

ISBN 5-7763-8361-7

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ

**АВТОМАТИКА**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ**

**КОМПЛЕКСЫ И**

**СИСТЕМЫ**

**№ 1(13) 2004**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**АВТОМАТИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ.  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

*Издание Херсонского государственного технического университета*

**№ 1(13)**

**ХЕРСОН**

**2004**

*Основан в июле 1997 г.*

*Выходит два раза в год*

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

*Главный редактор:* Тодорцев Ю.К.

*Члены редколлегии:* Аркадьев В.Ю., Бардачев Ю.Н., Бойко В.И., Большевцев А.Д., Бондарь В.М., Бражник А.М. (зам. главного редактора), Гаврилюк В.И., Герасимьяк Р.П., Григоровский Е.П., Гринавцев В.Н., Демченко В.А., Дудюк Д.Л., Дубинец Л.В., Живица В.И., Карпинский М.П., Кондратенко Ю.П., Кузнецов Б.И., Ладанюк А.П., Лут М.Т., Лубяный В.З., Максимов М.В., Марасанов В.В., Мартиненко И.И., Мережко Ю.И., Михайлик В.Д., Мишин В.И., Павлов А.А., Праховник А.В., Радимов С.Н., Рогальский Ф.Б., Садовой А.В., Сарибеков Г.С., Смолин Ю.А., Ткаченко А.Н., Тришкин В.Я, Труш В.Е., Ходаков В.Е., Хомченко А.Н. (зам. главного редактора), Червяков В.Д., Шарко А.В., Шикалов В.С., Эриванцев И.Н., Яськив В.И., Лебеденко Ю.А. (технический редактор)

*Корректор:* Лебеденко Н.О.

## **ОРГАНИЗАЦИИ - ОСНОВАТЕЛИ ЖУРНАЛА**

Херсонский государственный технический университет  
Одесский Национальный политехнический университет  
Национальный технический университет Украины «КПИ»  
Международный университет гражданской авиации  
Одесская государственная академия холода  
Днепродзержинский технический университет  
Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры  
Национальный аграрный университет  
Украинский государственный химико-технологический университет  
Украинский государственный университет пищевых технологий  
Украинская инженерно-педагогическая академия  
Украинский государственный морской технический университет  
Украинский государственный лесотехнический университет  
Сумской государственный университет  
Киевский государственный университет строительства и архитектуры  
Киевский национальный университет технологий и дизайна  
Тернопольский государственный технический университет им. Ивана Пулюя  
Тернопольская академия народного хозяйства  
Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта  
Херсонский государственный аграрный университет

# СОДЕРЖАНИЕ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

<u>Минин М.Ю., Бидюк П.И.</u> Применение аппарата нечеткой логики для анализа психологических типов на основе базиса Юнга при принятии кадровых решений.....	5
<u>Боскин О.О., Соколова Н.А.</u> Имитационная модель процесса дистанционного обучения .....	13
<u>Кирюшатова Т.Г., Чёрный С.Г.</u> Моделирование процессов распределения функций персонала в управлении организацией.....	21
<u>Клименко Д.С.</u> Моделирование натяжения нити при смотке с конической бобины в процессе партионного снования .....	25
<u>Марценюк Е.Н.</u> Осреднение характеристик фильтрационно-емкостных свойств ячеек в модели фильтрационных процессов.....	28
<u>Орлов В.В.</u> Обнаружение и распознавание стационарных случайных процессов на решетчатой структуре .....	33
<u>Ходаков В.Е., Соколова Н.А.</u> Координация взаимодействия подсистем в автоматизированных системах.....	39
<u>Крупіца П.О.</u> Експериментальні та теоретичні дослідження процесу навивання основних ниток .....	49
<u>Рожков С.А., Куцак Р.С., Бражник Д.А.</u> Исследование процесса деформации ткани на экспериментально-аналитической модели.....	53

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<u>Бабак В.П., Дегтярьов В.В, Куц Ю.В, Щербак Л.М.</u> Автоматизована система вимірювань фазових характеристик періодичних сигналів на базі технології LABView .....	61
<u>Бабичева И.Ф., Шарко А.В.</u> Использование нейросетевого классификатора в системах дефектоскопии механических характеристик металлов .....	69
<u>Фаніна Л.О.</u> Аналіз тенденцій побудови систем мовного інтерфейсу .....	77

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<u>Бараненко Р.В., Козел В.Н., Дроздова Е.А., Плотников А.О.</u> Оптимизация работы корпоративных компьютерных сетей .....	86
<u>Кухаренко С.В., Балтовский А.А.</u> Решение задачи календарного планирования с использованием эвристических алгоритмов.....	90
<u>Цмоць І.Г.</u> Алгоритми та матричні НВІС-структури пристроїв ділення для комп'ютерних систем реального часу.....	97
<u>Шекета В.І.</u> Застосування процедури Append при аналізі абстрактних типів даних модифікаційних запитів.....	106
<u>Шерстюк В.Г.</u> Формальная модель гибридной сценарно-прецедентной СППР .....	114
<u>Головащенко Н.В.</u> Математичні характеристики шумоподібно кодованих сигналів.....	123

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ**

<b><u>Маломуж Т.В.</u></b> Оптимальное управление на основе интеллектуальных систем .....	132
<b><u>Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Лобок О.П.</u></b> Розробка багатовимірних оптимальних регуляторів для об'єктів одного класу .....	140

## **МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

<b><u>Балтовский А.А.</u></b> Способ адаптивной алгоритмизации задач расчета производственной программы .....	145
---	-----

## **ЦИФРОВЫЕ И ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

<b><u>Ситников В.С.</u></b> Анализ путей уменьшения погрешностей цифровых устройств с фиксированной точкой .....	150
--	-----

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

<b><u>Бабак В.П., Стадниченко В.Н., Приймаков О.Г., Токарчук В.В.</u></b> Прогнозування витривалості авіаційних матеріалів .....	158
<b><u>Бабак В.П., В.Н. Стадніченко, О.Г. Приймаков</u></b> Прогнозування надійності, довговічності та витривалості авіаційних матеріалів .....	163
<b><u>Бергер Е.Г., Дмитрієв Д.О., Бергер Є.Е., Діневич Г.Ю.</u></b> Синтез строфоїдографів за методом параметричних сімей .....	168
<b><u>Водічев В.А.</u></b> Автоматизована система керування швидкостями робочих рухів токарного верстата для підвищення ефективності обробки торцевих поверхонь .....	173
<b><u>Колесникова Е.В., Кострова Г.В.</u></b> Формирование базы данных АСУТП дуговой сталеплавильной печи .....	179
<b><u>Тонконогий В.М.</u></b> Трехконтурная АСУ нанесением ионно-плазменного покрытия на режущий инструмент .....	185
<b><u>Хобин В.А.</u></b> Регулятор переменной структуры для объектов технологического типа .....	190

<b><u>РЕФЕРАТЫ</u></b> .....	197
------------------------------	-----

<b><u>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</u></b> .....	201
---	-----

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

УДК 007.52:159.923.2

**ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ  
НА ОСНОВЕ БАЗИСА ЮНГА ПРИ ПРИНЯТИИ КАДРОВЫХ РЕШЕНИЙ**

Минин М.Ю., Бидюк П.И.

**Введение.** Профориентация и профотбор, проектирование и прогнозирование успешной деятельности, оптимизация профессионального обучения, формирование производственных коллективов, подбор управленческих кадров, индивидуальные стилевые особенности деятельности профессионалов — вот далеко не полный перечень проблем психологии, в процессе решения которых приходится сталкиваться с необходимостью подробного рассмотрения личностных качеств человека [1].

В современной соционике а так же, до недавнего времени, в психологии (как социальной, так и клинической) предполагалось, что личные качества (или производные понятия от них) являются определяющими перцептивные и, как следствие, поведенческие реакции. В настоящее время психология пересмотрела некоторые догмы и рассматривает реакции и суждения личности не как заранее каким-то образом «запрограммированные» принадлежностью субъекта реакции к тому или иному психологическому типу, а как поведение «наивного психолога», который пытается объяснить чужое поведение и выработать свое на основе многих факторов внешней среды и своей внутренней диспозиции (казуальная атрибуция [2]). Внутренняя диспозиция личности определяется более категориями его мышления, выработанные на основе своего личного опыта и научения (когнитивные схемы [3]) и изменяющиеся с течением времени. Соционика же продолжает изучать возможные варианты типизации личности, пытаясь достичь возможности формального моделирования личностного или группового поведения опираясь в основном на принадлежность личности к тому или иному соционическому типу.

Нельзя не отметить однобокость соционического подхода, как довольно статического, мало учитывающего окружение человека и процессы его познания. Однако, невозможно полностью согласиться с современными направлениями психологии, которые рассматривают определение категорий мышления индивида и факторах окружающей среды а психологическая типизация личности осталась незаслуженно забытой. Так, сосредотачиваясь не только на исследования поведения некоторой «общей» личности, но учитывая внутренние бессознательные личностные установки, которые по своей сути являются некоторой регуляторной функцией «фактора канала» [2], можно с большой долей уверенности предположить, что качество моделирования личностного поведения будет значительно выше того, какое мы имеем на данный момент (исходя из результатов опубликованных исследований уровень подобия поведения находится в пределах 60-80%)

Таким образом, представляется полезным агрегирование современных результатов исследований соционики и психологии, как для социально-экономических приложений (мотивация, создание высокоэффективных организационных структур, моделирование и анализ общественного мнения и т.д.), так и для клинического применения и построения новых научных гипотез и моделей.

Наиболее распространенной и общепризнанной психологической типологией личности (на которой мы и остановимся) является типология, основанная на разложении по юнговскому базису, предложенной К.Г.Юнгом в своей работе [4], где он предлагает описание пространства личности при помощи четырех независимых (ортогональных) признаков: “экстравертность – интравертность”, “интуиция – сенсорика”, “мышление – эмоции”

и «рациональность – иррациональность». Таким образом, на основании результатов тестирования человека при помощи дисперсионного или факторного анализа производится разбиение  $n$ -мерного пространства (в данном случае  $n=4$ ) гиперплоскостями. Схематический пример для одномерного (с точки зрения юнговского базиса) приведен на рис. 1 (под крестиками понимаются тестируемые индивиды).

