_k^m$  является входом типа Control в блок  $b_t^m$ ;  $poz_{kt}^m = 4$  – если стрелка  $ar_k^m$  является входом типа Mechanism в блок  $b_t^m$ ;  $poz_{kt}^m = 0$  – если стрелка не связана с блоком;  $poz_{kt}^m = 5$  – стрелка определяет цикл по одной работе  $t$  по входу типа Input;  $poz_{kt}^m = 6$  – стрелка определяет цикл по одной работе  $t$  по входу типа Control.

$WAY_m$  – двумерная матрица размерностью  $NP \times NZ$ , где  $NP$  – число строк, формируемое динамически;  $NZ$  – число столбцов,  $NZ = qb_m + 2$ . Матрица содержит информацию обо всех возможных вариантах протекания процесса в зависимости от его организации и промежуточных результатов, т. е. учитывает все возможные последовательности выполнения работ.

$LOOP_m$  – двумерная матрица размерностью  $NA \times NC$ , где  $NA$  – число строк массива, соответствующее числу найденных циклов (определяется динамически);  $NC$  – число столбцов массива,

$NC = qb_m$ . Назначение матрицы – хранение последовательностей работ, образующих циклы.

$LOBR_m = |lобр_k^m|, k = \overline{1, qar_m}$  – массив размерностью, равной количеству стрелок диаграммы, в котором отмечаются стрелки, определяющие возврат по циклу. Если стрелка  $k$  определяет возврат по циклу, то  $lобр_k^m = 1$ .

Элементы множеств блоков и стрелок можно описать следующим образом:

$b_t^n = <name_t^n, st_t^n>, n = \overline{1, Q}$  – блок диаграммы, где  $name_t^n$  – наименование блока (работы);  $st_t^n$  – указатель на диаграмму, детализирующую данную работу;

$ar_k^n = <name_k^n, sc_k^n, scn_k^n, scf_k^n, scd_k^n, sk_k^n, skn_k^n, skf_k^n, skd_k^n>, n = \overline{1, Q}$  – стрелка диаграммы, где  $name_k^n$  – наименование стрелки;  $sc_k^n$  – тип выхода стрелки (BORDER – внешняя; BOX – внутренняя; BRANCH – стрелка продолжает расщеплённую стрелку; JOIN – стрелка соединяется с другими стрелками);  $scn_k^n$  – номер блока, из которого выходит стрелка, если она является внутренней;  $scf_k^n$  – функция выхода стрелки (I – вход; C – управление; M – механизм; O – выход);  $scd_k^n$  – номер по порядку стрелки данной функции, выходящей из блока  $scn_k^n$ ;  $sk_k^n$  – тип входа стрелки (BORDER – внешняя; BOX – внутренняя; BRANCH – стрелка расщепляется; JOIN – стрелка соединяет другие стрелки);  $skn_k^n$  – номер блока, в который входит стрелка, если она внутренняя;  $skf_k^n$  – функция входа стрелки (I – вход; C – управление; M – механизм; O – выход);  $skd_k^n$  – номер по порядку стрелки данной функции, входящей в блок  $skn_k^n$ .

Алгоритмы формирования матриц  $POZ_m$ ,  $WAY_m$ ,  $LOOP_m$  и массива  $LOBR_m$  представлены ниже. На рис. 2 приведён пример представления диаграммы в рамках формализованной модели.

Диаграмму деятельности  $d_m^A$  модели UML можно представить конструкцией вида:

$$d_m^A = <bs_m, BO_m^A, NG_m, USL_m^A, NL_m, CF_m^A, NS_m, CJ_m^A, NF_m, MER_m^A, bf_m>,$$

где  $bs_m = <nype_m, nnb_m>$  – блок начала диаграммы модели UML;  $nype_m$  – тип следующего блока после начального состояния;  $nnb_m$  – номер следующего блока после начального состояния в соответствии с типом блоков  $nype_m$ ; цифровое обозначение типа блока начала процесса – 0.

$BO_m^A = |bo_{mt}|, t = \overline{1, qb_m}$  – множество блоков операций на диаграмме деятельности модели UML. Блок операции описан следующей структурой:

$$bo_{mt} = <type_{mt}, nl_{mt}>,$$

где  $type_{mt}$  – тип следующего за блоком операции блока;  $nl_{mt}$  – номер следующего блока в соответствии с нумерацией блоков типа  $type_{mt}$ ; цифровое обозначение блока операции из множества  $BO_m^A - 1$ ;

$USL_m^A = |usl_{mg}|, g = \overline{1, NG_m}$  – множество блоков условия на диаграмме деятельности модели UML, где  $NG_m$  – количество блоков условия, которое определяется динамически, по мере необходимости ввести данный элемент. Блок условия описан следующей структурой:

$$usl_{mg} = <tnefty_{mg}^{usl}, nnexy_{mg}^{usl}, tnextn_{mg}^{usl}, nnextn_{mg}^{usl}>,$$

где  $tnefty_{mg}^{usl}$  – тип следующего за блоком условия блока по ветке «да»;  $nnexy_{mg}^{usl}$  – номер следующего за блоком условия блока по ветке «да» в соответствии с нумерацией блоков типа  $tnefty_{mg}^{usl}$ ;  $tnextn_{mg}^{usl}$  – тип следующего за блоком условия блока по ветке «нет»;  $nnextn_{mg}^{usl}$  – номер следующего за блоком условия блока по ветке «нет» в соответствии с нумерацией блоков типа  $tnefty_{mg}^{usl}$ .

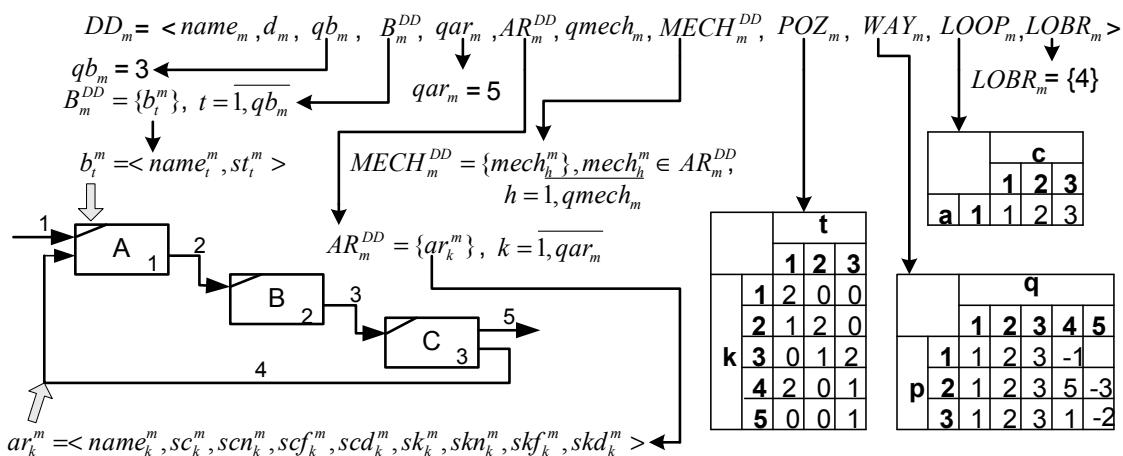


Рис. 2. Формализованное описание компонентов IDEF0-модели

цией блоков типа  $tnextn_{mg}^{usl}$ , цифровое обозначение блока операции из множества  $USL_m^A - 2$ .

$CF_m^A = |cf_{ml}|, l=1, NL_m$  – множество блоков разделения на диаграмме деятельности модели UML,  $NL_m$  – количество блоков разделения, которое определяется динамически, по мере необходимости ввести данный элемент. Блок разделения характеризуется следующей структурой:

$$cf_{ml} = \langle tprev_{ml}^{cf}, nprev_{ml}^{cf}, BNEXT_{ml}^{cf} \rangle,$$

где  $tprev_{ml}^{cf}$  – тип блока, предшествующего блоку разделения;  $nprev_{ml}^{cf}$  – номер блока, предшествующего блоку разделения в соответствии с нумерацией блоков типа  $tprev_{ml}^{cf}$  ( $nprev_{ml}^{cf} = 0$ , если  $tprev_{ml}^{cf} = 0$ );

$BNEXT_{ml}^{cf} = \{bnext_{ml}^{cf}\}, i=1, NEXT_{ml}$  – множество следующих блоков после элемента разделения;  $NEXT_{ml}$  – количество следующих блоков после блока разделения.

Элементом множества  $BNEXT_{ml}^{cf}$  является

$$bnext_{ml}^{cf} = \langle tnext_{ml}^{cf}, nnext_{ml}^{cf} \rangle, i=1, \overline{NEXT_{ml}},$$

где  $tnext_{ml}^{cf}$  – тип следующего блока после разделения;  $nnext_{ml}^{cf}$  – номер следующего блока после разделения в соответствии с нумерацией блоков типа  $tnext_{ml}^{cf}$ ; цифровое обозначение блока операции из множества  $CF_m^A - 3$ .

$CJ_m^A = |cj_{ms}|, s=1, NS_m$  – множество блоков слияния на диаграмме деятельности модели UML,  $NS_m$  – количество блоков слияния, которое определяется динамически, по мере необходимости ввести данный элемент. Блок слияния характеризуется следующей структурой:  $cj_{ms} = \langle BPREV_{ms}^{cj}, tnext_{ms}^{cj}, nnext_{ms}^{cj} \rangle$ , где  $BPREV_{ms}^{cj} = \{bprev_{msj}^{cj}\}, j=1, PREV_{ms}$  – множество предшествующих блоку слияния блоков, где  $PREV_{ms}$  – количество предшествующих

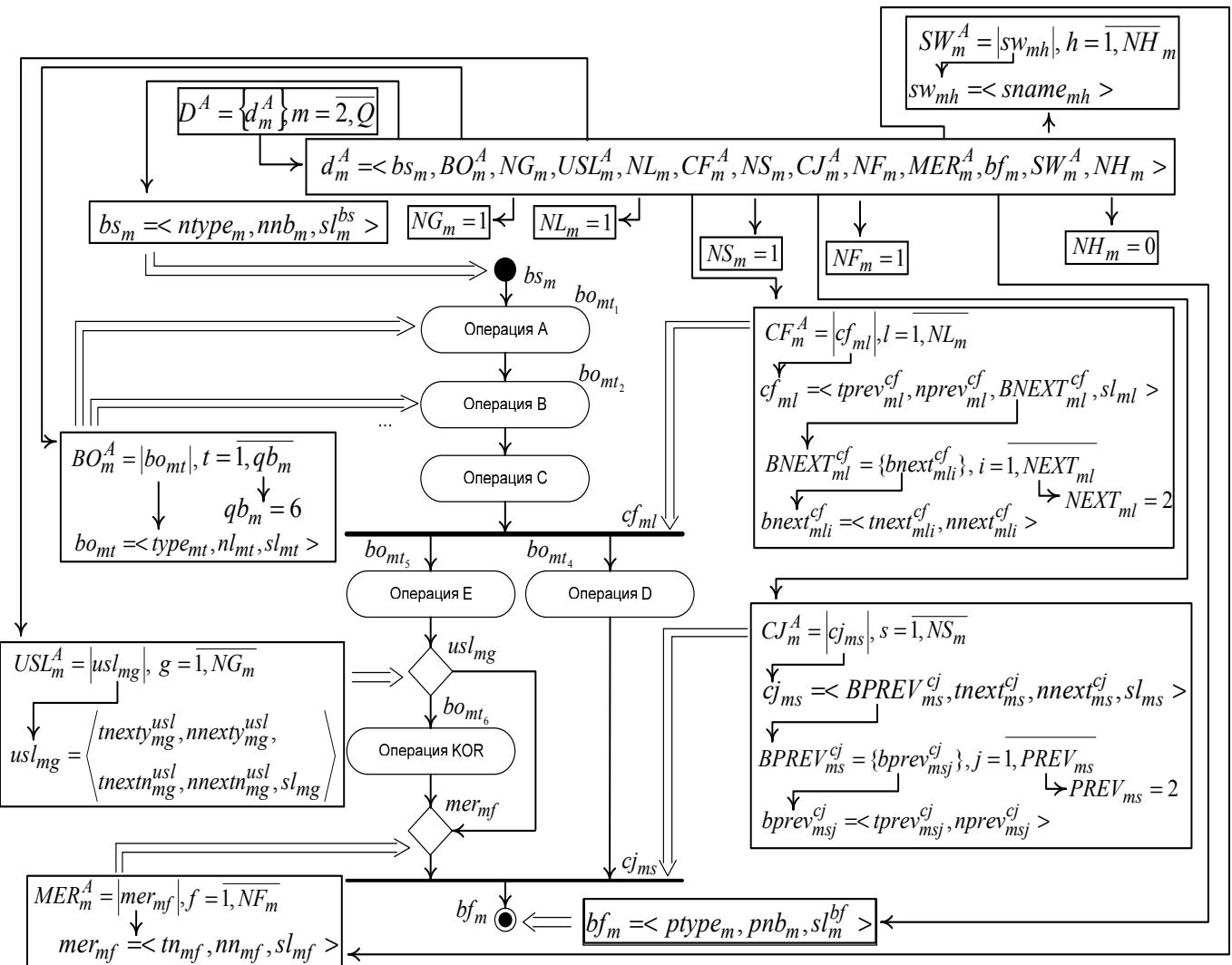


Рис. 3. Формализованное описание UML-диаграммы деятельности языка

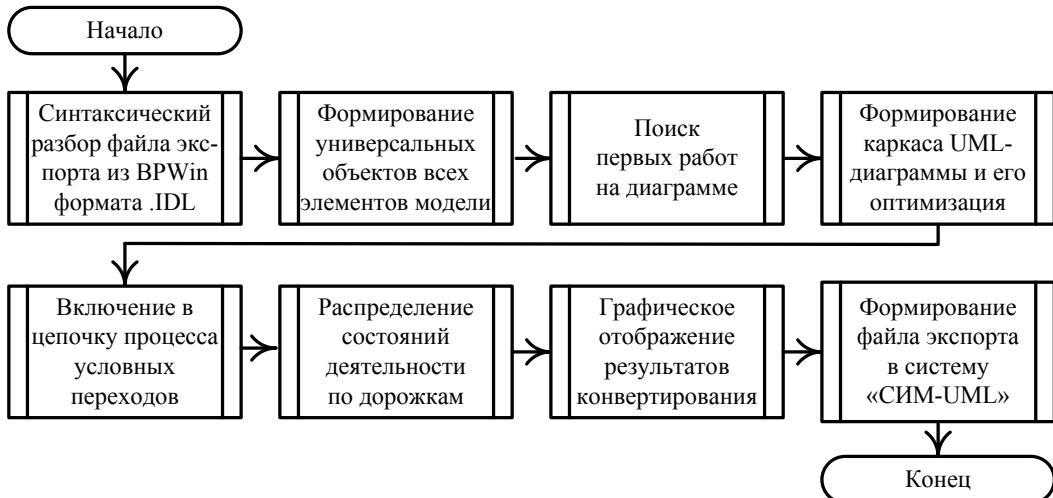


Рис. 4. Обобщённый алгоритм конвертирования «IDEF0-&gt;UML»