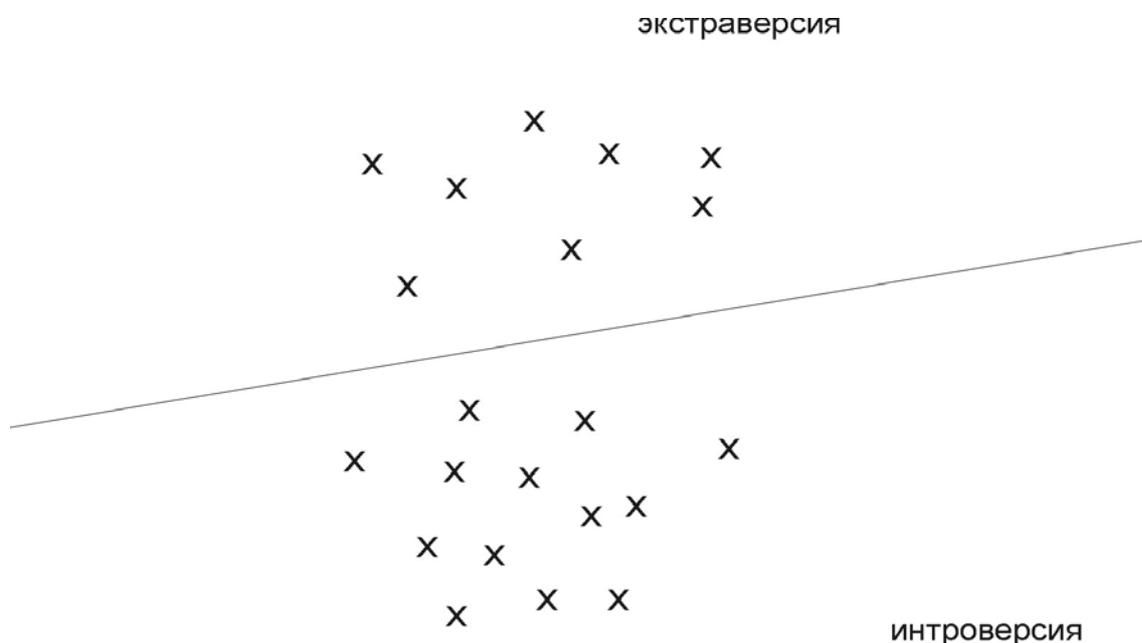


Рис.1 Пример разбиения множества индивидуумов гиперплоскостью по признаку «экстраверт- интроверт»

Соционика обычно использует не сам юнговский базис, а разные вариации из его базисных сечений [5]. Пример элемента такого сечения представлен на рис.2.



Рис. 2 Пример разбиения множества индивидуумов гиперплоскостями по признаку «экстраверт- интроверт» и «логика-этика»

В соответствии с отношением индивида к тому или иному соционическому типу ему приписываются те или иные характеристические черты и делаются выводы по поводу его личных предпочтений, его поведенческих реакций при возникновении каких либо раздражителей или при ассимиляции к тому или иному социуму, выбираются его партнеры для создания команд и т.д.

Нетрудно понять, что в юнговской и, соответственно, в типологиях, основанных на юнговской, рассматриваются только граничные характеристики личности (граничные аттракторы), что очерчивает границы пространства типов, однако уходит от анализа многообразия, которое это пространство содержит. Кроме того, априорно предполагается, что множество типов личности является линейно разделимым, что позволяет, используя методы кластеризации, чаще всего факторный анализ, классифицировать принадлежность к тому или иному типу анализируемого индивида и каждому кластеру приписываются определенные свойства. Данный подход является весьма грубым и усредняет психологический тип [6], что является особенно нежелательным вблизи границ областей притяжения аттракторов, которые, в силу борьбы могут носить довольно нетривиальный характер. Таким образом, прикладной интерес представляет не бинарное базисное разложение, а непрерывное.

В данной концепции, где социум разбивается на некоторое множество непересекающихся кластеров, имеется 2 существенных недостатка:

1. Проблема «переобобщения». Пара индивидуумов, являются, к примеру, экстравертами, однако у одного экстравертные функции выражены значительно сильнее, чем у другого. Им присваиваются одинаковые личностные свойства, что, в принципе, является неверным.

2. Проблема статичности образа. Определяющим и доминирующим фактором данного типологического метода является чуть ли не изначально заложенная соционическая установка, а ситуативные факторы и уровень когнитивности являются практически ничего незначащим фоном.

Собственно эти проблемы и ограничивают применение психологической типологии личности в современных психологических моделях.

**Постановка задачи.** Необходимо разработать метод анализа тестовых данных, позволяющий получить формализованные результаты тестирования личности с целью дальнейшего использования этих результатов в СППР при профессиональном отборе.

Одним из вариантов решения первой проблемы является использование более детальной кластеризации, однако, это не избавит нас от проблемы статичности и не позволит анализировать граничные элементы.

Рациональным в данном случае является использование нечеткой логики.

**Разработка нечеткого метод типизации.**

Исходя из ортогональности и независимости указанных признаков, с уверенностью можно считать эти переменные базисом в пространстве психологических типов личности (другими словами векторами  $e_1, e_2, e_3, e_4$  в некотором пространстве  $R^4$ ). Таким образом, каждую переменную из выбранного нами пространства мы можем представить в следующем виде  $x \in R^4 : x = \sum_{i=1}^4 \alpha_i e_i$ , где  $\alpha_i$  - коэффициенты разложения по базису. В дальнейшем будем называть коэффициенты  $\alpha_i$  *координатами вектора психотипа в типологическом пространстве*.

Соответствие базисных элементов  $e_i$  юнговскому, которое будет использовано в дальнейшем показано в Таблице 1. Порядок здесь и далее соответствует порядку, который принят в американской типологической школе

Соответствие базисных элементов  $e_i$  юнговским.

Элемент базиса, $e_i$	Юнговская шкала	Краткое обозначение
$e_1$	Экстраверсия-интроверсия	EI
$e_2$	Логика – этика	TF
$e_3$	Сенсорика – интуиция	SN
$e_4$	Рационализм – иррационализм	JP

Элементы базиса  $e_i$  аналогичны ортонормированным базисным векторам в евклидовом пространстве.

Коэффициенты  $\alpha_i$  принимают свои значения из множества  $X$  вещественных чисел отрезка  $[-1,1]$ .

Выбор данного интервала выбран в соответствии с идеологией определения типа на основе системы признаков, где «-» означает присутствие левого значения рассматриваемой шкалы признака, а «+» - правой. Кроме того, это избавляет нас от возможных проблем, связанных с соответствием математического и контентного начала координат при рассмотрении сечений.

Нетрудно заметить, что при использовании крайних значений коэффициентов базисного разложения мы получаем 16 юнговских типов, которые будем называть *чистыми типами*.

Таким образом, мы имеем вектор в пространстве базисных переменных  $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$ ,

где координата  $x_i, i = 1...4$  значение соответствующей  $i$ -й коэффициент разложения в юнговском базисе ( $\alpha_i$ ).

Учитывая, что при использовании биполярных признаков Юнга ( $\forall i : x_i = -1,1$ ), получается в общей сложности 16 психотипов, то при использовании непрерывной логики, данные психотипы будут являться аттракторами, к которым будут притягиваться точки в пространстве базисных переменных. Расстояние от точки до  $j$ -го аттрактора предлагается вычислять по следующей формуле, используя евклидову метрику

$$\rho_j(x) = \frac{\sqrt{\sum (x_i - x_i^j)^2}}{\rho_{\max}}, j = 1...16,$$

где  $x_i, x_i^j$  -  $i$ -я координата векторов  $x$  и  $j$ -го аттрактора соответственно;

$\rho_{\max}$  - максимально возможное расстояние в данном пространстве.

Несложно проверить, что  $\forall j : 0 \leq \rho_j(x) \leq 1$ .

Введем степень принадлежности произвольного вектора  $x$  в пространстве базисных переменных  $j$ -му аттрактору  $\mu_j(x)$  используя следующую функцию

$$\mu_j(x) = 1 - \rho_j(x). \tag{1}$$

Соответственно, несложно показать что  $\forall j: 0 \leq \mu_j(x) \leq 1$ .

Однако, учитывая то, что соционика, которая положила столько сил на исследование психотипов (или социотипов, как принято их называть в соционике), использует, как указывалось выше юнговский базис как основу для моделирования различных вариантов сечений в качестве социобазиса и описание социотипов в соционике является несравненно более разнообразным, чем это сделал юнг нас в дальнейшем будет интересовать не сам вектор  $x$  и его принадлежность к аттракторам, а сечения данного вектора и его принадлежность к усеченным аттракторам.

Рассмотрим множество  $S$ , элементами которого являются 16 юнговских типов. Будем называть в дальнейшем такой множество соционом.

Сечением множества  $S$  будем в дальнейшем называть упорядоченную пару множеств  $\langle m, \underline{m} \rangle$ , где множество  $m$  является подпространством  $S$ , а  $\underline{m}$  ортогональным дополнением  $m$  до  $S$ , то есть  $S = m \oplus \underline{m}$ , где под значком  $\oplus$  понимается прямая сумма подпространств. Заметим, что каждый из выделенных Юнгом признаков является одновременно сечением множества  $S$ , разбивая его на две части по восемь типов. При этом любая пара признаков делит социон на четыре равные части по четыре типа.

Всего таких вариантов сечений для социона существует  $\sum_{m=1}^4 C_4^m = 2^4 - 1 = 15$ . Опи-

сания этих сечений представлено в работе [5].

Общепринято рассматривать попарное разбиение признаков [7], которые дают, как считается, довольно приемлемый социальный портрет личности, таким образом подпространства чаще всего  $m^k$  и  $\underline{m}^k$  имеют одинаковую размерность, равную двум. Всего таких вариантов разбиения существует, как несложно проверить, 6, где каждое сечение описывает 16 юнговских типов с разных точек зрения. Таким образом, рассматривая всевозможные проекции социума на разные плоскости, проводится попытка многогранного изучения типологии личности.