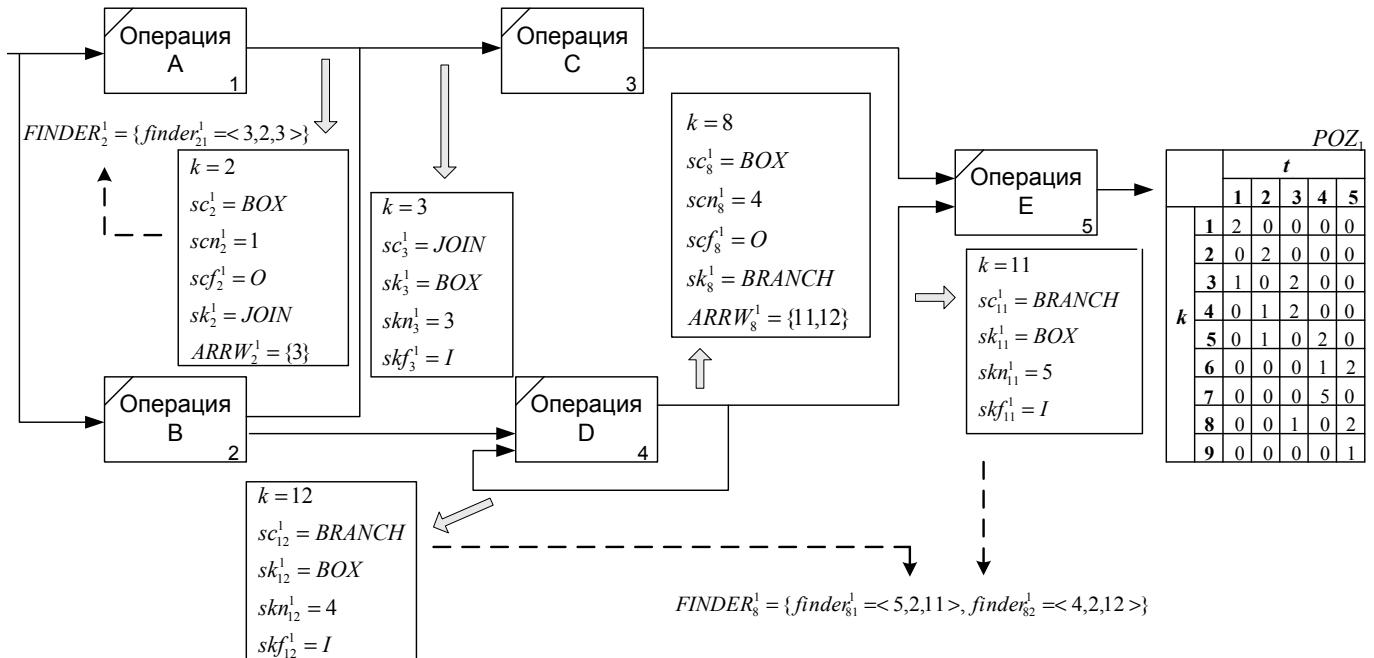


Рис. 5. Пример формирования матрицы взаимосвязей блоков и стрелок

блоков блоку слияния;  $t_{next}^{cj}_{ms}$  – тип последующего блока после блока слияния;  $n_{next}^{cj}_{ms}$  – номер последующего блока после блока слияния в соответствии с нумерацией блоков типа  $t_{next}^{cj}_{ms}$  ( $n_{next}^{cj}_{ms} = 0$ , если  $t_{next}^{cj}_{ms} = 5$ ). Элементом множества  $BPREV_{ms}^{cj}$  является  $bprev_{msj}^{cj} = <t_{prev}^{cj}_{msj}, n_{prev}^{cj}_{msj}>$ ,  $j = 1, PREV_{ms}$ , где  $t_{prev}^{cj}_{msj}$  – тип предшествующего блока, а параметр  $n_{prev}^{cj}_{msj}$  – номер предшествующего блока в соответствии с нумерацией блоков типа  $t_{prev}^{cj}_{msj}$ ; цифровое обозначение блока операции из множества  $CJ_m^A$  – 4.

$MER_m^A = |mer_{mf}|$ ,  $f = \overline{1, NF_m}$  – множество блоков соединения на диаграмме деятельности модели UML,  $NF_m$  – количество блоков соединения, которое определяется динамически, по мере необходимости ввести данный элемент. Блок соединения описан структурой следующего вида:  $mer_{mf} = <t_{mf}, nn_{mf}>$ , где  $t_{mf}$  – тип последующего блока после блока соединения;  $nn_{mf}$  – номер последующего блока после блока соединения в соответствии с нумерацией блоков типа  $t_{mf}$ ; цифровое обозначение блока операции из множества  $MER_m^A$  – 6.

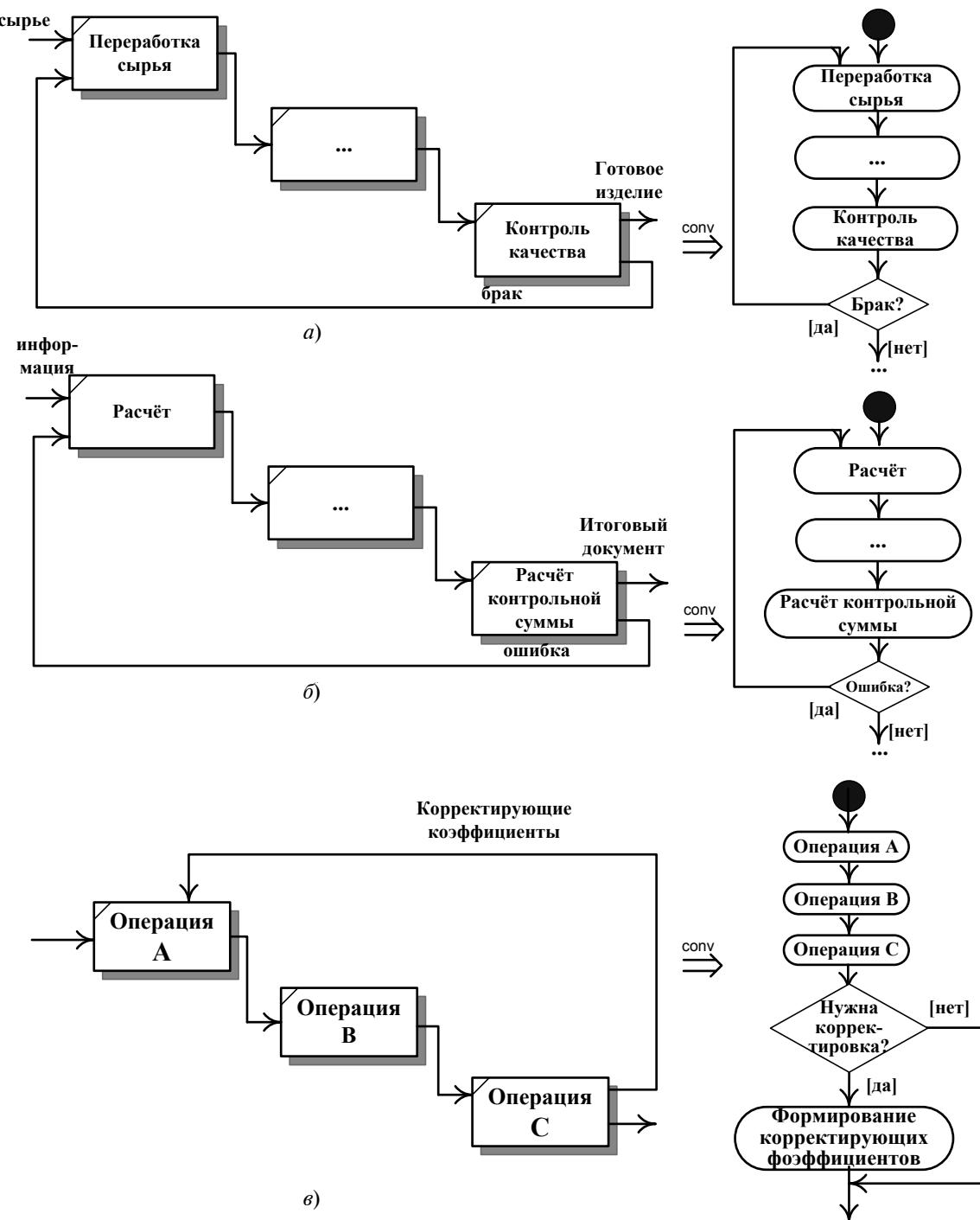


Рис. 6. Фрагменты диаграмм IDEF0 с обратными связями различных типов (а, б) и результаты их преобразования в UML-моделях (в)

$bf_m = \langle ptype_m, pnb_m \rangle$  – блок конца диаграммы модели UML, где  $ptype_m$  – тип предшествующего конечному состоянию блока;  $pnb_m$  – номер предшествующего конечному состоянию блока в соответствии с нумерацией блоков типа  $ptype_m$ ; цифровое обозначение типа блока конца процесса – 5.

На рис. 3 представлены примеры компонент UML-диаграммы деятельности и их соответствующее формализованное описание.

**Алгоритм и программная реализация конвертера.** Обобщённый алгоритм конвертирования «IDEF0->UML» представлен на рис. 4. Первым шагом алгоритма является задача синтаксического разбора файла экспорта модели в формате IDEF IDL. Этот формат файлов является стандартным для обмена информацией в нотации IDEF0 между CASE-средствами различных производителей.

В файле IDL основными составляющими являются диаграммы, образующие иерархию модели. Каждая диаграмма содержит набор работ и стрелок, соответствующих ресурсам, механизмам выполнения, управляющим механизмам и результатам работ. Сформулирован оригинальный алгоритм синтаксического анализа и разбора файла экспорта модели IDEF0, в результате реализации которого сформированы объекты элементов модели с набором параметров, удобных для дальнейшего программирования (в частности, для автоматизированного конвертера моделей IDEF0 в UML-диаграммы деятельности). Преимуществом разработанного модуля является то, что его может использовать любой проектировщик программного обеспечения для реализации функций разрабатываемого им приложения.

На этапе определения структур, соответствующих предложенному формализованному описанию IDEF0-модели, важным шагом является формирование матрицы взаимосвязей между блоками и стрелками диаграммы, которая необходима для дальнейшего преобразования модели IDEF0 в диаграмму деятельности UML. На рис. 5 представлен пример формирования матрицы  $POZ_m$ .

Следующим шагом в процессе конвертирования является определение первых работ на диаграмме IDEF0 по соответствующему алгоритму. Итогом реализации алгоритма является сформированный массив  $FIRST_m = \{first_t^m\}, t = 1, qb_m$ , где  $first_t^m = 1$ , если работа  $t$  определена как первая или одной из первых на диаграмме IDEF0.

На этапе определения последовательности выполнения работ необходимо выявить циклические последовательности, так как в отношении обратной связи возможны различные варианты преобразования:

если обратная связь отражает стрелку типа Input, то, как правило, она иллюстрирует возврат на предыдущий этап в случае ошибки. Проверку наличия ошибки и соответствующее ветвление процесса можно отразить блоком UML – «услуга» (рис. 6, а, б);

обратная связь может отражать корректирующий управляющий поток. Например, после некоторой проверки формируется корректирующее воздействие, учитываемое при следующем проходе бизнес-процесса. В UML на диаграмме деятельности такую обратную связь не отражают в виде обратной связи. При преобразовании необходимо сначала уточнить у пользователя, следует ли учитывать время на выполнение управляющего воздействия. Если временем на выполнение формирования управляющего воздействия можно пренебречь, то обратная связь в UML не отображается. В противном случае целесообразно отразить дополнительное состояние деятельности (рис. 6, в).

На рис. 7 представлены структуры, содержащие сведения о циклических последовательностях в процессе, описанном IDEF0-диаграммой.

Этап определения циклических последовательностей на функциональной диаграмме является завершающим в процессе формирования универсальных объектов модели IDEF0. Данные объекты послужили базой для формализации алгоритмов преобразования модели IDEF0 в диаграммы деятельности UML, алгоритмов построения каркаса диаграммы деятельности, его оптимизации и

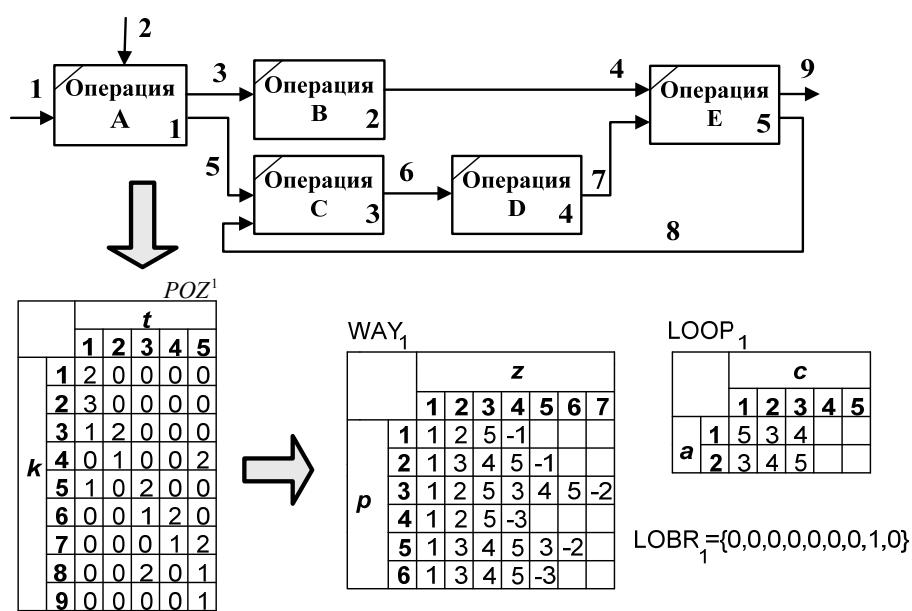
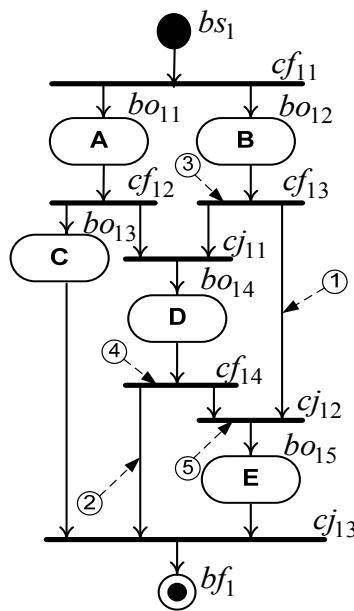


Рис. 7. Формирование структур, содержащих сведения о циклических последовательностях на IDEF0-диаграмме



**Рис. 8. Пример каркаса UML-диаграммы деятельности с избыточными элементами:**

1, 2 – «пустые связи»; 3–5 – блоки, которые являются избыточными при удалении «пустых связей»

дополнения в зависимости от особенностей процесса, описанного на IDEF0-диаграмме [4].

Основной особенностью алгоритма построения каркаса диаграммы деятельности является выявление необходимости добавления в схему элементов разделения и слияния (при наличии у каких-либо работ нескольких выходящих или входящих стрелок). Для идентификации работ с множественными входами или выходами используется матрица  $POZ_m$ . Определяются параметры добавляемых элементов слияния и разделения (формируется множество предшествующих/последующих элементу блоков операций, с которыми он далее будет соединяться). Затем добавляются ссылки связей между блоками слияния и разделения с соответствующими связанными с ними операциями и при необходимости между собой.

В результате формализованной процедуры создаётся каркас диаграммы, который может содержать «пустые связи» и избыточные блоки слияния и разделения на диаграмме деятельности UML. Пример наличия таких избыточных элементов представлен на рис. 8. Формализованное описание элементов диаграммы:

$$bs_1 = < 3,1,0 >;$$

$$BO_1^A = \{bo_{11} = < 3,2,0 >, bo_{12} = < 3,3,0 >,$$

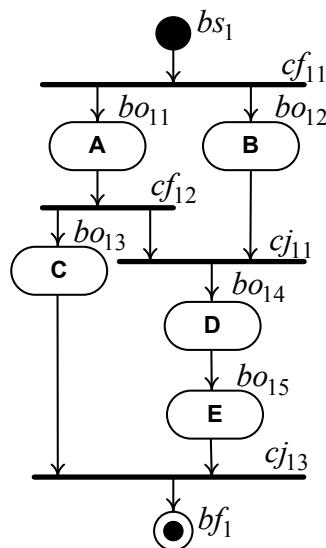
$$bo_{13} = < 4,3,0 >, bo_{14} = < 3,4,0 >, bo_{15} = < 4,3,0 >\};$$

$$CF_1^A = \{cf_{11} = < 0,0, < 1,1 >, < 1,2 > \}, 0 >,$$

$$\begin{aligned} cf_{12} &= < 1,1, < 1,3 >, < 4,1 > \}, 0 >, \\ cf_{13} &= < 1,2, < 4,1 >, < 4,2 > \}, 0 >, \\ cf_{14} &= < 1,4, < 4,3 >, < 4,2 > \}, 0 >; \\ CJ_1^A &= \{cj_{11} = < < 3,2 >, < 3,3 > \}, 1,4,0 >, \\ cj_{12} &= < < 3,4 >, < 3,3 > \}, 1,5,0 >, \\ cj_{13} &= < < 1,3 >, < 3,4 >, < 1,5 > \}, 5,0,0 >; \\ bf_1 &= < 4,3,0 >. \end{aligned}$$

Дальнейшие преобразования каркаса позволяют оптимизировать его структуру (рис. 9). Формализованное описание элементов оптимизированного каркаса имеет вид:

$$\begin{aligned} bs_1 &= < 3,1,0 >; \\ BO_1^A &= \{bo_{11} = < 3,2,0 >, bo_{12} = < 4,1,0 >, \\ bo_{13} &= < 4,3,0 >, bo_{14} = < 1,5,0 >, bo_{15} = < 4,3,0 >\}; \\ CF_1^A &= \{cf_{11} = < 0,0, < 1,1 >, < 1,2 > \}, 0 >, \\ cf_{12} &= < 1,1, < 1,3 >, < 4,1 > \}, 0 >, \\ cf_{13} &= < -1,2, < 4,1 >, < -1,-1 > \}, 0 >, \\ cf_{14} &= < -1,4, < 4,3 >, < -1,-1 > \}, 0 >; \\ CJ_1^A &= \{cj_{11} = < < 3,2 >, < 3,3 > \}, 1,4,0 >, \\ cj_{12} &= < < 3,4 >, < -1,-1 > \}, -1,5,0 >, \\ cj_{13} &= < < 1,3 >, < -1,-1 >, < 1,5 > \}, 5,0,0 >; \\ bf_1 &= < 4,3,0 >. \end{aligned}$$



**Рис. 9. Результат удаления избыточных элементов из каркаса UML-диаграммы деятельности**

Последующие преобразования каркаса связаны с дополнением диаграммы деятельности блоками условий как при обработке циклических последовательностей в процессе, описываемом диаграммой деятельности, так и в случае непараллельного или альтернативного перехода.

На заключительном этапе осуществляется распределение состояний деятельности по дорожкам (рис. 10). Использование плавающих «дорожек» в языке UML позволяет чётко распределить ответственность за выполнение этапов работ по исполнителям. Для того чтобы использовать меха-

низм дорожки в UML на диаграмме IDEF0 для всех работ, должны быть заданы механизмы, при чём механизмы-исполнители.

Формализованное описание элементов диаграммы IDEF0 на рис. 10 имеет вид:

$$bs_1 = < 1,1,1 >;$$

$$BO_1^A = \left\{ \begin{array}{l} bo_{11} = < 2,1,1 >, bo_{12} = < 6,1,2 >, \\ bo_{13} = < 1,4,4 >, bo_{14} = < 6,1,3 > \end{array} \right\};$$

$$USL_1^A = \{ usl_{11} = < 1,2,1,3,1 > \};$$

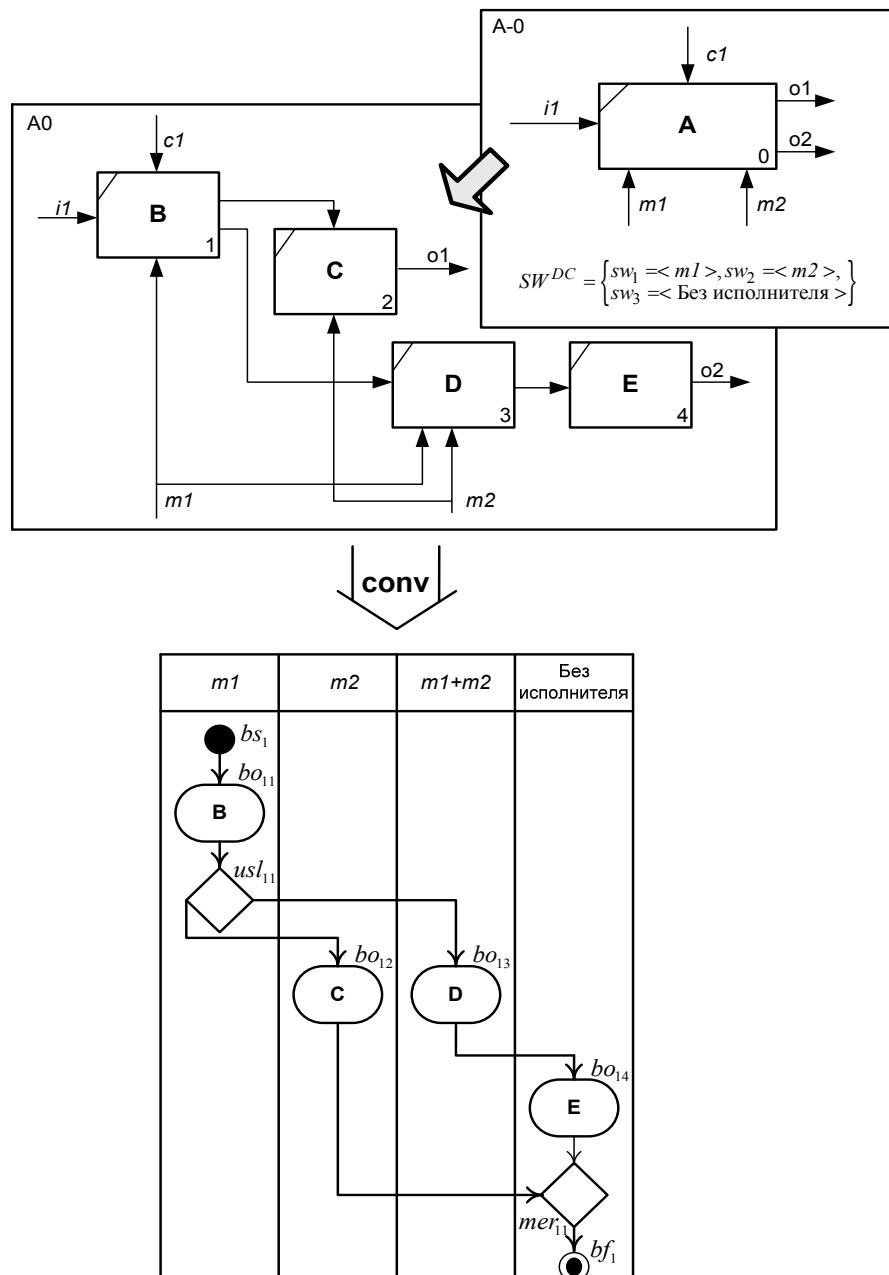


Рис. 10. Пример результатов распределения элементов диаграммы деятельности по «дорожкам»

$$MER_1^A = \{mer_{11} = <5, 0, 3>\};$$

$$bf_1 = <6, 1, 3>.$$

$$SW_1^A = \begin{cases} sw_{11} = <m1>, sw_{12} = <m2>, \\ sw_{13} = <\text{Без исполнителя}>, \\ sw_{14} = <m1 + m2> \end{cases}.$$

На основе представленной формализованной модели, а также оригинальных алгоритмов конвертирования разработаны на разных технологических платформах два программных продукта [5, 6], позволяющих экспорттировать данные из ALL-Fusion Process Modeler (BPWin) и формировать fmh-файл экспорта/импорта Системы [1].

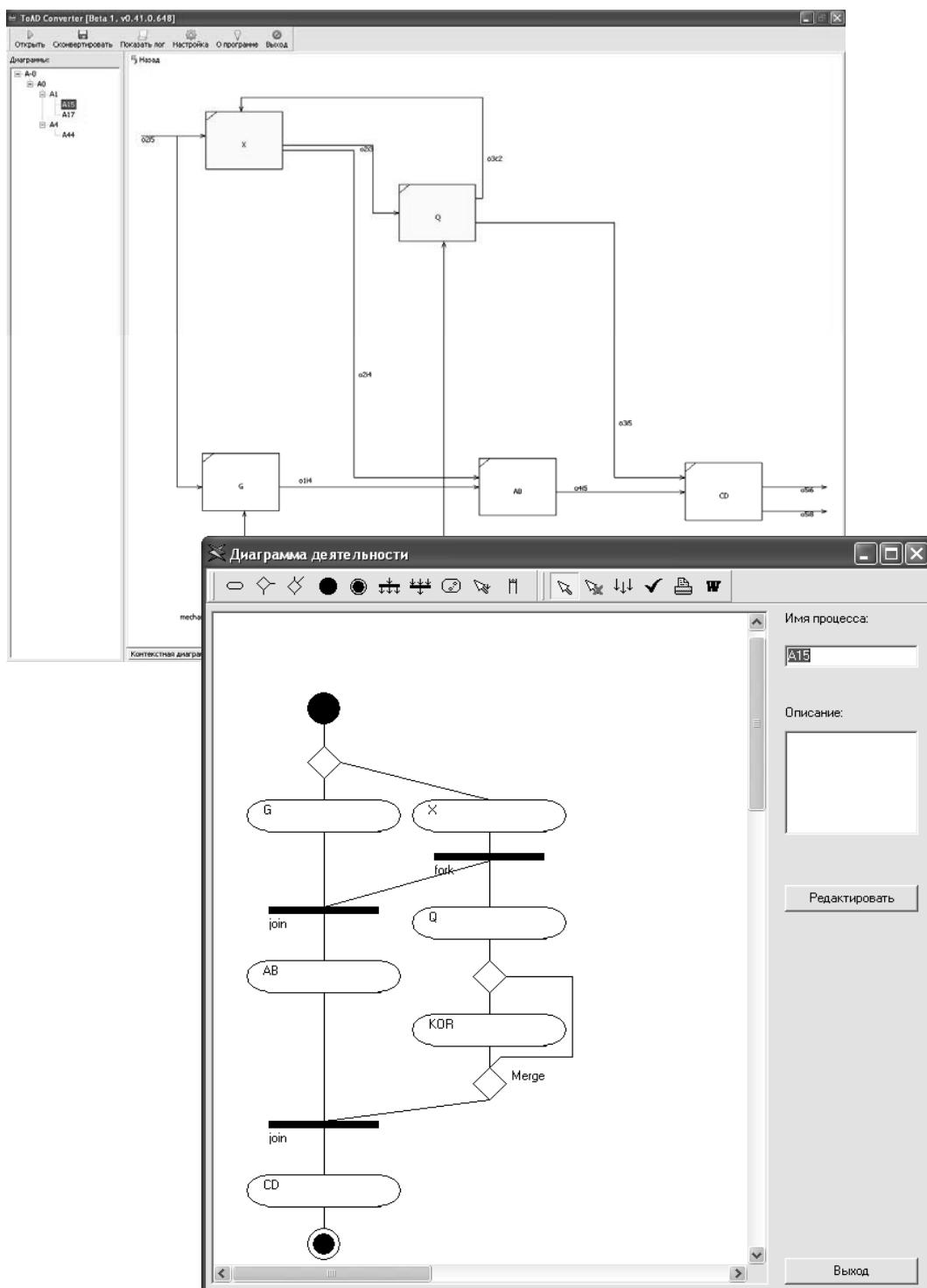
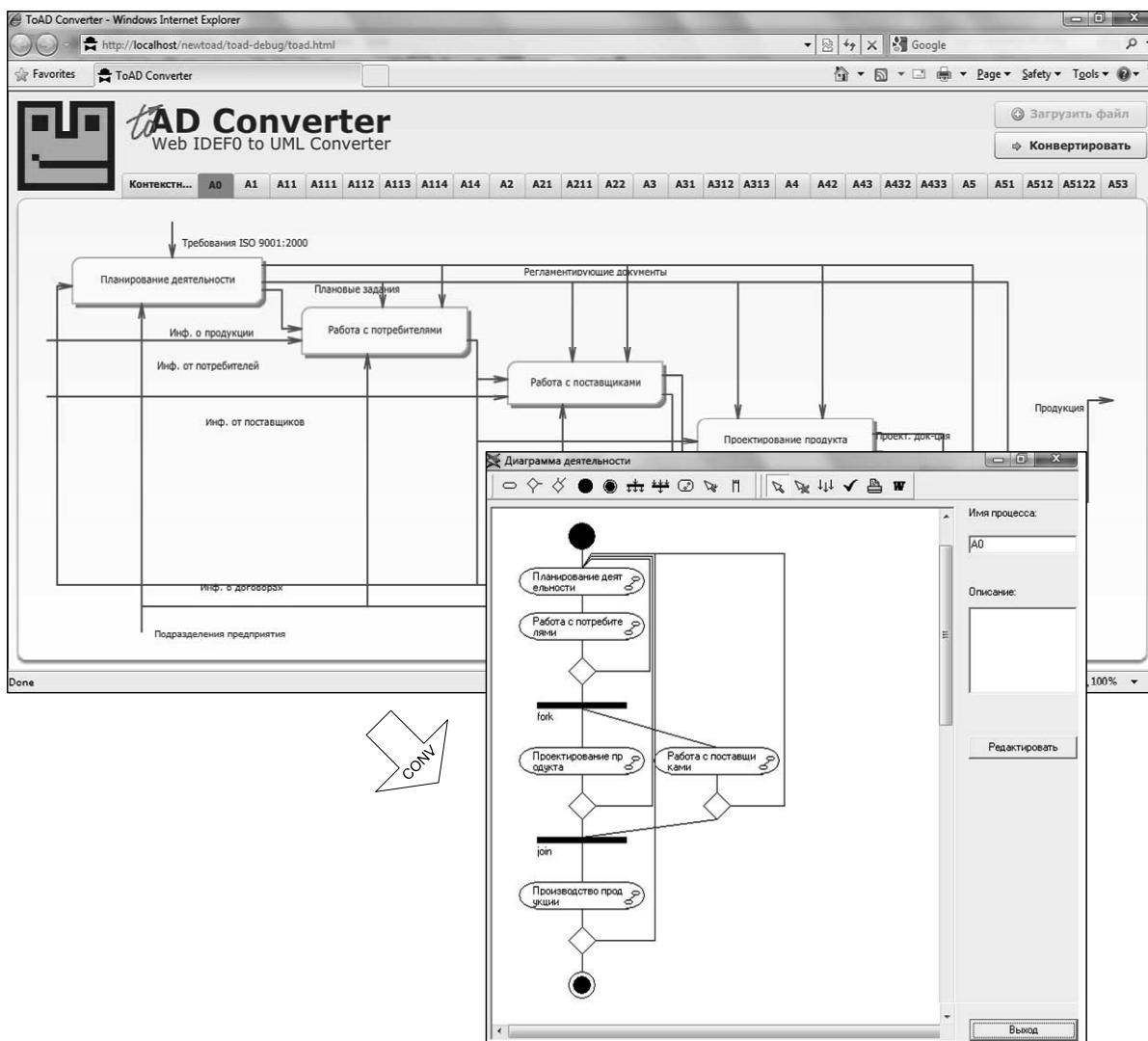


Рис. 11. Результат конвертирования моделей с использованием ToADConverter



**Рис. 12. Результат преобразования диаграммы модели IDEF0 в Конвертере ToADConverter.Web**

На рис. 11 и 12 представлены экранные формы, иллюстрирующие экспорт IDEF0-модели из ALLFusion Process Modeler (BPWin) в конвертер ToADConverter [5] и ToADConverter.Web [6], а также полученный fmh-файл, импортированный и распознанный в Системе [1].

**Преимущества и сфера применения «ToADConverter».** В результате реализации процесса конвертирования IDEF0-моделей в UML-диаграммы и совместного использования разработанного автоматизированного конвертера и системы «СИМ-UML», во-первых, появляется возможность получить отдачу от ранее созданных продуктов интеллектуальной деятельности – от созданных в прошлом IDEF0-моделей деловых процессов; во-вторых, формализованное описание процесса конвертирования облегчает другим разработчикам инstrumentальных средств модификацию описанного и создание нового конвертера, снижает трудоёмкость сопровождения созданной

программной системы конвертирования; в-третьих, можно с минимальными трудозатратами строить имитационные модели по полученным в конвертере UML-диаграммам деятельности, использовать имитационное моделирование при оценке затрат ресурсов [7], инжиниринге и реинжиниринге различных бизнес-процессов в экономике и технике, способствуя повышению производительности общественного труда.