Обозначим через  $S_k = \langle m^k, \underline{m}^k \rangle$   $k$ -й вариант сечения множества  $S$ , тогда под степенью принадлежности элемента  $x$  аттрактору  $j$  по сечению  $S_k$  будем понимать

$$\mu_{S_k}^j(x) = \min \left\{ \mu^j(\text{pr}_{m^k} x), \mu^j(\text{pr}_{\underline{m}^k} x) \right\}$$

где  $\text{pr}_{m^k} x$  и  $\text{pr}_{\underline{m}^k} x$  - проекции вектора  $x$  на подпространства  $m^k$  и  $\underline{m}^k$  соответственно.

Значения  $\mu^j(\text{pr}_{m^k} x)$  и  $\mu^j(\text{pr}_{\underline{m}^k} x)$  вычисляются по формуле (1).

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о возможности построения базы знаний следующего вида (используя правила типа *modus ponens*).

Она будет иметь следующий вид:

Если  $\text{pr}_{m^k} x \in A^i_{m^k}$  и  $\text{pr}_{\underline{m}^k} x \in A^j_{\underline{m}^k}$ , то  $x \in L^{ij}_k$  ( $\forall i, j = 1 \dots 4; \forall k = 1 \dots 6$ ),  $L^{ij}_k \subset L$ ,

где  $L$  - множество пар представляет личностные качества, составляющих некоторый фиксированный набор.

Итоговое количество правил будет равно 96. При использовании системы нечеткого логического вывода (СНЛВ), можно получить описательные характеристики той или иной личности.

Другими словами, итоговым результатам СНЛВ являются степени принадлежности тому или иному подмножеству множества  $L$ .

Так как подмножества  $L_k^{ij}$  являются, в общем случае, пересекающимися, то агрегация результата осуществляется следующим образом: вычисляется степень принадлежности той или иной черты характера конкретному индивиду  $\mu(l_s) = \max \left\{ \mu \left( \begin{matrix} x \in L_k^{ij} \\ l_s \in L_k^{ij} \end{matrix} \right) \right\}$ .

**Примеры применения**

Данный метод можно использовать для выбора оптимальной кадровой политики организации путем решения следующих задач:

**Пример1.** Выбор работы соискателю из возможных альтернатив.

Некой организацией предлагаются 3 вакансии, которые описываются следующими множествами.

1. Начальник цеха. Неформальная характеристика работы: 8часовой рабочий день, работы часто ведутся в авральном режиме, большое количество контролирующего руководства с одной стороны, необходимость дотошного контроля подчиненных с другой стороны.

Для описания через множество характерных черт наиболее близкое следующее: управление организацией материального производства, темперамент выдержанный и способный к длительной *равномерной* работе ( $L^{21}$ ).

2. Маркетолог -  $L^{12}$ .

3. Начальник производства-  $L^{11}$

Рассмотрим некоего соискателя X, обладающего следующими показателями, полученными в результате тестирования:

«экстраверт – интроверт» - 80%-20%

«логик-этик» - 30%-70%

«сенсорик – интуиит» - 40%-60%

«рационал – иррационал» - 90%-10%

Соответственно, для разложения  $\sum_{i=1}^4 \alpha_i e_i$  имеем  $\alpha_1 = -0.6, \alpha_2 = 0.4, \alpha_3 = 0.2,$

$$\alpha_4 = -0.8, x = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.4 \\ 0.2 \\ -0.8 \end{pmatrix}.$$

Будем анализировать претендента X для простоты только по одному сечению, принимая во внимание тот факт, что по остальным сечениям вычисления производятся аналогично.

Возьмем сечение, состоящее из темпераментных групп ( $\underline{m}$ ), образующееся объединением шкал JP – EI и групп установки ( $\underline{m}$ ), образующееся объединением шкал TF – SN.

Соответственно, определим степени принадлежности проекций множествам  $A_m^i$  и  $A_m^j$ .

$$A_m^1(EJ) : \rho = \frac{\sqrt{(-1+0.6)^2 + (-1+0.8)^2}}{\sqrt{8}} = \frac{\sqrt{0.2}}{2\sqrt{2}} \approx 0.16 ; A_m^1(TS) : \mu = 0.35$$

$$\mu = 1 - \rho = 0.84$$

$$A_m^2(IJ) : \mu = 0.43 \quad A_m^2(FS) : \mu = 0.53$$

$$A_m^3(EP) : \mu = 0.35 \quad A_m^3(FN) : \mu = 0.65$$

$$A_m^4(IP) : \mu = 0.15 \quad A_m^4(TN) : \mu = 0.43$$

Рассмотрим для простоты только 3 правила:

Если  $pr_m x \in A_m^1$  и  $pr_{\underline{m}} x \in A_{\underline{m}}^1$ , то  $x \in L^{11}$

Если  $pr_m x \in A_m^2$  и  $pr_{\underline{m}} x \in A_{\underline{m}}^1$ , то  $x \in L^{21}$

Если  $pr_m x \in A_m^1$  и  $pr_{\underline{m}} x \in A_{\underline{m}}^2$ , то  $x \in L^{12}$

Исходя из определенных выше степеней принадлежности для подмножеств  $A_m^i$  и  $A_{\underline{m}}^j$  определим степени принадлежности элемента  $x$  подмножествам  $L^{ij}$ :

$$\mu(x \in L^{11}) = \min\{0.84, 0.35\} = 0.35$$

$$\mu(x \in L^{21}) = \min\{0.43, 0.35\} = 0.35$$

$$\mu(x \in L^{12}) = \min\{0.84, 0.53\} = 0.53$$

Соответственно, индивиду  $X$  из рассмотренных 3х вариантов наиболее подходит вариант, описываемый множеством  $L^{12}$ . То есть, для данного соискателя из предложенных альтернатив наиболее подходящей является вакансия маркетолога.

**Пример 2.** Выбор и психологическое соответствие соискателя предлагаемой вакансии.

Для данного анализа необходимо определить личностные характеристики соискателя и сферу трудовой деятельности.

Личностным характеристикам  $l_s$  должны быть присвоены соответствующие нормированные веса  $w_i$  из диапазона  $[0,1]$ , описывающие важность той или иной черты характера соискателя для выполнения предполагаемых задач.

Определенные  $\mu(l_s)$  можно трактовать как степень выраженности того или иного фактора. Таким образом, в качестве критерия можно учитывать соответствия можно принять следующий коэффициент  $K_{\text{соотв}} = \sum w_i \mu(l_i)$ . Чем ближе этот коэффициент к 1, тем лучше соответствие соискателя предполагаемой работе.

Необходимо заметить, что коэффициент  $K_{\text{соотв}}$ , предложенный выше, является приемлемым, однако далеко не оптимальным для выявления соответствия соискателя, однако определение действительно оптимального принципа соответствия не является целью данной статьи и поэтому рассматриваться эта проблема здесь не будет.

Кроме того, аналогичным выше образом, необходимо проверить соответствие работы соискателю. И при довольно высоких уровнях соответствия можно принимать решение о психологическом соответствии и комфорте работы для данного соискателя.

**Пример 3.** Организация эффективных команд.

Данное приложение будет описано довольно кратко и схематично, так как для более полного изложения необходимо описать теорию интерттипных отношений [8].

**Выводы.** Таким образом, на основании вышеуказанной системы интерттипных отношений можно сказать, какие типы, смоделированные на попарных сечениях, подходят или не подходят друг другу. При помощи применения методов нечеткого моделирования, зная, с какой степенью принадлежит индивид той или иной группе  $L_k^{ij}$ , мы можем определить не только с какими индивидами коммуникации будут комфортными, но и опреде-

лить, насколько комфортными они будут для каждого индивида, то есть кто в данном случае будет выполнять лидирующую роль, а кто ведомую.

Кроме того, переход от качественных характеристик к количественным, что подтверждается приведенным выше примером, дает возможность практической программной реализации данной модели, что позволит существенно снизить зависимость организаций от привлеченных психологов и моделировать кадровое распределение самостоятельно с учетом собственных возможностей и потребностей.

Вместе с тем, необходимо отметить, что данная модель является только первым приближением. Для построения кадровой необходимо анализировать влияние, которое оказывает окружающая действительность, когнитивные схемы индивида и т.д.

The problem of psychological personal-type defining with the help of fuzzy sets was analyzed. The results help to accomplish a task of professional selection of applicants. The solution is based on fuzzy classification with defining the grade of membership to each cluster. The offered approach uses the results of psychological testing. Fuzzy classification in Euclidean space of Jungian attributes forms the basis of this method. It is also given an example of practical application.

1. Рейнин Г.Р., Теоретический анализ типологических описаний личности в психологии.//Сборник: Соционика ментология и психология личности №6, М.: Международный институт соционики, 2001, стр. 21,25
2. Келли Г. Процесс каузальной атрибуции.//Современная зарубежная социальная психология. Тексты. Под ред. Г.М. Андреевой, Н.Н. Богомоловой, Л.А. Петровской. - М.: МГУ, 1984, С.127-133
3. Джордж А. Келли Теория личности. Психология личных конструкторов/ Пер. с англ., под ред. А.А. Алексеева - СПб.: Речь, 2000.-180 с.
4. К.Г. Юнг. Психологические типы.- СПб.:Ювента – М.: Прогресс – Универс, 1995. – 341с.
5. Г.Р. Рейнин. Группа биполярных признаков в типологии Юнга.//Сборник: Соционика ментология и психология личности №6 - М.: Международный институт соционики, 2001.- с 12,23
6. Г.Р. Рейнин. О смешанных и чистых типах.//Сборник: Соционика ментология и психология личности №6 - М.: Международный институт соционики, 2001, с 23, 29.
7. Гуленко В.В., А.В. Молодцов. Введение в соционику – К.: ВЗУУП, 1991. – 193с.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Боскин О.О., Соколова Н.А.

### **Введение**

Учебный процесс – это понятие, которое охватывает всю учебную деятельность классического университета. Он состоит из множества компонентов: процесса обучения студента по конкретной специальности в течении пяти лет, семестрового учебного процесса на потоке, процесса изучения дисциплины, процесса контроля знаний студента. Классический университет имеет жесткий избыточный набор ресурсов, который позволяет реализовать учебный процесс в любой его интерпретации. Однако такой фиксированный набор приводит к издержкам планирования проведения процесса обучения. В данном аспекте система дистанционного имеет набор более гибких свойств, таких как непривязанность к месту и ко времени.