Еще одним преимуществом предлагаемого инструментария, важным в прикладном аспекте, является и то, что по совокупной стоимости владения упоминаемые в статье программные продукты – и конвертер, и система СИМ-UML – не имеют равных среди существующих сегодня инструментальных средств моделирования.

#### **Библиографические ссылки**

1. Хубаев Г.Н., Щербаков С.М., Рванцев Ю.А. Система автоматизированного синтеза имитационных мо-

делей на основе языка UML «СИМ-UML» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2009610414. М.: Роспатент, 2009.

2. **Хубаев Г.Н., Широбокова С.Н.** Конвертирование диаграмм IDEF0 в UML-диаграммы: концепция и правила преобразования// Проблемы экономики. 2008. № 6. С. 139–152.

3. **Khubaev G.N., Shirobokova S.N., Titarenko E.V., Tkachenko Y.V.** Conversion of IDEF0 models into UML-diagrams: the formalized statement of the problem // Математика. Компьютер. Образование: Тезисы XVI Междунар. конф., 19–24 января 2009г. / МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. Ч. 2. 326 с.

4. **Хубаев Г.Н., Широбокова С.Н., Титаренко Е.В., Ткаченко Ю.В.** Алгоритм оптимизации каркаса диаграммы деятельности UML, сформированного на основе универсальных объектов модели IDEF0 // Вопро-

сы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2009. № 5. С. 141–148.

5. **Хубаев Г.Н., Широбокова С.Н., Ткаченко Ю.В., Титаренко Е.В.** Автоматизированный конвертер моделей IDEF0 в диаграммы деятельности языка UML «ToADConverter» («ToADConverter») // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009613137 РФ / Роспатент. № 2009611777.

6. **Хубаев Г.Н., Широбокова С.Н., Ткаченко Ю.В., Титаренко Е.В.** Автоматизированный конвертер моделей IDEF0 в диаграммы деятельности языка UML для Web-серверов «ToADConverter.Web» («ToADConverter.Web») // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009616090 РФ / Роспатент. № 2009614159.

7. **Хубаев Г.Н.** Ресурсоемкость продукции и услуг: процессно-статистический подход к оценке // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 4. С. 22–29.

УДК 658.512:681.31

**С.А. Кузнецов**, канд. техн. наук

(Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск)

S.A.KUZ@mail.ru

## **РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ САПР – ГЛАВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПРИ СОЗДАНИИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ**

*Обоснована необходимость разработки отечественных специализированных программных продуктов, предназначенных для решения конкретных и узкоспециализированных задач в различных предметных областях.*

**Ключевые слова:** программный продукт, система, САПР, база данных, библиотека, предметная область, профессионал, специализированное приложение, специализированная САПР.

*Development necessity of the domestic special program products is suitable for decision of the specific and highly tailored tasks in the different object regions is substantiated.*

**Key words:** program product, SAD system, data base, library, object region, professional, special application, special SAD system.

Первые САПР, начиная с распространённой и популярной системы AutoCAD, задуманы как компьютерные аналоги механических кульманов с увеличенными графическими возможностями. По сути, они являются универсальными программными продуктами, которые ориентированы на создание моделей различных объектов из геометрических примитивов и на показ этих моделей в реалистическом виде. Система AutoCAD, которая разработана американской компанией AutoDesk, играющей ведущую роль в машинной графике, считается стандартным средством автоматизации проектно-конструкторских работ и остаётся (вплоть до одной из последних версий) не чем иным, как универсальной графической

системой. Альтернативами системе AutoCAD являются появившиеся позже система SolidWorks (продукция американской корпорации «SolidWorks Corp.») и различные версии российского программного продукта КОМПАС (разработка отечественной компании АСКОН).

Базовые варианты универсальных программных продуктов являются сложными и разветвлёнными по своей структуре графическими системами, отличающимися друг от друга только графическими возможностями и интерфейсами пользователей. Эти программные продукты не затрагивают реальной технологии проектирования или профессионального решения узкоспециальных задач, не отвечают насущным потребностям по-

давляющего большинства специалистов-профессионалов и представляют собой сложные чертёжные инструменты, которые можно применять там, где требуется получение графических изображений каких либо объектов или явлений. Поэтому все эти продукты (САПР), являясь универсальными графическими системами, т. е. по своей сути «компьютерными кульманами», ориентированы главным образом на абстрактный круг пользователей. Невозможно представить такой универсальный программный продукт, который бы позволял специалистам, работающим в различных областях, на должном уровне быстро и корректно решать текущие задачи. Полноценно представить в одном программном продукте сразу все направления профессиональной деятельности различных специалистов невозможно, так как имеется чрезвычайно большой объём разнородной информации, различие объектной среды и терминологии и даже значений одних и тех же терминов для разных предметных областей и т. д.

Разработчики универсальных графических программ (чертёжных САПР) понимают, что базовые варианты этих программных продуктов не отвечают требованиям подавляющего большинства специалистов-профессионалов. Программные продукты, являясь лишь чертёжно-графическими инструментами, не могут оказать пользователям эффективную поддержку в реальном проектировании и в решении многочисленных и разнообразных узкоотраслевых задач, которые всегда присутствуют в разных предметных областях. Для приобщения универсальных программ к реальному проектированию и привлечения профессионалов разных предметных областей многие как зарубежные, так и отечественные компании, занимающиеся разработкой и реализацией программного обеспечения для САПР, сосредоточились главным образом на разработке и распространении всевозможных специализированных приложений к универсальным графическим системам. Результатом такого подхода явилось то, что в настоящее время все универсальные программные продукты, как иностранные, так и отечественные, имеют постоянно возрастающее количество разнообразных по назначению специализированных приложений.

Практически все известные специализированные приложения к базовым универсальным программным продуктам, ориентированные на решение специфических задач в определённых предметных областях, имеют ряд существенных недостатков, которые подробно рассмотрены и проанализированы в работе [1] при анализе машиностроительных приложений к системе AutoCAD. К таким недостаткам относятся отсутствие расширенных и достоверных баз данных и библиотек для отечественных пользователей, нали-

чие фрагментарных и зачастую некорректных сведений для профессионалов, присутствие в базах данных и библиотеках недопустимых отклонений от стандартов и неприемлемой для профессионалов терминологии, повсеместное использование явных графических излишеств, связанных с красочной демонстрацией трёхмерных моделей хорошо известных для профессионалов стандартных объектов. Указанные недостатки, которые являются характерными практически для всех специализированных приложений к универсальным программным продуктам, обусловлены тем, что эти приложения разрабатываются командами специалистов, в составе которых отсутствуют профессионалы соответствующей специализации.

Сегодня профессионалы различных сфер деятельности испытывают потребность прежде всего не в универсальных чертёжно-графических инструментах общего назначения с их малоэффективными приложениями, а в специализированных программных продуктах. Поэтому желанием любого специалиста-профессионала, имеющего на рабочем месте персональный компьютер и владеющего навыками работы на нем, является приобретение такого программного продукта, который, не требуя дополнительной доработки и адаптации, позволял бы оперативно, профессионально и на должном уровне решать конкретные задачи непосредственно на рабочем месте. Таким программным продуктом может быть специализированная САПР, ориентированная на выполнение специфических функций и решение узкоотраслевых задач, которые стоят перед пользователем САПР на определённом этапе трудовой деятельности. Специалист-профессионал при использовании специализированной САПР должен «погрузиться» в удобную и комфортную для него объектную среду, которая присуща его специализации и характеру решаемых конкретных задач. А это значит, что пользователь специализированной САПР должен оперировать понятиями и правилами, соответствующими его профессиональному деятельности и которые постоянно используются им в ходе выполнения повседневной работы. При этом специализированная САПР должна иметь обширные базы данных и набор библиотек, предназначенных для решения специфических задач в конкретной предметной области. Все остальное, в том числе чертёжно-графические программы в виде чертёжных инструментов и средств моделирования, должно быть приложением к специализированной САПР с теми или иными графическими возможностями. Базы данных и библиотеки специализированной САПР должны включать в себя полную и достоверную информацию в таком объёме, чтобы пользователь мог оперативно получить все необ-

ходимые для работы сведения без привлечения дополнительных источников информации в виде всевозможных «бумажных» справочных пособий и стандартов.

Благодаря пожеланиям и просьбам профессионалов, являющихся пользователями САПР, иностранные и российские разработчики программных продуктов стали уделять определённое внимание созданию специализированных САПР для разных предметных областей. Таким образом, появление на рынке различных специализированных приложений к базовым графическим продуктам явилось неизбежным шагом перехода от универсальных к специализированным САПР.

На российском рынке уже присутствуют (и в последние годы всё чаще стали появляться) вместо приложений к универсальным САПР разнообразные по назначению специализированные САПР как отечественных, так и зарубежных производителей, сведения о которых появляются на страницах журнала «САПР и графика». Однако следует констатировать, что подавляющее большинство существующих специализированных САПР принадлежит к программным продуктам иностранного происхождения: ArchiCAD – программа для архитектурно-строительного проектирования (Венгрия); EnergyCS – программный комплекс для проектирования электроэнергетических систем (США); DEFORM – специализированный программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением (США); Allplan – комплексная система строительного проектирования (Германия); SPI-Sheet-metal Desktop – система проектирования изделий из тонколистовых материалов (Германия); Mold-Creator – система для автоматизированной компоновки пресс-форм (Израиль); PLANT-4D – система для трёхмерного проектирования технологических трубопроводов (Голландия); ProCAST – профессиональная система 3D-моделирования литейных процессов (США); Bentley AutoPIPE – программа для расчёта трубопроводных систем на прочность (США); ANSYS – программный комплекс для расчёта методом конечных элементов (США); StruCad – программный комплекс для моделирования и проектирования зданий, конструкций и сооружений из металлоконструкций (Англия); GeoSeries – программный комплекс для моделирования и проектирования магистральных трубопроводов (США); ArtCAM – программный продукт, предназначенный для проектирования и моделирования объёмных рельефов и изготовления 3D художественных рельефных изделий (Англия); PowerSHAPE-e – система трёхмерного твёрдотельного моделирования и проектирования изделий, технологической оснастки и инструментов сложной формы (Англия); STAAD PRO – программный продукт, пред-

назначенный для анализа и проектирования строительных конструкций методом конечных элементов (США); EdgeCAM – инструмент для автоматизированного создания управляющих программ для станков с ЧПУ (Англия); FORAN – специализированная система для проектирования судов и плавучих платформ (Испания); Tribon – специализированная судостроительная система (Швеция–Англия) и многие другие. Перечисленные профессиональные системы, известные в России благодаря их рекламе и публикациям в журнале «САПР и графика», представляют собой малую часть того огромного количества разнообразных специализированных САПР, которые существуют и применяются в настоящее время за рубежом. Если ознакомиться с сайтами иностранных софтовых компаний, то можно найти сведения о разнообразных по назначению специализированных САПР, ориентированных на специалистов разных предметных областей.

Наличие на рынке специализированных САПР российского происхождения выглядит значительно скромнее. К отечественным специализированным программным продуктам можно отнести следующие системы: APM WinMachine – программный комплекс для решения расчётно-конструкторских задач и проектирования в области машиностроения; СТАРТ – комплексная система для расчёта прочности и жёсткости трубопроводов различного назначения; САПР БАЗИС – комплексная автоматизированная система для проектирования мебельных изделий и технологической подготовки их производства; КЗ-Мебель – программный комплекс для отечественных мебельных предприятий, предназначенный для проектирования, подготовки производства и продажи мебели; LWM Flow – профессиональный инструмент технолога-литейщика, предназначенный для трёхмерного моделирования литейных процессов; ГeМMa 3D – система для геометрического моделирования и программирования обработки для станков с ЧПУ. Как видно, для отечественных профессионалов проблема выбора нужного для их работы специализированного программного продукта представляется на сегодняшний день весьма актуальной.

Примечательным является то обстоятельство, что на страницах последних изданий журнала «САПР и графика» стали появляться публикации [2–4], в которых приводятся достаточно убедительные аргументы целесообразности использования профессионалами специализированных САПР, а не универсальных. При этом поднимается проблема давно назревшей необходимости создания новых отечественных специализированных программных продуктов, ориентированных на решение реальных задач и которые без каких либо доработок можно было бы использо-

вать в конкретной предметной области. В последнее время на рынке САПР появились специализированные программные продукты российского происхождения: «САПР-АЛЬФА» – комплексные CAD-решения для проектирования электрики, автоматики и систем автоматизации (компания «САПР-АЛЬФА», г. Москва); Temper-3D – программа для трёхмерного расчёта температурных полей (ГОУ СибАДИ, г. Омск); «СТАРКОН» – программный комплекс для расчёта и проектирования строительных конструкций и сооружений (фирма ООО «Еврософт», г. Москва); Norm CAD – пакет прикладных программ для расчёта строительных конструкций (ООО «ЦРСАП САПРОТОН», г. Реутов, Москв. обл.).

Однако, к большому сожалению, российские компании, работающие в области создания программного обеспечения для САПР, уделяют недостаточно внимания разработке специализированных САПР. Более того, несмотря на очевидные достоинства специализированных программных продуктов, в которых остро нуждаются отечественные профессионалы различных сфер деятельности, в последнее время на рынке появляются и активно рекламируются в печатных и электронных источниках информации новые универсальные САПР. К таким без сомнения можно отнести программы NanoCAD, ZWCAD и bCAD, позиционируемые их разработчиками в качестве альтернатив дорогой и сложной системе AutoCAD.

NanoCAD – это универсальная программа автоматизированного проектирования, разработанная российской компанией ЗАО «Нанософт», основное направление деятельности которой автоматизация проектирования в различных предметных областях. Программный продукт NanoCAD во многом аналогичен системе AutoCAD. Программа NanoCAD стала дополняться специализированными приложениями, которые похожи с программными продуктами компании Csoft – ведущим разработчиком программного обеспечения в виде специализированных приложений к AutoCAD в области машиностроения, промышленного и гражданского строительства, архитектурного проектирования, землеустройства, проектирования ЛЭП и т. д. Имеющиеся в настоящее время отдельные приложения к программному продукту NanoCAD предназначены для автоматизации проектно-конструкторских работ в машиностроении, строительстве промышленных и гражданских объектов, дорожном строительстве, проектировании объектов инфраструктур и т. д. В будущем компания ЗАО «Нанософт» разработает программные решения для архитекторов, проектирования металлоконструкций и фундаментов, а также для работы с генпланом и внешними коммуникациями и т. д. Более подробную информа-

цию о разработках и планах компании ЗАО «Нанософт» можно узнать на сайте [www.nanocad.ru](http://www.nanocad.ru).

ZWCAD – это программный комплекс, предназначенный для архитекторов, инженеров, строителей, конструкторов, технологов, дизайнеров и других специалистов различных сфер деятельности и использующийся как универсальный инструмент двух- и трёхмерного моделирования. Программный продукт ZWCAD разработан китайской компанией ZW SOFT как альтернатива системе AutoCAD. Программный комплекс ZWCAD по существу является явным аналогом графического редактора AutoCAD, и в него сразу стали «перекочёвывать» различные специализированные приложения из разнообразных по назначению приложений к AutoCAD. Перечислим некоторые из первых приложений, разработанных ранее для AutoCAD, а в дальнейшем адаптированных и оптимизированных для ZWCAD. Программа Rtools – аналог приложения к AutoCAD СПДС GraphiCS (предназначена для оформления строительной документации в соответствии с требованиями СПДС); программа «ПРОКАТ» – аналог приложения к AutoCAD AProfile (предназначена для отрисовки на чертежах стандартного стального профиля); программный комплекс «ИНЖКАД» – аналог приложения к AutoCAD «ИНЖКАД» (предназначен для проектирования наружных инженерных сетей и включающий такие модули, как Водоснабжение, Водоотведение, Теплоснабжение, Газоснабжение, Электроснабжение, Вентиляция и Кондиционирование); программный комплекс «ТеплоГазСтрой» – аналог приложения к AutoCAD CR-Vent (предназначен для проектирования воздуховодов и объектов теплоснабжения); программа САПР ЦВК – аналог проблемно-ориентированной надстройки к AutoCAD САПР ЦВК (предназначена для автоматизированной подготовки документации на вторичные цепи электроустановок); программа «ПроГео» – аналог приложения к AutoCAD «ПроГео» (предназначена для обработки геодезических данных и формирования документов для межевого дела). Программный продукт ZWCAD будет и в дальнейшем пополняться специализированными приложениями, разработкой которых занимаются как отдельные отечественные специалисты, так и российская компания C Soft Development – один из ведущих разработчиков специализированных приложений к системе AutoCAD.

Система bCAD занимает особое место среди новых универсальных программных продуктов, так как служит наглядным примером перехода универсальной САПР в специализированные САПР. Система bCAD является программным продуктом российской компании «ПроПроГруппа», которая занимается разработкой прикладного программного обеспечения, включающего

функции компьютерного черчения, объектного моделирования, получения реалистических изображений и анимации. По представленным рекламным материалам программный продукт bCAD был разработан как система для широкого спектра приложений, т. е. он функционально универсален. Серия приложений к продукту bCAD ориентирована на разные области применения довольно обширным кругом профессиональных пользователей. Из публикаций на страницах журнала «САПР и графика» в 1998–1999 гг. следует, что система bCAD представлена специалистами компании «ПроПроГруппа» как альтернатива системе AutoCAD. Поэтому по аналогии с AutoCAD система bCAD предназначена для выполнения чертёжных, проектных и дизайнерских работ, оформления конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД, а также для получения реалистических изображений. Однако начиная с 2000 г. компания «ПроПроГруппа» узко специализирует программный продукт bCAD, разрабатывая к нему приложения: bCAD Мебель, bCAD Мебель-Про, bCAD Витрина, bCAD Салон и т. п., которые предназначены как для автоматизации самого процесса проектирования мебели, так и для автоматизации создания торгового дизайна мебельной продукции и процедуры продажи мебели в торговом зале. Об очевидной направленности большинства разработок компании «ПроПроГруппа» на мебельную тематику говорит и тот факт, что публикации о программном продукте bCAD в 2000–2008 гг. размещены на страницах специализированных журналов «Мебельщик», «Мебель крупным планом», «Мебельное обозрение», «Мебельщик Сибири», «Мебельный бизнес» и «Наша мебель». Таким образом, можно сказать, что наряду с существующими отечественными специализированными САПР, предназначенными для проектирования, производства и продажи мебельных изделий, к которым относятся программы «БАЗИС» (фирма «Базис-Центр») и «КЗ-Мебель» (НВЦ «ГЕОС»), появилась специализированная САПР для мебельщиков от компании «ПроПроГруппа». Теперь выбор для мебельщиков-профессионалов наиболее подходящей для них САПР ещё более расширится.

Есть уверенность в том, что и другие российские софтовские компании по примеру компании «ПроПроГруппа» будут уделять больше внимания разработке специализированных САПР самого различного назначения. Несомненно, что наличие на рынке таких САПР позволит выбрать наиболее подходящую специализированную САПР не только мебельщикам, но и многим другим отечественным профессионалам различных сфер деятельности.

Необходимо подчеркнуть, что над созданием специализированной САПР должна работать команда разработчиков, главенствующая роль в которой принадлежит высокопрофессиональным специалистам, обладающим обширными знаниями и опытом практической работы в том направлении предметной области, на которое и ориентирована создаваемая САПР. Так, например, специализированный программный продукт ArchiCAD разработан венгерской компанией Graphisoft, являющейся ведущим в мире разработчиком программного обеспечения в области архитектурного проектирования и строительной индустрии, а специализированная система FORAN разработана испанской судостроительной фирмой SENER.

Главными и основополагающими составными частями специализированной САПР должны быть базы данных и библиотеки, содержащие исчерпывающую и достоверную информацию в том направлении предметной области, в котором и предстоит специалисту-профессионалу решать насущные задачи. Поэтому при создании любой специализированной САПР и разработке баз данных и библиотек должны участвовать профессионалы той предметной области, на которую ориентирована разрабатываемая САПР. Источниками информации для баз данных и библиотек, принадлежащих конкретной специализированной САПР, должны служить соответствующие стандарты, каталоги, справочники и новейшие сведения, заимствованные из современной справочной литературы. Специализированные САПР, предназначенные для российских профессионалов, должны разрабатываться отечественными компаниями, а информационное обеспечение программных продуктов базироваться на отечественных источниках.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

специалисты-профессионалы знают, что при решении одних и тех же задач более эффективными являются специализированные САПР, а не универсальные программные продукты. Однако, как показал анализ рынка САПР, большинство специализированных САПР являются, к сожалению, программными продуктами зарубежного происхождения. Поэтому российские профессионалы вынуждены пользоваться иностранными или отечественными универсальными САПР и их малоэффективными специализированными приложениями;

отечественным специалистам, занимающимся разработкой программных продуктов, следует приложить максимум усилий к созданию разнообразных специализированных САПР. При этом в команде разработчиков определяющую роль должны играть профессиональные и высо-

коквалифицированные специалисты соответствующей предметной области. Несомненным достоинством отечественных САПР является то, что они соответствуют российскому менталитету, базируются на отечественных стандартах и справочниках, разговаривают с пользователями на русском языке, имеют понятный интерфейс и вполне доступны по стоимости.

#### **Библиографические ссылки**

1. Кузнецов С.А. Машиностроительные приложения к AutoCAD: мифы и реальность // Приборы и систе-

мы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 1. С. 16–20.

2. Бунаков Павел. Организация конструкторско-технологической подготовки позаказного производства в комплексной САПР корпусной мебели // САПР и графика. 2008. № 1. С. 22–25.

3. Выбор оптимальной CAD/CAM-системы для проектирования литейной оснастки // САПР и графика. 2008. № 2. С. 46–49.

4. Грачевский Андрей. Апперкот. Почему всё может измениться на рынке САПР // САПР и графика. 2008. № 5. С. 76–78.

УДК 621.9.06-52

**Я.Л. Либерман, проф., М.С. Антропов**

(Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург)

mikhaill88@mail.ru

### **СИСТЕМА ФАЗЗИ-УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ РОБОКАРА**

*Предложена система управления скоростью робокара с элементами искусственного интеллекта, построенная на основе математического аппарата нечёткой логики (фаззилогики). Система позволяет автоматически изменять скорость движения робокара в зависимости от массы перемещаемого груза и радиуса закругления пути. Описаны алгоритм работы системы и его программная реализация на языке Delphi, а также оригинальная схема преобразователя радиуса поворота робокара в код.*

**Ключевые слова:** робот, гибкое производство, управление.

*The fuzzy-control system of speed robocar with artificial intellect elements constructed from a fuzzy logic mathematical apparatus is proposed. The system allows to change automatic the robot truck speed depending on the transported goods mass and the track curvature radius. The system work algorithm and its program implementation in the Delphi language, as well as the original scheme of the robocar turn radius transformation in the code are described.*

**Key words:** robot, flexible fabrication, control.

В гибких производственных системах (ГПС) часто используются безрельсовые робокары, траектория движения которых задаётся управляющей микроЭВМ, работающей совместно с устройством маршрутослежения оптоэлектронного (излучатель – светоотражающая полоса) или индуктивного типа (пара индуктивных датчиков, включённых по дифференциальной схеме, – низкочастотный кабель) [1, 2]. Таковы, в частности, робокары на базе автоматических тележек типа «Электроника» МП-12Т, а также тележки, разработанной в Институте атомной энергетики им. И.В. Курчатова, и др. [3]. Движение подобных робокаров, как правило, происходит с постоянной скоростью, обеспечивающей безопасность транспортирования грузов. Вместе с тем движе-

ние с постоянной скоростью не всегда позволяет минимизировать время доставки грузов по назначению и обеспечить требуемую производительность робокара. С этой точки зрения целесообразна разработка системы управления скоростью робокара, дополняющей систему управления траекторией его движения. Такая система, разработанная в УрФУ, описана в настоящей статье. Она построена применительно к робокару, имеющему следующую техническую характеристику: максимальная масса транспортируемого груза 500 кг, габаритные размеры 1800×850 мм, расстояние между осями колёс 100 см.

В связи с трудностью расчёта сил сцепления колёс робокара с поверхностью пола цеха при различных нагрузках и определения центробеж-

ных сил, действующих на робокар при поворотах, следует обратиться к опыту квалифицированных водителей электрокаров и построить необходимую систему управления скоростью. Это можно осуществить, применяя элементы искусственного интеллекта, базирующиеся на математическом аппарате нечёткой логики, или фаззи-логики.

Главным звеном любой системы управления, базирующемся на фаззи-логике, является фаззи-регулятор, действие которого основано на знаниях экспертов, способных сформулировать базу правил в форме [4]

ЕСЛИ (предпосылка), ТО (вывод).

С учётом этих знаний строится база данных с функциями принадлежности для предпосылок (входных переменных) и выводов (выходной переменной). В рассматриваемом случае функциями принадлежности для предпосылок могут быть  $f(m)$  и  $f(R)$ , а для выводов —  $f(v)$ , где  $m$  — масса груза, перевозимого робокаром;  $R$  — текущий радиус поворота;  $v$  — текущая скорость робокара.

Функция принадлежности в общем случае — это функция, показывающая, в какой степени (насколько) элементы некоторого множества обладают характеристическим свойством, используемым для задания этого множества [5]. Самой простой является треугольная функция принадлежности вида

$$f(x, a, b) = |x-a|/b, \quad (1)$$

где  $x$  — переменная;  $a$  и  $b$  — параметры.

Функция обладает достаточной адаптационной способностью, а потому в качестве  $f(m)$ ,  $f(R)$  и  $f(v)$  при разработке требуемой системы управления приняли именно её.

Для конкретизации параметров кривой (1) применительно к лингвистическим переменным  $m$ ,  $R$ ,  $v$  и их интервалам, обозначенным, как это принято в нечёткой логике, символическими именами — термами, вначале потребовалось описать знания экспертов в виде эвристических постулатов:

движение по прямой, т. е. радиус очень-очень большой (ОЧ ОЧ Б), следует производить с максимальной (М) скоростью, независимо от массы груза;

если масса очень малая (ОЧ М) и радиус очень малый (ОЧ М), то робокар должен двигаться с малой рабочей (МР) скоростью;

если масса очень малая (ОЧ М) и радиус малый (МАЛ), то робокар должен двигаться со средней рабочей (СР) скоростью;

если масса очень малая (ОЧ М) и радиус средний (СР), то робокар должен двигаться с большой рабочей (БР) скоростью;

если масса очень малая (ОЧ М) и радиус большой (БОЛ), то робокар должен двигаться с наибольшей рабочей (НБР) скоростью;

если масса очень малая (ОЧ М) и радиус очень большой (ОЧ Б), то робокар должен двигаться с максимальной (М) скоростью;

если масса малая (МАЛ) и радиус очень малый (ОЧ М), то робокар должен двигаться с малой рабочей (МР) скоростью;

если масса малая (МАЛ) и радиус малый (МАЛ), то робокар должен двигаться со средней рабочей (СР) скоростью;

если масса малая (МАЛ) и радиус средний (СР), то робокар должен двигаться со средней рабочей (СР) скоростью;

если масса малая (МАЛ) и радиус большой (БОЛ), то робокар должен двигаться с большой рабочей (БР) скоростью;

если масса малая (МАЛ) и радиус очень большой (ОЧ Б), то робокар должен двигаться с наибольшей рабочей (НБР) скоростью;

если масса средняя (СР) и радиус очень малый (ОЧ М), то робокар должен двигаться с наименьшей рабочей (НМР) скоростью;

если масса средняя (СР) и радиус малый (МАЛ), то робокар должен двигаться с малой рабочей (МР) скоростью;

если масса средняя (СР) и радиус средний (СР), то робокар должен двигаться со средней рабочей (СР) скоростью;

если масса средняя (СР) и радиус большой (БОЛ), то робокар должен двигаться с большой рабочей (БР) скоростью;

если масса средняя (СР) и радиус очень большой (ОЧ Б), то робокар должен двигаться с наибольшей рабочей (НБР) скоростью;

если масса большая (БОЛ) и радиус очень малый (ОЧ М), то робокар должен двигаться с ползучей (П) скоростью;

если масса большая (БОЛ) и радиус малый (МАЛ), то робокар должен двигаться с наименьшей рабочей (НМР) скоростью;

если масса большая (БОЛ) и радиус средний (СР), то робокар должен двигаться с малой рабочей (МР) скоростью;

если масса большая (БОЛ) и радиус большой (БОЛ), то робокар должен двигаться со средней рабочей (СР) скоростью;

если масса большая (БОЛ) и радиус очень большой (ОЧ Б), то робокар должен двигаться с большой рабочей (БР) скоростью;

если масса очень большая (ОЧ Б) и радиус очень малый (ОЧ М), то робокар должен двигаться с ползучей (П) скоростью;

если масса очень большая (ОЧ Б) и радиус малый (МАЛ), то робокар должен двигаться с ползучей (П) скоростью;

если масса очень большая (ОЧ Б) и радиус средний (СР), то робокар должен двигаться с наименьшей рабочей (НМР) скоростью;

если масса очень большая (ОЧ Б) и радиус большой (БОЛ), то робокар должен двигаться с малой рабочей (МР) скоростью;

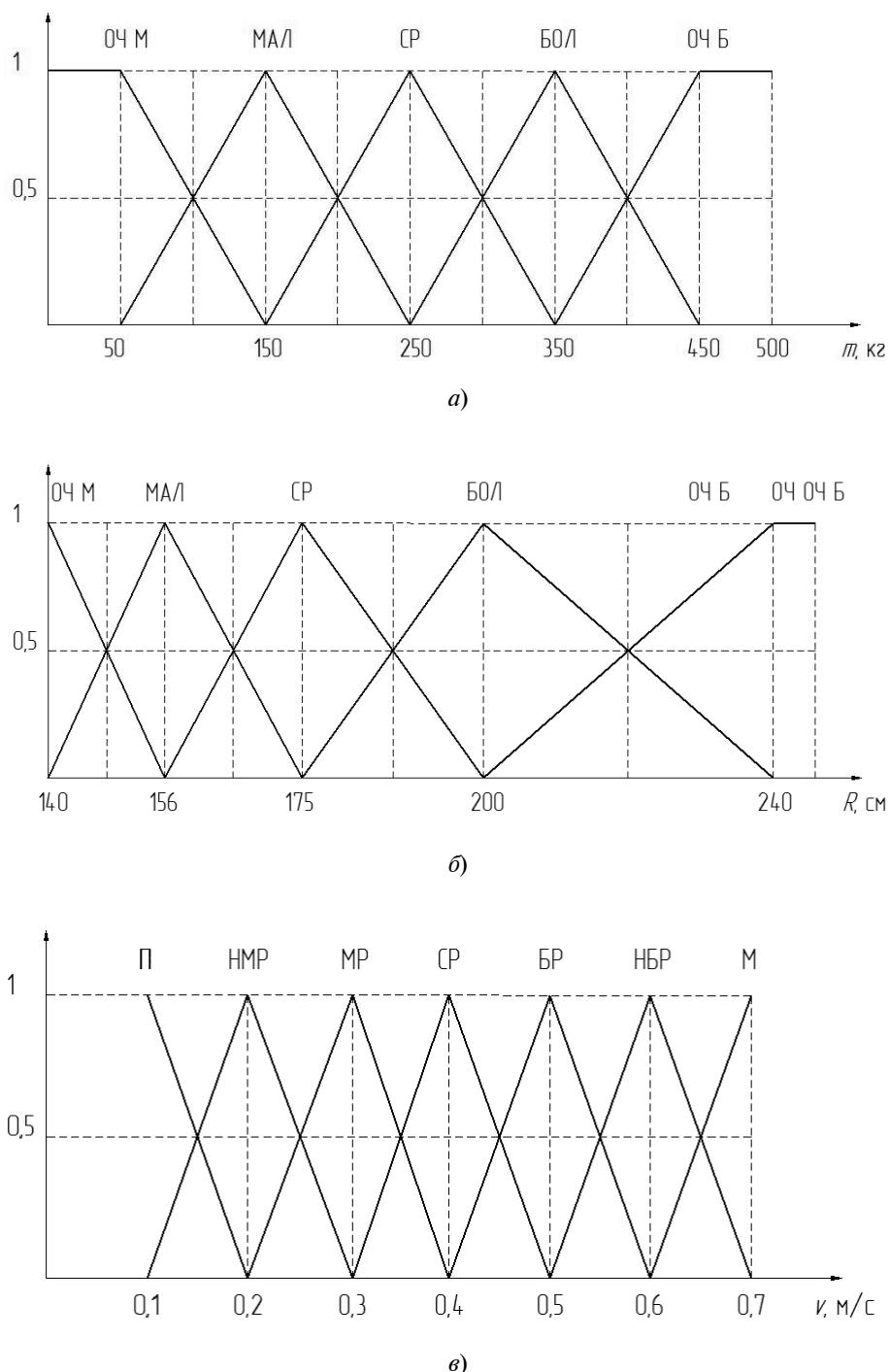
если масса очень большая (ОЧ Б) и радиус очень большой (ОЧ Б), то робокар должен двигаться со средней рабочей (СР) скоростью.