### **Постановка задачи**

Под *процессом* изучения дисциплины (далее процессом) будем понимать неделимую функцию освоения дисциплины студентом по утвержденной программе. Для реализации процесса изучения необходимы различные ресурсы. В общем смысле это – интеллектуальный ресурс (преподаватели) и учебный ресурс (далее – просто ресурс).

*Преподаватели* – это преподаватели кафедр, председатели экзаменационных комиссий, руководители учебно-производственных практик, лица, которые непосредственно осуществляют учебный процесс и контроль знаний студентов.

*Ресурсы* – это комплекты учебно-практических пособий, лекционные залы, лаборатории, мастерские, библиотеки и другие компоненты, без которых процесс обучения студента не может состояться.

Процесс будем считать начавшимся, если возникла необходимость изучения дисциплины соответственно учебному плану, и для этого есть в наличии требуемые ресурсы. Запуск процесса не означает, что в любой момент времени будет хотя бы один студент, изучающий данную дисциплину. Соответственно в рассматриваемой модели данный процесс может быть снят (или отменен).

Далее будем полагать, что данная модель рассматривает подход, ориентированный на индивидуализацию обучения студента. Поэтому, с учетом случайных явлений, не зависящих от такого подхода к обучению, при массовом обслуживании студентов возможны технологические задержки: очереди к преподавателям и задержки из-за временной нехватки ресурсов. Возникает задача определения такого числа ресурсов, при котором процесс обучения по конкретной специальности имел бы продолжительность не хуже заданной с учетом технологических задержек.

### **Реализация имитационной модели**

При реализации обучения по специальности процессы могут иметь причинно-следственные связи. Поэтому можно говорить, что они образуют направленный граф (рис. 1).

Применение методов сетевого планирования и управления невозможно, так как основная трудность – это циклы. Циклы возникают по двум основным причинам: студенты обучаются не по жесткому учебному плану (возможны различные индивидуальные планы), для отстающих студентов организуется повторное обучение (возврат к пройденной ранее, но не защищенной дисциплине для ее более глубокого изучения). Относительно пути студента по графу – в каждый момент времени он находится в определенном теку-

щем процессе – в узле графа. Процесс, который передал студента в текущий процесс, назовем *производителем*.

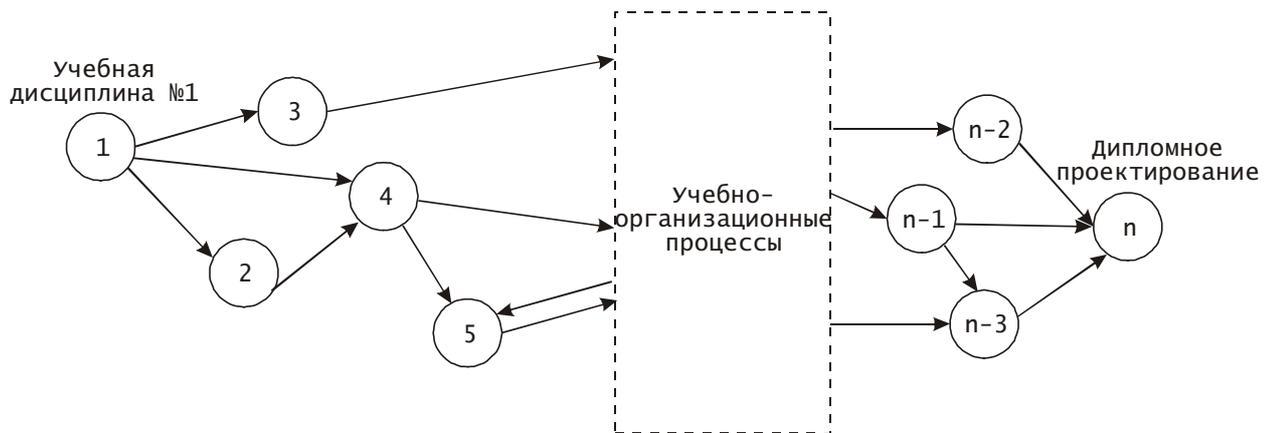


Рис. 1 Сеть процессов, протекающих при обучении по специальности

Рассмотрим возможные диаграммы состояний процесса (рис. 2).

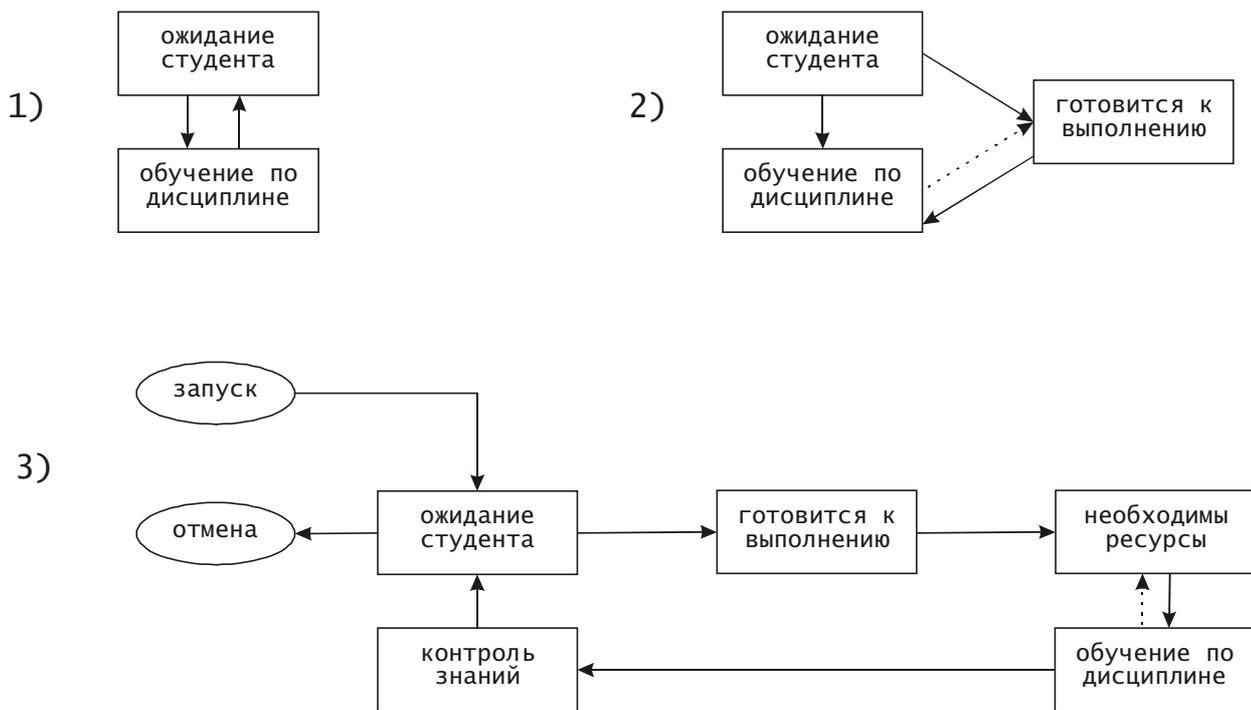


Рис. 2 Диаграмма состояний процессов

Если мощности ресурсов бесконечны (случай 1), либо каждый процесс используется вместе с постоянно закрепленными за ним ресурсами (лаборатории, библиотеки), то возможны два состояния: «ожидание студентов» и выполнение процесса «обучения по дисциплине». В таких ситуациях не возникает необходимости в незапланированных ресурсах: у студента есть учебный план. В состоянии «обучение по дисциплине» процесс попадает, получив студента от процесса-производителя. После изучения дисциплины студент переходит к процессу-потребителю и попадает в состояние «ожидание студентов», если какой-либо производитель не подготовил следующего студента.

В более реальном случае (случай 2) при конечных мощностях глобальных ресурсов появляется состояние ожидания ресурса, когда процессу (точнее, студенту в процессе обучения по дисциплине) необходимы ресурсы.

В условиях реального университета, когда обучение контролируется, а выделение ресурсов и их возвращение осуществляется с помощью процессов планирования и распределения ресурсов, вводятся еще два состояния (случай 3): «готовится к выполнению» и завершение выполнения – контрольные мероприятия, зачеты экзамены – «контроль знаний».

Когда возникает потребность в незапланированных ресурсах, то возможны обратные переходы типа «обучение по дисциплине» - «необходимы ресурсы» (случаи 2 и 3). Такие переходы могут привести к блокировкам, которые можно решить с помощью известных задач взаимного исключения.

Во время «подготовки к выполнению» осуществляется планирование ресурсов, а после завершения («контроль знаний») – возврат ресурсов в распоряжение планирующих и распределяющих процессов.

Организация и взаимосвязь различных компонентов системы такой модели обучения в университете может быть рассмотрена относительно управления процессами в следующих подразделениях университета (рис.3):

- учебный отдел, осуществляющий управление учебной и учебно-методической работой и всеми ресурсами, относящимися к учебному процессу;
- ректорат университета, который совместно с деканатами осуществляет управление учебным процессом согласно учебному плану по специальности;
- учебно-методический совет, который работает над корректировкой учебного плана;
- кафедры, которые являются обладателями интеллектуального ресурса (профессорско-преподавательского состава, аспирантов, докторантов и др.).

Рассмотрим время изучения студентами дисциплин учебного плана по специальности. Время прохождения всех дисциплин студентом – это время пребывания заявки в стохастической сети (рис. 1). Заявки в такой сети будем рассматривать как транзакты, чтобы отличать их от других элементарных заявок.