Максимальное значение всякой функции принадлежности, по определению, равно 1. Согласно работе [4], правомерно полагать, что значения функций, соответствующих двум соседним термам, в точке их пересечения равны 0,5. Учитывая это и исходя из типичных условий эксплуатации робокаров, были получены интерпретации функций принадлежности типа треугольной для пяти термов лингвистической переменной  $m$ , шести

Таблица 1

## Интерпретации функции принадлежности (1)

Лингвистическая переменная	Обозначение терма	Интервал, соответствующий терму	Функция принадлежности, соответствующая терму
$m$	ОЧ М	[0; 50]	$f_1(m) = 1$
		[50; 150]	$f_1(m) = (150 - m)/100$
	МАЛ	[50; 150]	$f_2(m) = (m - 50)/100$
		[150; 250]	$f_2(m) = (250 - m)/100$
	СР	[150; 250]	$f_3(m) = (m - 150)/100$
		[250; 350]	$f_3(m) = (350 - m)/100$
	БОЛ	[250; 350]	$f_4(m) = (m - 250)/100$
		[350; 450]	$f_4(m) = (450 - m)/100$
	ОЧ Б	[350; 450]	$f_5(m) = (m - 350)/100$
		[450; 500]	$f_5(m) = 1$
$R$	ОЧ М	[140; 156]	$f_1(R) = (156 - R)/16$
	МАЛ	[140; 156]	$f_2(R) = (R - 140)/16$
		[156; 175]	$f_2(R) = (175 - R)/19$
	СР	[156; 175]	$f_3(R) = (R - 156)/19$
		[175; 200]	$f_3(R) = (200 - R)/25$
	БОЛ	[175; 200]	$f_4(R) = (R - 175)/25$
		[200; 240]	$f_4(R) = (240 - R)/40$
	ОЧ Б	[200; 240]	$f_5(R) = (R - 200)/40$
	ОЧ ОЧ Б	> 240	$f_6(R) = 1$
$v$	П	[0,1; 0,2]	$f_1(v) = (0,2 - v)/0,1$
	НМР	[0,1; 0,2]	$f_2(v) = (v - 0,1)/0,1$
		[0,2; 0,3]	$f_2(v) = (0,3 - v)/0,1$
	МР	[0,2; 0,3]	$f_3(v) = (v - 0,2)/0,1$
		[0,3; 0,4]	$f_3(v) = (0,4 - v)/0,1$
	СР	[0,3; 0,4]	$f_4(v) = (v - 0,3)/0,1$
		[0,4; 0,5]	$f_4(v) = (0,5 - v)/0,1$
	БР	[0,4; 0,5]	$f_5(v) = (v - 0,4)/0,1$
		[0,5; 0,6]	$f_5(v) = (0,6 - v)/0,1$
	НБР	[0,5; 0,6]	$f_6(v) = (v - 0,5)/0,1$
		[0,6; 0,7]	$f_6(v) = (0,7 - v)/0,1$
	М	[0,6; 0,7]	$f_7(v) = (v - 0,6)/0,1$



**Рис. 1. Графики функций принадлежности:**

a – для лингвистической переменной  $m$ ; б – для лингвистической переменной  $R$ ;  
в – для лингвистической переменной  $v$

термов лингвистической переменной  $R$  и семи термов лингвистической переменной  $v$  (табл. 1, рис. 1). Это позволило организовать сформулированные правила в виде матрицы (табл. 2). С помощью этой матрицы нетрудно производить операцию фазификации – установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной и значением функции принадлежно-

сти соответствующего ей терма переменной. Поскольку нечеткая логика предполагает возможность частичного наложения термов, в процессе фазификации не исключено получение нескольких значений функции принадлежности, соответствующих одному значению лингвистической переменной. Для того чтобы остановиться на одном из полученных значений, после фазификации

Таблица 2  
Матрица правил

Радиус	Масса				
	ОЧ М	МАЛ	СР	БОЛ	ОЧ Б
ОЧ М	МР	МР	НМР	П	П
МАЛ	СР	СР	МР	НМР	П
СР	БР	СР	СР	МР	НМР
БОЛ	НБР	БР	БР	СР	МР
ОЧ Б	М	НБР	НБР	БР	СР
ОЧ ОЧ Б	М	М	М	М	М

обычно проводят агрегирование. Эта операция представляет собой процедуру определения степени истинности найденных значений функций принадлежности и установление связи между ними, описываемой чаще всего либо логическим

«и», либо логическим «или». В данном случае указанная связь описана как «и».

После агрегирования фаззи-регулятор должен выполнять активирование – операцию, направленную на расширение агрегирования на все правила, описанные матрицей. Эта операция аналогична композиции нечётких отношений и в рассматриваемом случае была выполнена простейшим образом – по условию минимума. Это дало возможность далее достаточно легко (по правилу максимума) осуществить операцию аккумулирования – процедуру отыскания значения функции принадлежности входного параметра регулятора.

Операции агрегирования, активирования и аккумулирования в совокупности представляют собой механизм нечётких выводов, в результате которых переменной  $m'$  присваивается значение входной переменной  $m'$ , переменной  $R'$  – значение входной переменной  $R'$ , и обусловленные этим функции  $f(m) = f(m')$  и  $f(R) = f(R')$  дают

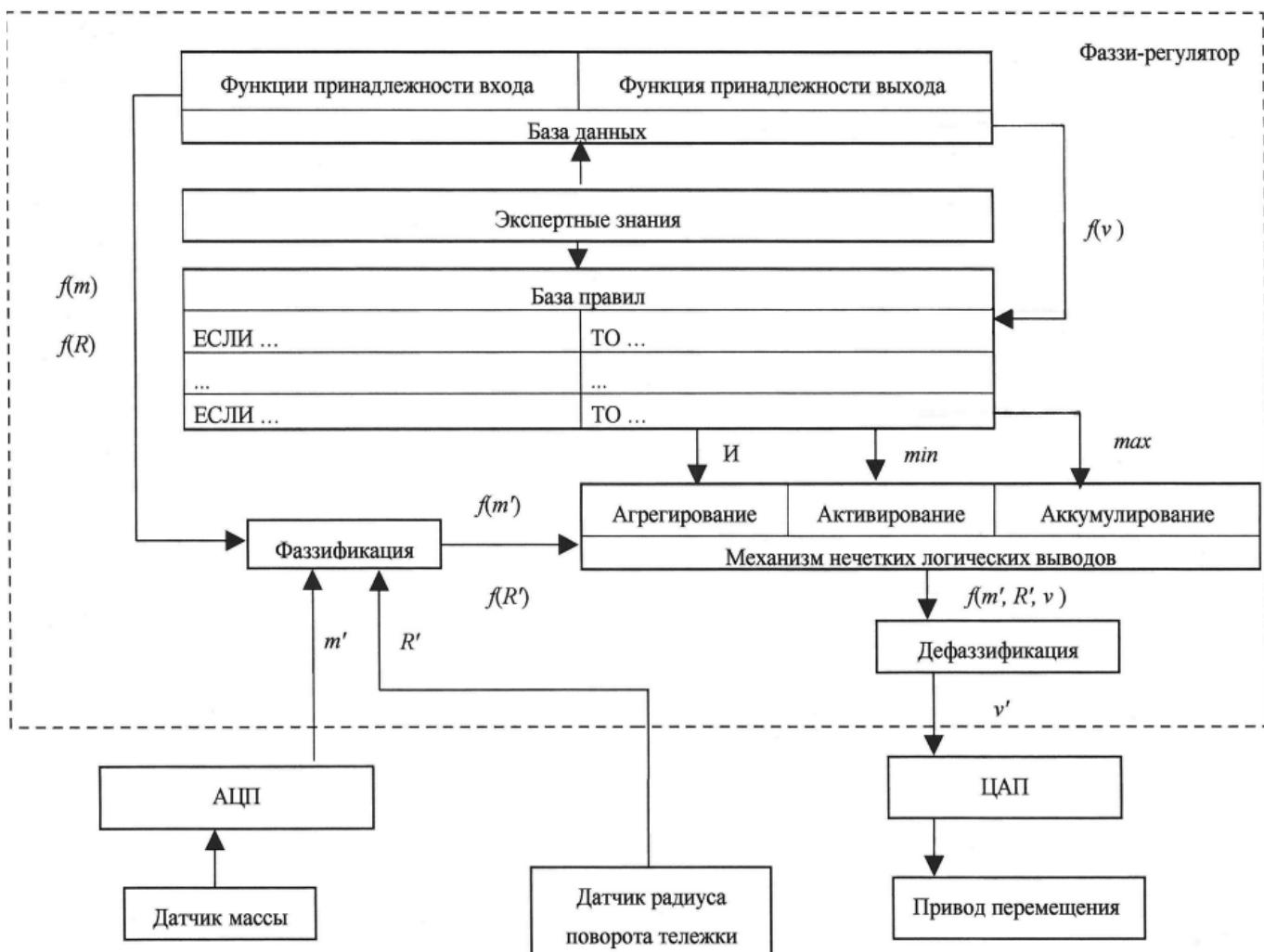


Рис. 2. Функциональная схема предлагаемой системы управления

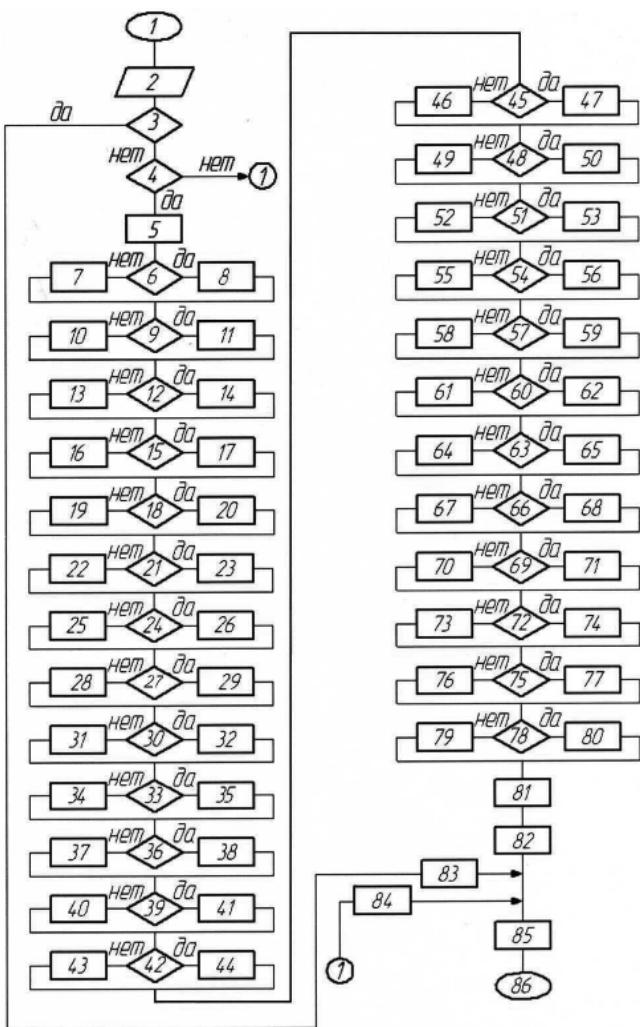


Рис. 3. Алгоритм работы фаззи-регулятора

вполне определённую функцию  $f(m', R', v)$ . Если теперь произвести операцию дефазификации – отыскание по  $f(m', R', v)$  величины  $v'$  (удобнее всего для этого применить метод центра тяжести), то нетрудно получить значение требуемой скорости движения робокара, отвечающее исходной базе знаний.

Построенный на основе описанных принципов фаззи-регулятор формирует выходной сигнал, задающий скорость движения робототележки в процессе её движения.

Функциональная схема предлагаемой системы управления (рис. 2) включает датчики массы и радиуса поворота робокара, аналого-цифровой преобразователь, преобразователь код-код, фаззи-регулятор, цифроаналоговый преобразователь и регулируемый привод перемещения.

Алгоритм работы фаззи-регулятора представлен на рис. 3, где 1 – начало; 2 – ввод массы груза и радиуса поворота робокара; 3 – проверка:  $R' > 240$ ?; 4 – проверка: значения массы груза и

радиуса принадлежат заданному интервалу?; 5 – фазификация входных переменных (массы груза и радиуса); 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75, 78 – проверка:  $f_i(m') > 0$  И  $f_j(R') > 0$  И  $f_i(m') > f_j(R')$ ?; 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58, 61, 64, 67, 70, 73, 76, 79 – присвоение переменной  $f(m, R', v)$  значения  $f_j(R')$ ; 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68, 71, 74, 77, 80 – присвоение переменной  $f(m', R, v)$  значения  $f_i(m')$ ; 81 – аккумулирование (выбор наибольшего значения) функций принадлежности  $f(m', R', v)$ ; 82 – дефазификация выходной переменной скорости  $v'$  по формуле

$$\begin{aligned} v' = & [f_1(v)v_1 + f_2(v)v_2 + f_3(v)v_3 + f_4(v)v_4 + \\ & + f_5(v)v_5 + f_6(v)v_6 + f_7(v)v_7]/[f_1(v) + f_2(v) + \\ & + f_3(v) + f_4(v) + f_5(v) + f_6(v) + f_7(v)]; \end{aligned}$$

83 – присвоение величине  $v'$  значения 0,7 при  $R' > 240$ ; 84 – присвоение величине  $v'$  значения 0 при ошибке ввода; 85 – вывод значения  $v'$ ; 86 – конец.