Транзакт, попадая из одного узла сети (процесс-производитель) в другой узел (процесс-потребитель), свидетельствует о необходимости изучения студентом следующей дисциплины учебного плана. После этого процесс-потребитель выводится из состояния «ожидание студентов» и попадает в состояние «готовится к выполнению». После выделения ресурсов «необходимы ресурсы», выполнения функции «обучение по дисциплине» и завершения выполнения контрольных мероприятий «контроль знаний» транзакт появляется на выходе узла-производителя, а процесс возвращается в состояние «ожидание студентов». Случайный интервал времени, ограниченный моментом выхода процесса из состояния «ожидание студентов» в начале изучения дисциплины и ближайшим моментом попадания в это состояние, назовем *интервалом активности* процесса. Длительность пребывания транзакта в соответствующем узле – это интервал активности. Для оценки времени реакции системы необходимо иметь рассчитывать значения интервалов активности всех процессов, входящих в состав сети.

#### **Оценка имитационной модели**

Построим итерационную процедуру, позволяющую провести соответствующие оценки.

*Начало итерации.* Пронумеруем  $N$  узлов стохастической сети, характеризующих конкретный план индексами  $j$ , и предположим справедливость следующих допущений:

- 1) известны средние значения всех интервалов активности  $t_{aj}$ ,  $j=1, \dots, N$  (только в некотором приближении, так как их необходимо рассчитывать);
- 2) известны вероятности поступления транзакта из каждого процесса-производителя в любой процесс-потребитель  $p_{jn}$ ,  $j,n=1, \dots, N$ ; эти вероятности определя-

ются исходя из параметров набора учебных планов, индивидуальных схем обучения и числа студентов, обучающихся по данной образовательной схеме (университетской);

3) сеть, отображающая конкретный учебный план, является полнодоступной с матрицей передач  $P=[p_{jn}]$ , причем вероятность поступления транзакта в процесс потребитель  $q$  в течении интервала времени  $(t, t+dt)$  является линейной комбинацией с постоянными коэффициентами  $p_{jn}$  вероятностей появления заявок на выходах вершин-производителей с номерами  $j, j=1, \dots, N$ .

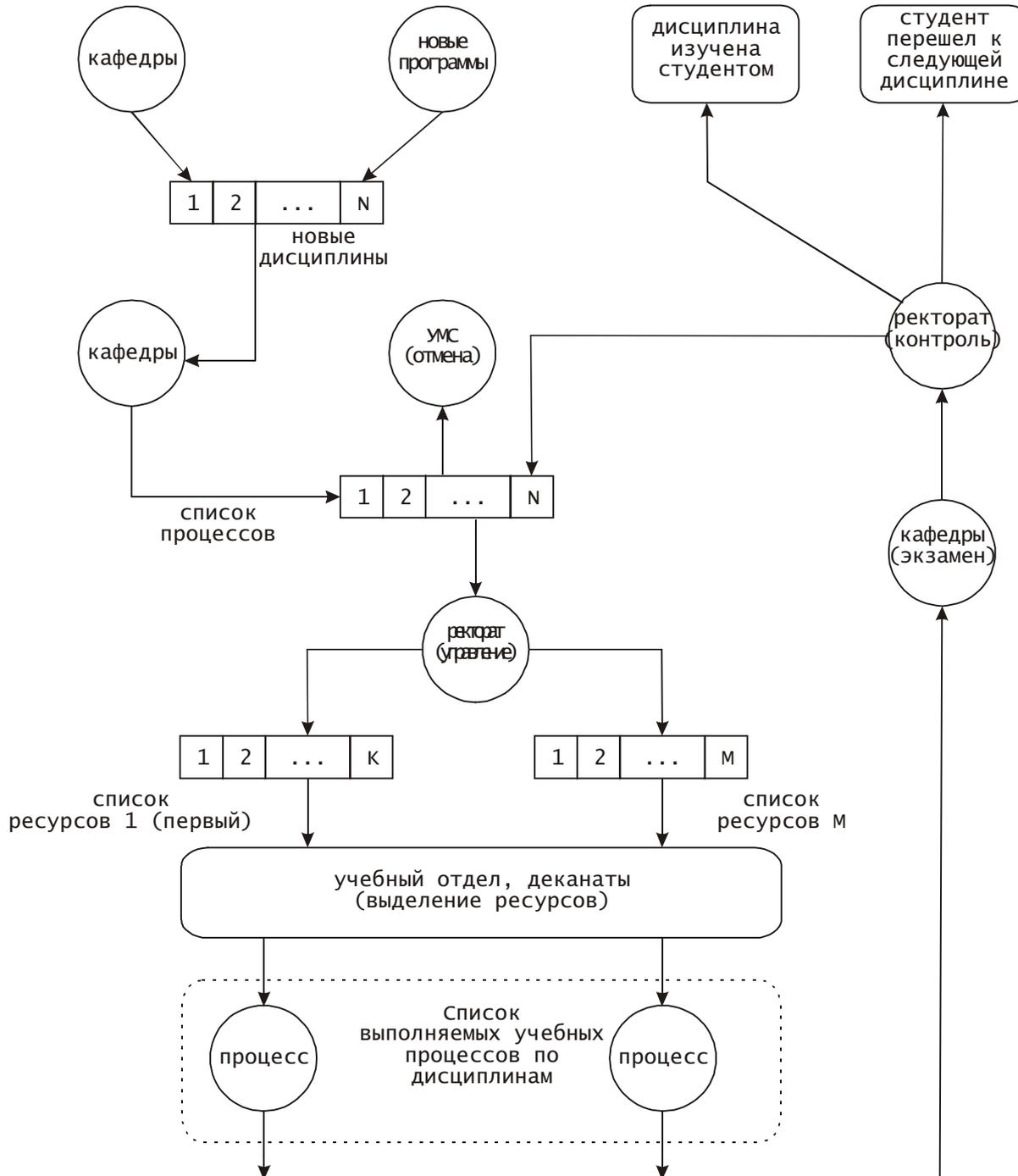


Рис. 3 Функциональные взаимосвязи объектов в учебном процессе

Такие допущения могут быть в какой-то степени справедливы, если учебный процесс находится в стационарном режиме (если переходные процессы и были, то они завершились). Поэтому при их выполнении можно получить среднее время изучения всех дисциплин учебного плана по формуле для замкнутых сетей:

$$T = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^N \lambda_j t_{qj},$$

где  $t_{qj}$  – средняя длительность интервала активности;

$\lambda_j$  – интенсивность запросов на курс с номером  $j$ ;

$\lambda$  – интенсивность поступления потока студентов, желающих обучаться по данному учебному плану.

Поэтому для оценки времени выполнения учебного плана необходимо знать средние значения интервалов активности всех процессов.

Для анализа интервала активности необходимо рассмотреть «нетрадиционную модель» массового обслуживания. Введем условные обозначения параметров временных интервалов:

$t_{WS}$  – процесс ожидает студентов;

$t_R$  – готовится к выполнению;

$t_{NS}$  – процессу необходимы ресурсы;

$t_{EDU}$  – процесс обучения по дисциплине;

$d_{EDU}$  – дисперсия процесса обучения по дисциплине;

$t_{EXAM}$  – экзамен, зачет, контрольное мероприятие;

$t_Q$  – длительность ожидания запроса в очереди к ресурсу;

$t_A$  – длительность интервала активности процесса;

$t_M$  – основная составляющая интервала активности;

$t_{W1}$  – длительность ожидания первого элемента ресурса;

$t_{WE}$  – длительность ожидания какого-либо ресурса;

$t_{WS}$  – длительность ожидания обслуживания в очереди к ресурсу;

$t_{SER}$  – длительность обслуживания в очереди к ресурсу;

$t_{WN}$  – время ожидания из-за нехватки элемента ресурса;

$t_{WQ}$  – время ожидания запрошенного элемента ресурса;

$c_W$  – коэффициент вариации времени ожидания ресурса;

$c_S$  – коэффициент вариации времени обслуживания в очереди к ресурсу;

$c_Q$  – коэффициент вариации интервала запросов к ресурсу.

На интервале активности процесс может находиться в состояниях «готовится к выполнению», «необходимы ресурсы», «обучение по дисциплине» и «контроль знаний». Будем считать, что ресурсы выделяются во время пребывания в состоянии «необходимы ресурсы» (интервал  $t_{NSj}$ ), а освобождаются все сразу – в конце интервала пребывания в состоянии «контроль знаний» (по истечении  $t_{EXAMj}$ ); оба эти интервала – детерминированные величины. Интервал активности равен:

$$t_T^{(t)} = t_{Rj} + t_{NSj}^{(t)} + t_{EDUj}^{(t)} + t_{EXAMj},$$

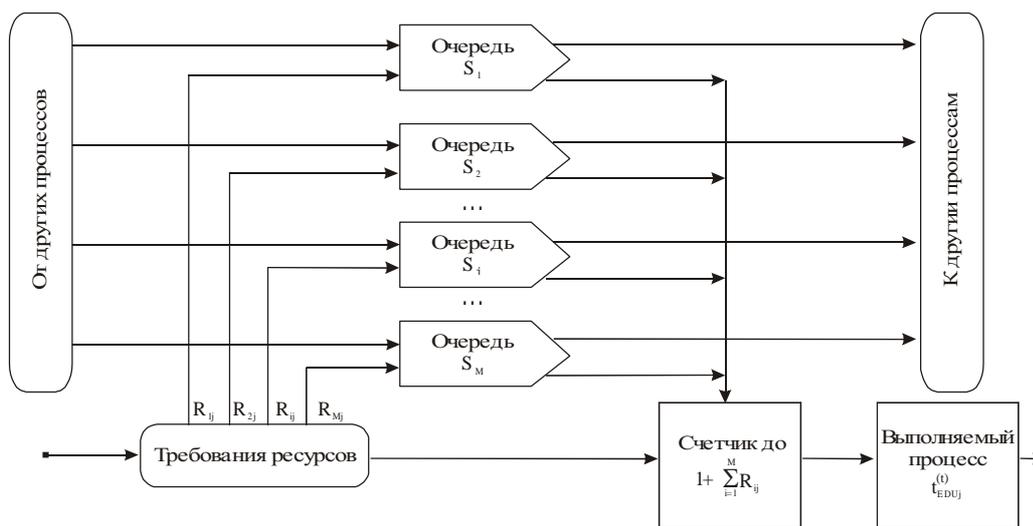
где  $t_{NSj}^{(t)}$  – длительность пребывания в состоянии «необходимы ресурсы»;  
 $t_{EDUj}^{(t)}$  – длительность пребывания в состоянии «процесс обучения»;  
 $j$  – номер процесса,  $j=1,2,\dots,N$ ;  
 $(t)$  – индекс, показывающий случайный характер индексной величины.

Будем считать, что величины  $t_{Rj}$  и  $t_{EXAMj}$  – известны, а интервал  $t_{EDUj}^{(t)}$  задан с помощью математического ожидания  $t_{EDU}$  и дисперсии  $d_{EDU}$ . Интервал  $t_{EDUj}^{(t)}$  можно определять с помощью одного из трех возможных способов:

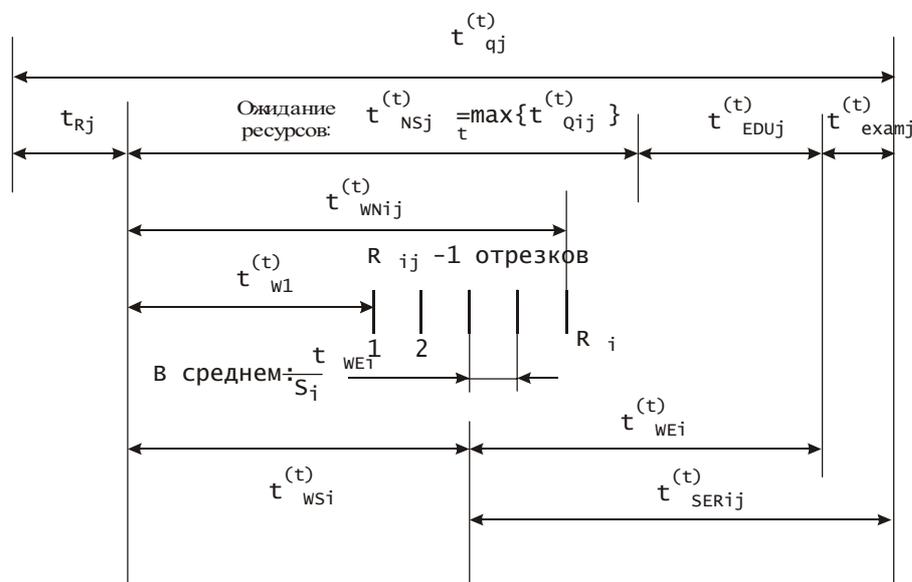
- 1) исходя из характеристик рассматриваемой формы обучения;
- 2) с помощью хронометрирования;
- 3) если учебное заведение осуществляет приоритетное обслуживание для некоторых категорий студентов, то  $t_{EDUj}^{(t)}$  – это цикл обслуживания; методика определения цикла обслуживания для потоков типа пуассоновского или группового с соответствующими формулами расчетов.

Предположим, что в распоряжении учебного заведения имеется  $M$  глобальных ресурсов, используемых при обучении. Мощность каждого ресурса –  $S_i$  элементов, а для выполнения процесса (изучения курса)  $j$  предварительно необходимо выделить  $R_{ij}$  элементов каждого ресурса. Причем  $0 \leq R_{ij} \leq S_i$ ,  $i=1,2,\dots,M$ ,  $j=1,2,\dots,N$ .

Поставим в соответствие началу интервала активности момент появления транзакта на входе модельной системы, изображенной на рис. 4. Этот транзакт попадает на вход генератора, на каждом  $i$ -м выходе которого через время  $t_{Rj}$  появятся порции  $R_{ij}$  заявок, которые распределяются по  $S_i$  очередям. Длительность обслуживания в каждой очереди  $t_{NSi}^{(t)}$  – это интервал времени, начинающийся в момент выделения процессу первого элемента ресурса  $i$  из набора свободных ресурсов и заканчивающийся моментом возвращения всех  $R_{ij}$  элементов в этот набор (каждому ресурсу соответствует свой менеджер обслуживания, контролирующий очередь).



а- схема массового обслуживания в пределах интервала активности



б- временные диаграммы элементарных процессов

Рис. 4 Модель анализа интервала активности процесса

Через какой-то интервал времени

$$t_{W1ij}^{(t)} = \min_{R_{ij}} \{t_{WQij}^{(t)}\}$$

на входе счетчика появится удовлетворенная заявка очереди  $i$ -го ресурса. После этого проходит еще  $R_{ij} - 1$  случайных интервалов, пока не появятся остальные заявки (каждая соответствует одному выделенному элементу). Если считать, что интенсивность освобождения процессами элементов стационара, то каждый из  $R_{ij} - 1$  интервалов в среднем равен  $t_{WEi} / S_i$ , где  $t_{WEi} = M[t_{WEi}^{(t)}]$ .

Через время

$$t_{WNij}^{(t)} = \max_{R_{ij}} \{t_{WQij}^{(t)}\}$$

появится последняя заявка, соответствующая выделению последнего из запрошенных  $g_{ij}$  элементов  $i$ -го ресурса, после чего учебный процесс выполняется (за время  $t_{EDUj}^{(t)}$ ) и завершается контрольными мероприятиями (за время  $t_{EXAMj}^{(t)}$ ). Поток заявок, поступающий на вход рассматриваемой модели, – неординарный с интенсивностью  $\lambda_j$ .

Классический учебный процесс строится по принципу специальность—учебный план—расписание занятий—контингент.

Сеть процессов, образующих учебный план, – сложная, полнодоступная. Поэтому в расчетах будем считать, что поток групп – пуассоновский, в размер группы распределен по закону обобщенного распределения Эрланга.

Одно из свойств групповых потоков заключается в том, что  $\sigma$  превосходит математическое ожидание интервала между заявками, поэтому коэффициент вариации  $c > 1$ . Формула для оценки среднего размера группы заявок при обобщенном распределении Эрланга имеет вид:

$$\bar{n} = \frac{1}{2}(1 + c^2).$$

Это соотношение позволяет отслеживать появление групповых потоков в реальных системах или в их имитационных моделях. Особенность обобщенного распределения Эрланга заключается в том, что его применение позволяет выполнить расчет на худший случай (при перегрузках).

Однако рассмотренные временные диаграммы обладают высокой универсальностью и полностью совпадают с временными диаграммами совокупности параллельных вычислительных процессов, взаимодействующих через общие ресурсы в памяти компьютера.

### Выводы

1. Для моделирования процесса дистанционного обучения применимы имитационные методы.
2. Для предварительного анализа поведения модели применим метод статистических испытаний, основанный на использовании датчиков псевдослучайных величин.
3. Для реализации имитационной модели необходимы датчики псевдослучайных величин и соответствующие моделирующие функции.

Imitating modelling as special information technology is used in cases when algorithmic methods or it is impossible, or too toilfully to use for the description and research of complex economic processes.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПЕРСОНАЛА В УПРАВЛЕНИИ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

Кирюшатова Т.Г., Чёрный С.Г.

Постановка проблемы. На данный момент остро стоит вопрос об актуализации вопросов связанных с персонализацией организации или конкретного рабочего места. Эффективность принятия решения и работы персонала зависит не только от внедрения новых информационных технологий и экономических новшеств, но также и от внутренней рабочей среды создаваемых сотрудниками при совместной деятельности направленной на решение конкретной задачи или разрешение определенной ситуации. При комбинации выше перечисленных факторов можно добиться более значительных эффектов работы персонала, а значит и организации в целом. Целями данной работы ставится моделирование процесса распределения функций персонала в управлении предприятием или небольшой фирмой, при незначительных затратах на информационные и экономические ресурсы; достижение максимальной работы персонала, а следовательно большей прибыли, что влечет за собой создание более крупного предприятия, а также при развитых информационных и экономических факторах максимализация работы организации для достижения более высоких показателей.

Анализ последних достижений и публикаций. Данное направление становится более актуально, т.к. все новые и новые исследования показывают эффективность применения, разработки и внедрения данной технологии. Актуализация вопросов данной тематики стоит очень широко. Разработками в данной области занимались: Зигель А., Вольф Дж., Мейстер Д. и многие другие. Их разработки были направлены на круг вопросов связанных с разработкой моделей группового поведения в системе «человек-машина» с учетом психосоциальных и производственных факторов, также велись разработки эргономических основ сложных систем. [1]

Сейчас эти вопросы становятся более актуальными, они набирают большой оборот в нашем информационно-экономическом обществе, где вопрос прибыли и эффективности стоит на первом месте, хотя эти вопросы были актуальны всегда, но методики были различны для достижения результатов. Одним из авторов данной статьи Кирюшатовой Т.Г. по данной тематике были проведены ранее исследования, который показывают эффективность и актуализацию данной работы. Были проведены разработки по математическому моделированию коллективной деятельности в иерархических системах, была предложена модель трехуровневой иерархической системы управления предприятием; определен количественный подход к подбору сотрудников для совместной деятельности, была предложена методика подбора сотрудников по количественной оценке шкалы теста Кеттела.

Изложение основного материала исследования. Уже при постановки вопроса о субъекте деятельности мы сталкиваемся с многомерностью позиций и необходимость проведения конкретных исследований по выявлению наиболее эффективно работающего субъекта деятельности в конкретной системе (например, характера совместной производственной деятельности, жесткости заданных функций, учета характеристик персонала и т.д.). Детальная формализация возможна лишь при накоплении обширного массива эмпирических данных. Можно дать предварительную общую гипотезу. Предположим, что наиболее высокие показатели эффективности могут быть достигнуты при использовании механизмов самоорганизации, когда функции распределяются участниками рабочей группы. Внешние параметры производственной деятельности, очевидно, могут накладывать ограничения на реализацию именно этой модели. Актуальным предоставляется вопрос формализации распределения функций, его содержанием является перевод объективных требований, задаваемых «функциональной организацией», в модели и образцы деятельности по

распределению функций, реализуемые субъектом. Распределение функций в формализованном виде можно представить как формирование у субъекта и использование им моделей (образов, представлений) того, что подлежит распределению:

1. Объекта деятельности
2. Рабочего персонала
3. Смыслов и значения деятельности
4. Правил поведения и степеней свободы.