Принцип действия и устройство датчика радиуса поворота робокара могут быть проиллюстрированы рис. 4 и 5. Датчик служит для преобразования угла поворота  $\beta$  руля тележки робокара непосредственно в естественный двоичный код

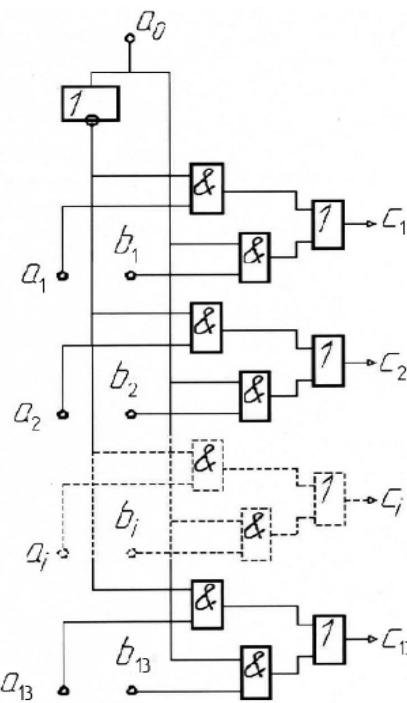
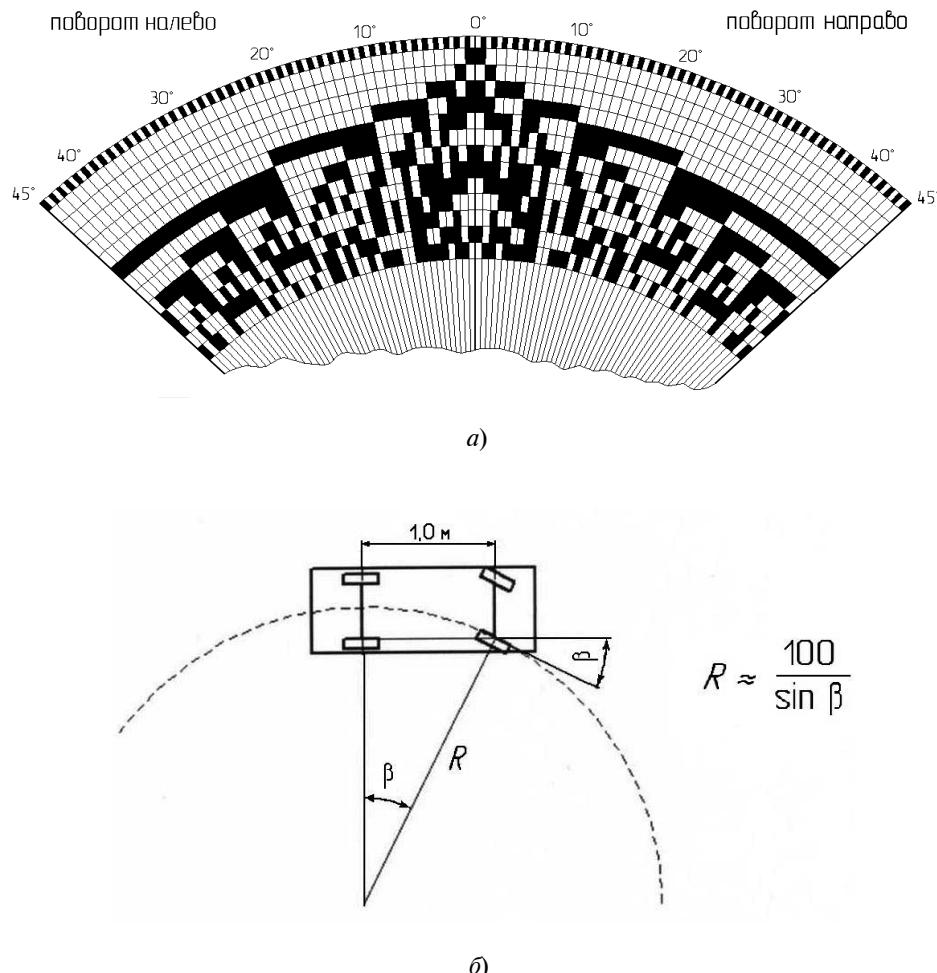


Рис. 4. Система считывания кода со шкалы



**Рис. 5. Кодовая шкала датчика радиуса поворота робокара (а) и схема взаимосвязи угла  $\beta$  с радиусом  $R$  поворота тележки робокара (б)**

(ЕДК) радиуса  $R$ . Для этого он снабжён кодовой шкалой, на которую в соответствии с комбинациями ЕДК, отображающими  $R$ , нанесены активные и пассивные (в частности, магнитные и немагнитные) участки, и системой считывания кода со шкалы (в частности, магнитными головками). Шкала построена по таблице соответствий  $\beta$  и  $R$  (табл. 3) и имеет 13 основных дорожек – по числу разрядов двоичных эквивалентов  $R$ . Она закрепляется неподвижно на корпусе робототележки, а система считывания – также неподвижно, но на руле. При повороте руля относительно корпуса головки считывают кодовые комбинации со шкалы и водят их в фаззи-регулятор. Во избежание ошибок считывания при переходе от одной кодовой комбинации к другой (ошибок граничного считывания) в датчике применён метод двойного считающего элемента [6]. В данном случае он реализован следующим образом. К шкале добавлена вспомогательная дорожка, на которой имеются магнитные метки, по ширине равные половине дискреты датчика (0,5 град.) и

расположенные с таким же интервалом. Каждая метка нанесена так, что одна её граница совпадает с границей дискреты датчика, а другая – с серединой дискреты. Чтение меток со вспомогательной дорожки производится головкой  $a_0$ . Головки считывания кода  $a_1, a_2, \dots, a_{13}$  с основных дорожек шкалы продублированы головками  $b_1, b_2, \dots, b_{13}$ , причём расположены они радиально, двумя рядами, расстояние между рядами 0,2–0,3 дискреты. В процессе работы датчика при переходе от одной кодовой комбинации к соседней на выходе головки  $a_0$  сигнал «0» меняется на «1». В то время как предыдущая комбинация считывалась головками  $a_1, a_2, \dots, a_{13}$ , следующая за ней будет считываться головками  $b_1, b_2, \dots, b_{13}$ . Когда метка, считываемая головкой  $a_0$ , закончится, эта головка выполнит обратное переключение. В результате на выходах датчика  $c_1, c_2, \dots, c_{13}$  никогда не появятся ложные комбинации, которые могут возникать на границах между дискретами из-за погрешностей изготовления датчика.

Таблица 3

Таблица соответствий

угол $\beta$ , рад	Радиус $R$ , см	ЕДК радиуса $R$	угол $\beta$ , град	Радиус $R$ , см	ЕДК радиуса $R$
45	141	0 000 010 001 101	22	267	0 000 100 001 011
44	144	0 000 010 010 000	21	279	0 000 100 010 111
43	147	0 000 010 010 011	20	292	0 000 100 100 100
42	149	0 000 010 010 101	19	307	0 000 100 110 011
41	152	0 000 010 011 000	18	324	0 000 101 000 100
40	156	0 000 010 011 100	17	342	0 000 101 010 110
39	159	0 000 010 011 111	16	363	0 000 101 101 011
38	162	0 000 010 100 010	15	386	0 000 110 000 010
37	166	0 000 010 100 110	14	413	0 000 110 011 101
36	170	0 000 010 101 010	13	445	0 000 110 111 101
35	174	0 000 010 101 110	12	481	0 000 111 100 001
34	179	0 000 010 110 011	11	524	0 001 000 001 100
33	184	0 000 010 111 000	10	576	0 001 001 000 000
32	189	0 000 010 111 101	9	639	0 001 001 111 111
31	194	0 000 011 000 010	8	719	0 001 011 001 111
30	200	0 000 011 001 000	7	821	0 001 100 110 101
29	206	0 000 011 001 110	6	957	0 001 110 111 101
28	213	0 000 011 010 101	5	1147	0 010 001 111 011
27	220	0 000 011 011 100	4	1434	0 010 110 011 010
26	228	0 000 011 100 100	3	1911	0 011 101 110 111
25	237	0 000 011 101 101	2	2865	0 101 100 110 001
24	246	0 000 011 110 110	1	5730	1 011 001 100 010
23	256	0 000 100 000 000			

Остальные блоки системы построены известным образом, например, как описано в работе [7].

Поскольку разработанная система управления скоростью робокара достаточно проста, затраты на её изготовление невелики. Между тем в сочетании с системой управления траекторией движения робокара она может повысить его производительность в 2 раза.

#### Библиографические ссылки

1. Гибкие производственные комплексы / Под ред. П.Н. Белянина и В.А. Лещенко. М.: Машиностроение, 1984. 384 с.

2. Волчкович Л.И., Усов Б.А. Транспортно-накопительные системы ГПС. М.: Высш. шк., 1989. 109 с.

3. Гибкое автоматическое производство / В.О. Азель, В.А. Егоров, А.Ю. Звоницкий и др. Л.: Машиностроение, 1985. 454 с.

4. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Изд. Центр «Академия», 2004. 576 с.

5. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Спб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

6. Преобразование информации для ЭЦВМ / Б.В. Анисимов, В.Н. Четвериков. М.: Высш. шк., 1968. 333 с.

7. Шляндлин В.М. Цифровые измерительные преобразователи и приборы. М.: Высш. шк., 1973. 280 с.



УДК 338.24

**В.Л. Белоусов**, д-р экон. наук, проф., **В.Е. Вершин**, канд. техн. наук, **О.В. Вершин**  
 (Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы,  
 г. Москва)

vershin@kompair.ru

### **ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДАМ НА БАЗЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА MATHCAD**

*Изложена возможность использования в качестве одного из инструментов производственного планирования программного продукта математической системы Mathcad, предназначенного для решения недоопределённых систем алгебраических линейных уравнений. Показана возможность использования пакета Mathcad применительно к решению задач планирования предприятия, в том числе по технологическим переходам (цехам, участкам и т. п. производственным структурам). Приведены примеры расчётов.*

**Ключевые слова:** планирование, предприятие, технологические переходы, пакет Mathcad, пример расчёта.

*Mathematical system Mathcad program product utilization possibility as one instrument for production planning is stated. This program product is intended for the underdetermined system decision of the algebraic linear equations. Package Mathcad utilization possibility in conformity with enterprise planning tasks decision including technological passes (shop, cell, production structure) is shown. Calculation examples are adduced.*

**Key words:** planning, enterprise, technological passes, package Mathcad, calculation example.

Одним из вариантов оптимизационных задач в планировании производства являются задачи определения номенклатурного плана выпуска продукции при условии полного использования имеющихся производственных ресурсов. При этом должна быть учтена производственная структура предприятия, т. е. учтена потребность и использование материальных ресурсов отдельно по цехам и/или участкам (технологическим переходам). Математически это означает, что модель предприятия представляется не в виде одного (обобщённого) балансного уравнения, а в виде некоторой системы уравнений. Таким образом, при решении такого рода задач мы будем иметь не одно балансное уравнение, а систему балансных уравнений, и определение полного по использованию ресурсов плана производства по технологическим переходам представляет собой, таким образом, многомерную оптимизационную задачу. Математический пакет Mathcad обладает развитой системой обработки информации в матричной форме [1–4]. Поскольку в ряде случаев представление математических моделей в матричной форме наиболее удобно и компактно, то структуру поставленной задачи отобразим в виде одной матрицы и двух векторов. Пусть А – мат-

рицы коэффициентов уравнений (нормы расхода контролируемого ресурса на изделия по технологическим переходам),  $X$  – векторы переменных (количество планируемой к выпуску продукции) и  $B$  – векторы правых частей уравнений (количество ресурсов, которыми располагает соответствующий технологический переход). Тогда математическую модель производства с учётом технологических переходов можно записать в виде

$$A \cdot X = B. \quad (1)$$

В соответствие с уравнением (1) решение задачи определения плана производства по выпуску продукции в соответствии с имеющимися ресурсами определится как

$$X=B/A. \quad (2)$$

Решение данной задачи не представляло бы в общем случае особого труда, если бы одно обстоятельство. Оно заключается в том, что относительно простой метод решения имел бы место в случае, если бы число неизвестных было бы равно числу уравнений, т. е. число технологических переходов было бы равно числу выпускаемых изделий (каждый цех или участок выпускал бы продукцию только одной номенклатуры). Случай

$$A = \begin{pmatrix} 691 & 653 & 251 & 596 & 473 & 328 \\ 281 & 320 & 254 & 297 & 142 & 181 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 9467 \\ 4667 \end{pmatrix} \quad X := lsolve(A, B) \quad X = \begin{pmatrix} 3,58 \\ 3,88 \\ 2,69 \\ 3,59 \\ 1,99 \\ 2,14 \end{pmatrix}$$

*a)**б)**в)**г)***Рис. 1. Программа расчёта проекта плана по технологическим переходам:**

*а* – матрица расхода контролируемых ресурсов по изделиям и технологическим переходам; *б* – вектор распределения ресурсов по технологическим переходам (верхняя строка – ресурс на первом технологическом переходе, вторая – на втором); *в* – программный продукт *lsolve*; *г* – номенклатурный план производства

этот не слишком частый. Обычно номенклатура продукции (число неизвестных) существенно превышает количество цехов или участков (уравнений в системе).

Математическая система *Mathcad* в составе комплекса программ решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) имеет специальную функцию *lsolve*, позволяющую определять неизвестные в названных выше недоопределённых системах линейных уравнений, т. е. в системах, в которых число неизвестных превышает число уравнений. Использование функции *lsolve* как раз и позволяет решить задачу разработки плана производства предприятия по технологическим переходам при наличии номенклатуры выпускаемой продукции большей, нежели число таких переходов. Так как вектор *B* интерпретируется нами в условиях задачи как величина ресурса, который имеется на технологическом переходе, то получение решения при использовании функции *lsolve* как раз и соответствует условию разработки плана по технологическим переходам с полным использованием имеющихся ресурсов.

На рис. 1 показана в качестве примера часть процесса разработки некоторого плана производства для предприятия, имеющего два технологических перехода (цеха) и выпускающего шесть различных изделий, каждое из которых проходит обработку в обоих цехах. Норма расхода ресурса по изделиям и цехам представлена в виде матрицы *A* расхода контролируемых ресурсов, и вектора *B* наличия ресурсов по цехам. План производства изделий (в данном случае – без округления чисел), определён с помощью функции *lsolve* и получен в виде вектора *X*. В документации на математическую систему *Mathcad* не указывается предельное отношение числа неизвестных к числу уравнений. Понятно, однако, что оно не может быть слишком большим, так как при этом падает устойчивость получаемых решений. По этой же причине точность вычислений при использовании функции *lsolve* должна быть доста-

точно высокой. Так при требуемой точности результата два знака после запятой (десятичной точки) все промежуточные расчёты желательно выполнять с точностью до четырёх знаков.

Реальные программы планирования, построенные на баз функции *lsolve*, включают в себя обычно ряд дополнительных блоков. Это, естественно, блоки ввода информации, а так же блоки управления процессом разработки плана и анализа получаемых результатов. Приведенная на рис. 1 программа примера расчёта проекта плана состоит из норм расхода материала по изделиям и технологическим переходам (рис. 1, *а*), блока задания ресурсов (рис. 1, *б*), функции вычисления количества выпускаемых изделий *X* (рис. 1, *в*), и вектора выпускаемой продукции *X* (рис. 1, *г*), в котором порядковые номера элементов вектора (считая сверху вниз) соответствуют номенклатурному номеру выпускаемой продукции, а величина элемента вектора определяет количество планируемой к выпуску продукции.

Приведённый метод расчёта производственного плана может оказаться полезным для установления возможности получения при том же ресурсном обеспечении какого-либо другого варианта плана, кроме, скажем, уже предложенного. В качестве примера на рис. 2 приведён случай, когда при заданной на рис. 1 матрице нормы расхода *A* и плане выпуска продукции *Z* (см. рис. 2, *а*) расход ресурса по первому цеху составит 9467 единиц и по второму цеху 4667 единиц (см. рис. 2, *г* и *д*). Возникает вопрос: возможно ли предложить другой вариант проекта плана по номенклатуре, который бы полностью использовал ресурсы, выделенные для реализации рассмотренного выше варианта плана? Положительный ответ на этот вопрос как раз и приведён на рис. 1. (сравните варианты расхода ресурсов *B* по цехам на каждый вариант плана). В результате работы программы *lsolve* мы и получили новый вариант плана по отношению к плану варианта рис. 2, *а*. Какой из этих двух вариантов окажется более приемлемым в реальности скорее надо оценить по ка-

$$Z = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \quad ZZ = \text{augment}(z, z) \quad D = \begin{pmatrix} 691 & 281 \\ 1306 & 640 \\ 753 & 762 \\ 2384 & 1188 \\ 2365 & 710 \\ 1968 & 1086 \end{pmatrix} \quad \sum D^{(1)} = 9467 \quad \sum D^{(2)} = 4667$$

$$D = (A^T \cdot ZZ)$$

a)                    b)                    c)                    d)                    d)

**Рис. 2. Программа расчёта затрат ресурсов на проект плана Z по технологическим переходам:**

*a* – номенклатурный план; *б* – функции формирования матрицы *D*; *в* – матрица *D* – расход контролируемого ресурса на план по изделиям в разрезе технологических переходов; *г* – расход ресурса на план по первому технологическому переходу; *д* – расход ресурса на план по второму технологическому переходу

ким либо другим параметрам, нежели по использованию ресурсов (например, по ожидаемой прибыли от реализации выпущенной продукции). Здесь надо отметить одну из особенностей решения подобных задач. Дело в том, что результат работы программы может выражаться не целыми числами, и если по условиям планирования количество выпускаемой продукции должно быть целым числом, то полученные результаты подлежат округлению либо “вручную”, либо программно. Теперь представим себе ситуацию, что на каждом технологическом переходе надо контролировать не один материал, а, например, два. Наиболее понятным способом решения такого рода задачи является введение дополнительного условного технологического перехода, описывающего расход этого второго материала. И хотя данный приём создаёт определённые трудности в программировании и эксплуатации задачи, тем не менее, позволяет её решить.