Изучая использование моделей деятельности, можно столкнуться с возможностью «перекодировки» объектов, подлежащих распределению, с учетом требований «функциональной организации». Многоплановость самой производственной деятельности, наличие социального, экономического, правового, социально-психологического планов, в которых развертывается совместная деятельность людей, неминуемо «отягощают» те или иные функции, подлежащие распределению, многочисленными индексами – показателями их значений и весов в различных сферах общественных отношений. В результате при распределении функций оказывается возможным их «перевод» в категории вознаграждения за выполнение этих функций, соответственно распределяться будут не функции как таковые, а эти вознаграждения.

При таком переходе и смене объекта может измениться система выбора и расстановки кадров, заданная техническими требованиями, предлагающими учет психофизиологических возможностей индивидов. Подобная «перекодировка» возможна по разным причинам, в конце концов мы можем столкнуться не с распределением функций в соответствии с требованиями технико-технологической системы, а с распределением статусов, престижа, льгот и привилегий, личных предпочтений и т.д.

Подобные смены объектов могут приводить к нарушению системы совместной деятельности и наносить ущерб производственному процессу. Например, представления о престиже или статусе, связанном с выполнением тех или иных функций, могут быть неадекватны (завышены или занижены), могут не соответствовать реальному значению этих функций для системы совместной деятельности в целом. Функции, связанные с представлением субъекта о низком статусе выполняющего их лица или о непрестижности этой деятельности. Очевидно, что учет всех возможных показателей распределяемых функций исключительно важен в социальном и социально-психологическом плане, ибо связан с многообразными социальными чувствами и устремлениями людей, например с чувством собственного достоинства, справедливости, самоуважения, желанием отличиться, быть полезным, быть в центре внимания и т.д. Таким образом, как и при любом виде распределительных отношений, при распределении функций социальные, социально-психологические, социально-экономические факторы всегда выступают на передний план, иногда затеняя и нарушая реализацию требований основной системы деятельности.

Могут использоваться модели, построенные с учетом профессиональных или сугубо личных характеристик людей, их деловых качеств или отношения с администрацией, их семейного положения, участия в общественных организациях, их родственных или дружеских связей и т.д. Очевидно, что диапазон моделей и «перекодировок» подобного типа чрезвычайно обширен. Но все они порождают особые социальные и социально-психологические ситуации, учет которых необходим для налаживания нормальных условий совместной деятельности.

Информатизация современного общества характерна развитием все более новых и новых информационных технологий. Прогрессивное развитие способствует развитию производства, т.к. уменьшение времени на обработку информации и принятию более эффективных и правильно обоснованных решений способствует экономическому росту организации. Одним из важных критериев является и отношение социально-психологического характера в коллективе организации. Формирование и принятие решений в управленческой деятельности характерна и более эффективна в коллективе с хоро-

шими социально-психологического характера отношениями. Это способствует эффективной работе практически в любой организации.

Рассмотрим один из примеров построения модели процесса функционирования предприятия, связанного с информационными потоками данных и характерными особенностями влияния социально-психологических факторов.

В процессе трудовой активности индивида или группы одним из важных направлений является алгоритмический анализ деятельности [2], т.к. он является одним из видов формального операционного описания трудового процесса как совокупности дискретных единиц деятельности и правил, определяющий порядок их следования. Целью алгоритмического анализа является количественная оценка стереотипности, логической сложности, динамической интенсивности, скорости переработки информации в процессе трудовой деятельности. Показатель стереотипности трудового процесса зависит от числа элементарных операций в алгоритме и длительности их непрерывной последовательности; он определяется по формуле:

$$Z = \sum_{n=1}^k P_n^{(0)} X_n^{(0)} \quad (1)$$

где  $X_n^{(0)}$  - число последовательных элементов в группе без логических условий по 1,2,...,k членов;  $P_n^{(0)}$  - вероятность таких групп.

Изменения системы сигналов и отражение динамического компонента деятельности оператора отражающей сложный логический процесс перестройки системы, определяется по формуле:

$$L = \sum_{n=1}^m P_n^{(л)} X_n^{(л)} \quad (2)$$

где  $X_n^{(л)}$  - число проверяемых логических условий в группе из 1,2,...,m таких условий;  $P_n^{(л)}$  - вероятность таких групп.

Средняя скорость информации определяется по формуле:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^k H_{iо} + \sum_{i=1}^m H_{iл}}{t} \quad (3)$$

где  $H_{iо}$  - энтропия i-го «оператора» (элементарной операции);  $H_{iл}$  - энтропия i-го логического условия; k,m – общее число «операторов» и логических условий в алгоритме; t – время выполнения алгоритма.

Необходимым условием является интенсивность выполнения алгоритма, т.к. различные факторы могут накладывать свои ограничения; интенсивность выполнения алгоритма определяется числом элементарных оперативных единиц («k», «m»), выполняемых в единицу времени:

$$V_a = \frac{k + m}{\tau} \quad (4)$$

Из выше изложенного можно сделать вывод о влиянии многофакторности на работу человека-оператора и общая сложность выполнения алгоритма исходя из формул (1-4) определяется по формуле:

$$S_o = \frac{V_a * S * Z}{L} \quad (5)$$

При формировании модели для функционирования необходимо учитывать коэффициент нагрузки, который играет достаточно важную роль. Для измерения степени опе-

рациональной напряженности используются оценки внешних факторов труда и, в частности, информационной нагрузки оператора. Коэффициент загруженности определяется по формуле:

$$K = 1 - \frac{T_p}{T_g}, \quad (6)$$

где  $T_p$  - общее время, в течении которого оператор занят обработкой поступающей информации;  $T_g$  - общая продолжительность дежурства; из физиологии труда известно, что при операторской деятельности около 25% рабочего времени должно быть предоставлено человеку для отдыха.

Приведенные формулы классифицируют общую характерную шаблонную модель при построении, которой она может быть модифицирована практически под любую модель распределения и построения функций в управлении персоналом, но необходимо помнить при формировании данных о пропускной способности информации. Количественная оценка информации дается с помощью понятия «энтропия». Изменение энтропии, обусловлено полученным сообщением, определяет количество информации, содержащееся в конкретном сообщении. Среднее количество информации рассчитывается по формуле К.Шеннона:

$$H = \sum P_i * \log \frac{1}{P_i}, \quad (7)$$

где  $H$  – среднее количество информации,  $P_i$  - вероятность  $i$ -го события.

Выводы и перспективы дальнейшего развития. Характерно, что разработка соответствующих требований, преобразование социальных и социально-психологических параметров производственных функций человека в системе совместной деятельности не могут идти вразрез с совершенствованием «функциональной организации». Она должна завершать психотехническую, инженерно-психологическую и социально-организационную разработку проблемы распределения функций. Невозможно требовать от работника проявления гражданских качеств, если условия его работы таковы, если он физически не в состоянии выполнить свои функции, если он подвержен психическому и социальному стрессу, материально незаинтересован, чувствует себя обойденным и униженным руководителем, отвергнутым коллективом или искусственно задержанным в своем профессиональном росте.

Разработка данных моделей необходима в наше время. Данные модели позволяют максимизировать прибыль предприятия за счет социально-психологических факторов, на которые ранее внимание менее обращалось. Новые информационные технологические достижения способствующие более эффективному прогнозу для принятия решения как в экономики так и в других областях, существенно более эффективнее обрабатываются в коллективе более подобранном для совместной и коллективной работы, чем в аналогичном коллективе, но с разносторонностью взглядов и совместных отношений.

The Article is dedicated to questions to modeling to collective activity in production group. They Are Offered different ways of the building of the models of the distribution function personnel, which can be used when shaping different production group, when shaping the personnel for achievement maximum degree to efficiency under labor activity.

1. Зигель А., Вольф Дж. Модели группового поведения в системе «человек-машина» с учетом психосоциальных и производственных факторов. – М., 1973. – 261 с.
2. Мейстер Д. Эргономические основы разработки сложных систем. – М., 1978. – 455 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАТЯЖЕНИЯ НИТИ ПРИ СМОТКЕ С КОНИЧЕСКОЙ БОБИНЫ В ПРОЦЕССЕ ПАРТИОННОГО СНОВАНИЯ

Клименко Д.С.

Натяжение паковки, как функция её линейной скорости и еще целого ряда технологических факторов, до сих пор до конца не изучена. Поэтому задача управления осложняется наличием у объекта управления релейных и медленноменяющихся характеристик (торможение в случае обрыва и медленно растущие радиус паковки, моменты сил инерции и трения).

Существует ряд работ, посвященных моделированию процесса снования, исследованию обрывности нитей при партионном сновании и разнообразным способам оптимизации данного процесса. Однако рассмотренные модели опираются на обобщенные сведения о технологии и не могут быть применены на практике. Статьи, посвященные исследованию колебательных составляющих натяжения, ограничиваются моделированием небольших технологических участков нити на пути от бобины до сновального вала.

Целью статьи является создание модели, наиболее точно описывающей процессы изменения натяжения при сматывании нити с конической бобины. Планируется применение полученной модели для описания всего процесса снования.

В [1] приводятся формулы, описывающие изменение геометрических параметров конической бобины как функций длины смотанной нити. Такой подход позволяет проводить точное определение радиусов паковки непосредственно на станке, опираясь лишь на априорные измерения, модель геометрических параметров и показания датчика длины смотанных нитей.

Описание движения нити под действием натяжения начинается с определения точки касания. В [2] рассмотрены три типовые пространственные траектории. Результаты показывают высокую точность моделирования при использовании локсодромы:

$$\rho = \exp(\psi\varphi), \quad \psi = -\sqrt{2}\operatorname{ctg}\alpha, \quad \zeta = 1 - \rho. \quad (1)$$

где  $\rho, \varphi, \zeta$  - цилиндрические координаты, ось которых совпадает с осью кругового конуса,  
 $\alpha$  - Угол между линией намотки и образующей конуса в точке начала движения.

$$\zeta = 1 - \rho, \quad \zeta = \bar{Z}/H, \quad \rho = \bar{P}/R. \quad (2)$$

где  $H$  - высота конуса;

$R$  - радиус основания.

Цикл намотки считается законченным, когда  $\rho_k \approx 0$ .

Сложность при определении координат точки схода нити с бобины заключается в определении медленноменяющейся максимальной длины дуги на конической поверхности, требующей взятия конечного интеграла в полярных координатах, что в свою очередь связано с затратами вычислительных мощностей.