Надо заметить, что получить практически приемлемый план непосредственно как продукт формального решения уравнения (2) вряд ли удастся. Ведь решение задачи оптимизации плана поному использованию ресурсов оставляет в стороне оптимизацию плана по потребностям рынка. Однако она даёт возможность определить оптимальные по ресурсам возможности производства, и если при этом воспользоваться окружающими основную программу дополнительными блоками, то при определённом навыке можно получить вполне приемлемый производственный план. Так, например, если объединить программы, приведённые на рис. 1 и 2, то представляется возможность сначала рассчитать оптимальный по использованию ресурсов план, а потом, в случае если план чем либо не удовлетворяет нашим потребностям, через блок *Z* (см. рис. 2) внести в него желаемые корректизы. Программа *lsove* при решении недоопределённых уравнений, находит такой вариант решения, при котором вектор *X* имеет минимальную норму. Для вектора это не что иное, как его длина. Нестрого говоря, приме-

нительно к практике планирования минимальная длина вектора, получаемого при решении недоопределённых систем уравнений, означает, что каждое значение элемента найденного вектора *X* не может быть очень большим по отношению к другим элементам вектора. Практически же, как указывалось выше, приемлемость разработанного компьютером плана определяется не столько выполнением указанного выше формального критерия оптимизации решения, сколько его реальной приемлемостью.

В заключение укажем, что решение рассмотренной выше задачи является в определённой мере составляющей комплекса задач планирования, разработанного на базе математической системы *Mathcad*, а соответствующие программы могут быть при необходимости интегрированы в единый программный комплекс [5–7].

#### Библиографические ссылки

1. Кирьянов Д.В. Самоучитель *Mathcad* 13. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 528 с.
2. Макаров Е.Г. Инженерные расчёты в *Mathcad* 14. СПб.: Питер, 2007. 592 с.
3. Дьяконов В.П. *Mathcad* в математике. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 958 с.
4. Гурский Д.А., Турбина Е.С. Вычисления в *Mathcad* 12. СПб.: Питер, 2006. 544 с.
5. Белоусов В.Л., Вершин В.Е., Вершин О.В. Формирование оптимального портфеля заказов предприятия на базе математического пакета *Mathcad* // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 9. С. 14–18.
6. Белоусов В.Л., Вершин В.Е., Вершин О.В. Использование функции «предсказание» математического пакета *Mathcad* в управлении экономическими объектами // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 3. С. 17–20.
7. Белоусов В.Л., Вершин В.Е., Вершин О.В. Особенности планирования и анализа производства для малых и средних предприятий на базе математического пакета *Mathcad*. Научные труды XII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики». В кн. «Экономика и управление» М.: МГУПИ, 2009. С. 60–63.

УДК 681.51.01.(075.8)

**И.С. Семенюта** (Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар)  
isemenuta@rambler.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЙ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

*Рассмотрена система составления расписаний с точки зрения теории массового обслуживания. Найдена вероятность отказа системы и её частные производные. Предложены рекомендации по организации процесса обслуживания заявок.*

**Ключевые слова:** поток заявок, интенсивность, атрибут, вероятность отказа, граф состояний, частные производные, простейший поток событий.

*Schedule making system with point of view the mass service theory is considered. System fault probability and its quotient derivatives are indicated. Guidelines for requests service process organization are proposed.*

**Key words:** requests stream, intensity, attribute, fault probability, state column, quotient derivatives, elemental events stream.

Задача составления расписания занятий является многозначной и многовариантной, алгоритм решения которой состоит в следующем: имеется множество вариантов расписания занятий, в котором можно распределить множество заявок преподавателей. Следовательно, задачу можно представить в качестве задачи теории массового обслуживания. При этом имеется  $n$  каналов, на которые поступает поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ . Обслуживание одним каналом имеет интенсивность  $\mu$  (величина, обратная среднему времени обслуживания  $t_{ob}$ ). Под каналом понимается объект  $O_n = \{d, ned, aud, time\}$ , включающий день недели  $d$ , номер недели  $ned$ , номер аудитории  $aud$  и время проведения занятия  $time$ , т. е. это одна ячейка расписания, в которую можно поместить занятие с указанными атрибутами (табл. 1).

Таблица 1

**Ячейка расписания**

Время	Неделя
	День
	Аудитория

Заявка – это таблица с данными преподавателя (табл. 2).

Найдём вероятность отказа ( $P_{otk}$ ), того, что заявка покинет систему составления расписания необслуженной (например, указанная в заявке аудитория будет уже занята другой парой).

Состояние системы составления расписания  $S$  будем нумеровать по числу заявок преподавателей, находящихся в системе:

$S_0$  – в системе нет ни одной заявки;

$S_1$  – в системе находится одна заявка (одна ячейка расписания занята, остальные свободны);

...

$S_k$  – в системе находится  $k$  заявок ( $k$  каналов заняты, остальные свободны);

$S_n$  – в системе находятся  $n$  заявок (все  $n$  каналов заняты).

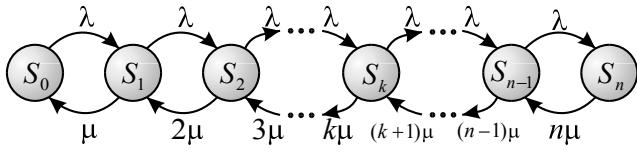
Граф состояний системы составления расписания приведён на рисунке.

Граф является ориентированным – последовательность переходов из одного состояния в другое обозначена стрелками. Интенсивности потоков  $\lambda$  одинаковы, так как на систему массового обслуживания действует один и тот же внешний поток заявок (поток однородных событий, следующих один за другим в случайные моменты

Таблица 2

**Заявка с данными преподавателя**

Время	День	Неделя	Семестр	Дисциплина	Преподаватель	Ауд.
8.00	Пн	1	Весенний	Информатика	Сидоров И.С.	К-39
11.20	Вт	2	Весенний	База данных	Петров Р.В.	К-113



**Граф состояний многоканальной системы составления расписаний с отказами:**

$\lambda$  – интенсивность потока событий;  $\mu$  – интенсивность потока обслуживания

времени). Интенсивности потоков обслуживания увеличиваются с каждым занятым каналом [1].

Вероятность  $i$ -го состояния системы  $S$  в момент времени  $t$  оценивается вероятностью  $P_i(t)$ . Для любого момента сумма всех вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=0}^n P_i(t) = 1. \quad (1)$$

По общему правилу Колмогорова для уравнений финальных вероятностей событий производная вероятности нахождения системы в состоянии  $S_0$  определяется следующим образом. Находится сумма произведений вероятностей всех состояний, из которых идут стрелки в данное состояние, и интенсивностей соответствующих потоков событий, а затем из неё вычитается суммарная интенсивность всех потоков, выводящих систему из данного состояния, умноженная на вероятность данного состояния:

$$\frac{dP_0}{dt} = P_0\mu - P_1\lambda. \quad (2)$$

При  $dt \rightarrow \infty$  имеем финальную вероятность нахождения системы в состоянии  $S_0$ :

$$P_0\mu = P_1\lambda. \quad (3)$$

Так как известны все интенсивности, то найдем финальные вероятности состояний системы.

Для состояния  $S_1$

$$P_1(\mu + \lambda) = P_0\lambda + 2\mu P_2.$$

Или, с учётом уравнения (3), для состояния  $S_1$  окончательно

$$P_1\lambda = 2\mu P_2. \quad (4)$$

Очевидно, для состояния  $S_2$  получим

$$P_2\lambda = 2\mu P_3.$$

Из уравнения для состояния  $S_0$  выразим  $P_1$  через  $P_0$ :

$$P_1 = P_0 \frac{\lambda}{\mu}. \quad (5)$$

С учётом выражения (5) получим

$$P_2 = P_1 \frac{\lambda}{2\mu} = \frac{\lambda^2}{2\mu^2} P_0. \quad (6)$$

С учётом выражения (6)

$$P_3 = \frac{\lambda^3}{3\mu^3} P_0. \quad (7)$$

Для любого  $k$  (от 1 до  $n$ )

$$P_K = \frac{\lambda_k \lambda_{k-1} \dots \lambda_1}{\mu_k \mu_{k-1} \dots \mu_1} P_0. \quad (8)$$

Таким образом, все вероятности состояний выражаются через  $P_0$ . Подставив эти выражения в нормировочное условие (1) и вынеся  $P_0$  за скобки, получим

$$P_0 = \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda^2}{2!\mu^2} + \frac{\lambda^3}{3!\mu^3} + \dots + \frac{\lambda^k}{k!\mu^k} + \dots + \frac{\lambda^n}{n!\mu^n} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Для нахождения вероятности отказа  $P_{otk}$  необходимо, чтобы все каналы были заняты:

$$P_{otk} = \frac{\lambda^n}{n!\mu^n} P_0. \quad (10)$$

Для минимизации вероятности отказа найдём частные производные функции  $P_{otk}(\lambda, \mu, P_0)$ .

Производная по интенсивности потока событий

$$\frac{\partial P_{otk}}{\partial \lambda} = \frac{n P_0}{n! \mu^n} \lambda^{n-1}. \quad (11)$$

Производная по интенсивности обслуживания одним каналом

$$\frac{\partial P_{otk}}{\partial \mu} = -\frac{n \lambda^n P_0}{n! \mu^{n+1}}. \quad (12)$$

Производная по вероятности  $P_0$

$$\frac{\partial P_{otk}}{\partial P_0} = \frac{\lambda^n}{n! \mu^n}. \quad (13)$$

Необходимое условие существования экстремума в точке – равенство нулю частной производной первого порядка [2]. Производная по интенсивности потока событий равна нулю при  $\lambda = 0$ , что очевидно из выражения (11). Найдем значение, при котором производная по интенсивности обслуживания  $\mu$  равна нулю:

$$-\frac{n\lambda^n P_0}{n! \mu^{n+1}} = 0, \quad (14)$$

$$\mu \rightarrow \infty$$

Найдем вторую производную по  $\mu$ :

$$\frac{\partial^2 P_{otk}}{\partial \mu^2} = -\frac{n\lambda^n P_0}{n!}(-(n+1)\mu^{-n-2})(-n-1); \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 P_{otk}}{\partial \mu^2} = 0.$$

Так как первая производная не равна нулю, а вторая равна нулю, то экстремума не существует (из достаточного условия существования экстремума) [3]. Производная по вероятности  $P_0 = \text{const}$ .

Следовательно, экстремума также не может быть. Интенсивность потока  $\lambda$  означает среднее число заявок, поступающих в систему. При  $\lambda = 0$  значение функции  $P_{otk} = 0$ , т. е. при отсутствии заявок вероятность отказа минимальна. Таким образом, вероятность отказа целесообразно исследовать по интенсивности потока событий. Из выражения (14) имеем, что при максимальной загрузке каналов вероятность отказа критическая, следовательно, система составления расписания не выполняет свои функции по обслуживанию заявок. Отсюда вывод: для повышения эффективности работы системы не следует стремиться к большому количеству заявок. Целесообразным считаем обслуживание заявок в два этапа: обработка заявок в системе по данным, полученным из локальных подсистем (например, подсистемы кафедры, факультета); сведение полученных результатов и их обработка в больших системах (университет и его филиалы).

#### **Библиографические ссылки**

1. Денисов А.А. Теория больших систем управления: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. 288 с.
2. Шипачёв В.С. Высшая математика: учеб. для не-мат. спец. вузов / Под ред. акад. А.Н. Тихинова. 2-е изд., стер. М.: Высш. шк., 1990. 479 с.
3. Курс высшей математики. Введение в математический анализ. Дифференциальное исчисление. Лекции и практикум: учеб. пособие / Под общ. ред. И.М. Петрушки. 4-е изд., стер. СПб.: Изд-во «Лань», 2009. 288 с.

## **ВЫПЛАВКА СТАЛИ В КИСЛЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ**

**В.М. Сойфер**

М.: Машиностроение, 2009. – 432 с. ISBN 978-5-217-03450-5

**Цена 880 р.**

Изложены требования к качеству кислой электростали для отливок, теоретические основы выплавки стали кислым процессом, описаны конструкции и футеровки кислых дуговых и индукционных печей, технология выплавки и разливки стали. Освещены особенности дуговых сталеплавильных печей постоянного тока, сертификации дуговых и индукционных печей. Приведены современные стандарты, касающиеся кислой электроплавки стали, результаты последних исследований. Описаны технологии получения продукта прямого восстановления железа в качестве шихты для электросталеплавильных печей, результаты исследований напряженности магнитного поля индукционных печей, прогрессивные технологические процессы выплавки стали и футеровки печей.

Предназначена для инженерно-технических работников машиностроительных и металлургических предприятий, научных работников, может быть полезна студентам вузов.



Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:  
по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru  
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU



## ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

УДК 621.002.51

### По страницам журналов

**Оценка энергетической эффективности транспортной работы автомобиля.** Автомобильная промышленность. 2010. № 12.

Даётся критерий энергетической эффективности транспортной работы автомобиля. Рассматривается влияние скорости движения автомобиля, его грузоподъёмности, номер передачи, массы перевозимого груза, вида используемого топлива, экономичности ДВС на энергетическую эффективность работы АТС.

**Методика выбора рациональных режимов технологических процессов центробежной обработки. Упрочняющие технологии и покрытия.** 2010. № 11.

Предложена методика проектирования технологических процессов центробежной обработки. Получены зависимости для определения шероховатости обрабатываемой поверхности, степени и глубины упрочнения.

**Влияние геометрических параметров роторной ступени с развернутыми лопатками на откачные характеристики турбомолекулярного насоса.** Инженерный журнал «Справочник». 2010. № 11.

Представлены результаты моделирования методом Монте-Карло процесса прямого и обратного перехода молекул газа через межлопаточные каналы роторного колеса с развернутыми лопатками турбомолекулярного насоса. Разработана программа расчёта максимальной быстроты откачки и максимального сжатия газа с учётом толщины лопаток для различных законов распределения скоростей молекул газа, входящих в каналы, и законов отражения молекул от стенок лопаток. Приведены примеры расчётов.

**Устранение дефектов при выполнении электромонтажа накруткой.** Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 11.

Рассмотрены способы исключения дефектов при электромонтаже способом накрутки по спирали при автоматической накрутке, при настройке механизма осевой подачи накручивающей головки, при подаче вручную. Предложены рекомендации для исключения дефектов при регулировании осевого перемещения, уменьшении скорости перемещения накручивающей головки, рекомендации по предупреждению брака при накрутке, по обеспечению высокого качества электромонтажных работ с применением различных способов накрутки.

**Влияние ультразвуковых радиальных колебаний на процесс разборки гладких соединений.** Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 11.

Рассмотрена возможность применения радиальных ультразвуковых колебаний при разборке гладких соединений деталей машин. Предложена конструкция ультразвуковой колебательной системы для возбуждения радиальных колебаний в соединении вал – втулка. Приведён расчёт основных акустических и технологических параметров процесса.

**Использование функций чувствительности целевых показателей к управляемым параметрам сложной организационной системы и их реализация в модели преобразования данных.** Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. № 12.

Рассмотрены задачи оценки чувствительности целевых показателей к управляемым параметрам сложной организационной системы и их реализация в компьютерной модели преобразования данных. Показана возможность вычисления вектора-градиента целевого показателя качества для случая описания математической модели смешанными векторными нелинейными обыкновенными дифференциальными и конечно-разностными уравнениями. Получены уравнения сопряжённой системы, позволяющие однократным решением совместно с уравнениями исходной системы определить значения вектора-градиента на заданном интервале времени.

**Расширение языка высокого уровня COLAMO для программирования реконфигурируемых вычислительных систем на уровне логических ячеек ПЛИС.** Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. № 12.

Рассмотрено расширение языка высокого уровня COLAMO с неявным описанием параллелизма, используемого для программирования реконфигурируемых вычислительных систем (РВС). Создано расширение языка COLAMO для программирования РВС на уровне логических ячеек ПЛИС, что позволяет в десятки раз повысить реальную производительность РВС при выполнении программ по сравнению с версией языка, ориентированной на программирование на уровне элементарных процессоров и связей между ними. Изложена семантика стандартных и новых языковых конструкций языка COLAMO.