При исследовании процесса осевого сматывания нити с неподвижной паковки важно определить начальное натяжение нити в зоне отрыва её от поверхности. В [3] приведена формула, определяющая величину реактивной составляющей силы натяжения нити при сматывании её с неподвижной паковки в зависимости от контурной скорости движения её в баллоне, от геометрических параметров паковки и баллона и от положения точки схода нити на поверхности паковки.

$$T_1 = \frac{2\mu}{\cos^2 \lambda \cos^2 \beta} \left\{ \dot{z}^2 + (l_0 \cos \lambda \cos \beta - z) \left[ \ddot{z} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\gamma - \psi) \psi \dot{z}}{1 \pm \cos(\gamma - \psi)} \right] \right\}; \quad (3)$$

$$l_0 = \frac{z_{\max}}{\cos \lambda \cos \beta}, \quad l = l_0 - s = \frac{l_0 \cos \lambda \cos \beta - z}{\cos \lambda \cos \beta}.$$

где  $T_1$  - реактивная составляющая силы натяжения;

$\mu$  - линейная плотность нити;

$l$  - длина баллонирующего участка нити;

$\gamma$  - угол между элементом нити  $dl$  и осью  $z$ .

$\lambda$  - угол при вершине конуса;

$\beta$  - угол намотки;

$R$  - радиус основания конуса;

$l_0$  - длина витка нити на паковке между точек с координатами  $z_0$  и  $z_{\max}$ ;

Верхний знак соответствует значению силы при убывающей массе, когда точка схода нити движется вверх, нижний знак – при возрастающей массе, когда точка схода движется вниз.

Координаты  $z$ ,  $\varphi$  и  $r$  связаны соотношением

$$\begin{aligned} z &= H(1 - \exp[(\varphi_0 - \varphi)\alpha]); \\ z &= (R - r)\operatorname{ctg}\lambda; \\ r &= R - z\operatorname{tg}\lambda; \\ \varphi &= \varphi_0 - \frac{k}{\sin \lambda} \ln \left[ 1 - \frac{\operatorname{tg}\lambda}{R} z \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение натяжения нити в баллоне при сматывании с початка имеет следующий вид [4]:

$$T_x = T_1 + \frac{m\omega^2}{2} (R^2 - r^2); \quad (5)$$

где  $T_x$  - натяжение нити в любой точке баллона;

$T_1$  - натяжение нити при сматывании с початка;

$R$  - радиус паковки в точке сматывания;

$r$  - радиус баллона.

Натяжение нити в вершине баллона, где  $r = 0$ , равно:

$$T_0 = T_1 + \frac{m\omega^2}{2} R^2. \quad (6)$$

Данная формула применима для описания смотки нити с конической бобины. Угловая скорость точки схода баллонирующей нити описывается формулой

$$\omega = \frac{V}{R} \cdot \frac{\sin \beta}{1 \pm \cos \beta \cos \gamma} \quad (7)$$

Массу нити в баллоне можно определить, зная линейную плотность нити и определив по формуле [5]:

$$l = \int_0^h \sqrt{1 + y'^2 + z'^2} dx; \quad (8)$$

Из уравнения (5) видно, что натяжение нити в любой точке баллона равно натяжению нити в точке отделения ее от паковки ( $T_1$ ) плюс динамическая составляющая, равная половине произведения массы 1 см нити на квадрат угловой скорости и на разность квадратов радиуса паковки и радиуса определяемой точки баллона.

Из этого уравнения следует, что наименьшим натяжение нити будет в самой удаленной точке от оси баллона и наибольшим - в точке пересечения нити с осью вращения баллона.

### Выводы

1. На основании приведенных формул, для исследования колебаний натяжения нити с неподвижной конической бобины в процессе снования, составлена модель в пакете Matlab. Следует отметить, что моделирование проводится без учета таких параметров, как угол наклона бобины в шпулярнике, сил трения при отрыве нити от паковки, а также цеховых влажности и температуры. Рассматривается плоская форма баллона. Каждый этап моделирования выполнен отдельным блоком, что позволяет легко вносить изменения и уточнения а также отслеживать зависимости изменения параметров модели от линейной скорости снования.

2. Модель предназначена для исследования колебаний натяжения нити при партионном сновании с конических бобин. Конечной целью моделирования является исследование влияния колебательных составляющих натяжения (параметрической и вынужденно) на обрывность при различных динамических режимах процесса снования.

1. Моделирование сматывания с конической бобины при партионном сновании / Клименко Д.С. // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – 2004. - №1(8). - С. 323

2. Водовозов В.М., Мядзель В.Н., Рассудов Л.Н. Планирование траекторий и разработка упрощенных законов управления намоточным оборудованием при замотке конических паковок. – Изв. вузов. Технология текстильной промышленности, – 1980. – №3 . - С.81-84.

3. Чичаева С.А., Кан Э.М. О реактивной составляющей силы натяжения при сматывании нити с неподвижной паковки. – Изв. вузов. Технология текстильной промышленности, – 1972. – №5 С.78-81.

4. А. И. Бородин Высокоскоростное перематывание основной пряжи с початка. – М.: “Легкая индустрия”, – 1965.

5. Якубовский Ю.В., Живов В.С., Коритыцкий Я.И., Мигушов И.И. Основы механики нити. – М.: “Легкая индустрия”, – 1973.

## ОСРЕДНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ЯЧЕЕК В МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Марценюк Е.Н.

Отсутствие методов прогнозирования движения грунтовых вод, своевременного определения времени и масштабов подтоплений не позволяют принимать упреждающие и профилактические меры.

Путем сбора информации с помощью мониторинга может быть создана база данных, где отслеживалась бы информация об уровнях залегания грунтовых вод, прочности и свойствах грунтов, отметках водоупора, особенностях гидрометеорологических условий и т.д.

Для проведения дальнейшего анализа требуется привязка к рельефу, для анализа уклонов рельефа и пересечений местности. Для этого информацию базы данных требуется привязать к геоинформационной системе.

По результатам мониторинга можно произвести анализ территории по залеганию грунтовых вод, построение карты движения вод. На основании анализа движения грунтовых вод могут быть определены начальные и граничные условия решения дифференциального уравнения движения грунтовых вод, и построена модель движения грунтовых вод [1, 2].

Наиболее универсальный способ изучения фильтрационных процессов в естественных и искусственных резервуарах с использованием аппарата математического моделирования предполагает проведение вычислительного эксперимента. Но для построения численной фильтрационной модели необходим переход от детальной геологической модели резервуара к укрупненной фильтрационной модели. Для этого следует совершенствовать численные методы осреднения фильтрационных характеристик.

Задача осреднения фильтрационных характеристик объекта моделирования ставится следующим образом. Набор геологических ячеек (ГЯ) описывает выделенную для создания фильтрационной модели область грунтовых пропластков, проиндексированных по совпадающим временным ритмам осадконакопления и схожим фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС). В данном наборе ГЯ необходимо объединить совокупность геологических ячеек (рис. 1) в одну фильтрационную с модифицированными свойствами, которые характеризуют процесс фильтрации на данном участке в целом, а также следует описать ФЕС фильтрационной ячейки (ФЯ), адекватно отображающие фильтрацию флюидов через данный блок.

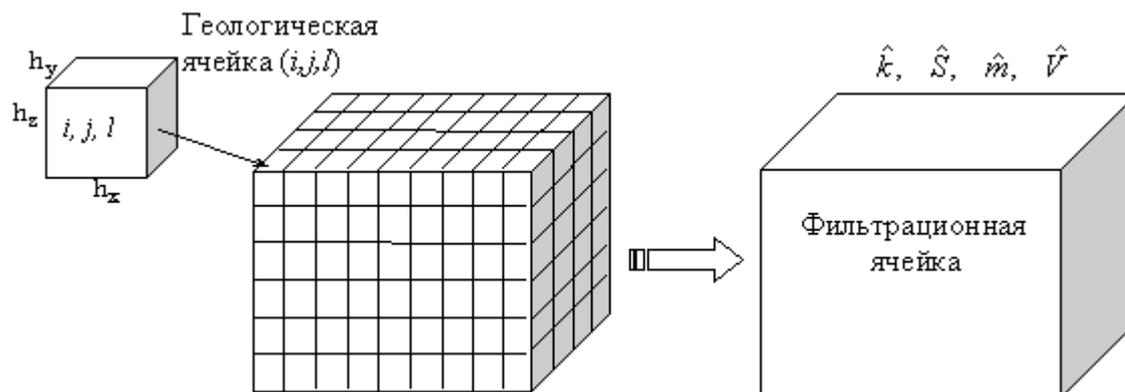


Рис. 1 Преобразование геологических ячеек в фильтрационную

Для простоты выкладок считаем, что геологическая сетка равномерна по каждому направлению с шагом  $h_x$ ,  $h_y$  и  $h_z$  соответственно (рис. 1).

При получении осредненных характеристик ФЭС для фильтрационной ячейки особого рассмотрения требует вопрос определения тензора проницаемости ФЯ с учетом локальной анизотропии.

Опишем наиболее приемлемые методы для решения поставленной задачи.

1. Средневзвешенное осреднение.

Наиболее простой способ задания средних фильтрационных свойств ячейки основан на средневзвешенном по мощности или объему объекта определении проницаемости фильтрационной ячейки.

В этом случае расчет осуществляется с учетом латеральной и вертикальной анизотропии, но результаты не всегда адекватно отображают реальный фильтрационный процесс. Этот подход осреднения может применяться на начальной стадии моделирования или когда нет достаточной информации о степени точности исходных параметров.

2. Осреднение фильтрационного сопротивления.

В основу данного осреднения положена методика расчета фильтрационного сопротивления [1, 2]. Этот метод рассматривает фильтрационную модель как аналог электрической цепи, а фильтрационное сопротивление – как аналог электрического сопротивления, тогда все вычисления проводятся согласно правилам расчета электрических цепей по законам Ома и Кирхгофа.

Для определения проницаемости блока в направлении оси  $O_x$ - $K_x$  из отдельных ячеек сформируем цепь, как показано на рис. 2.

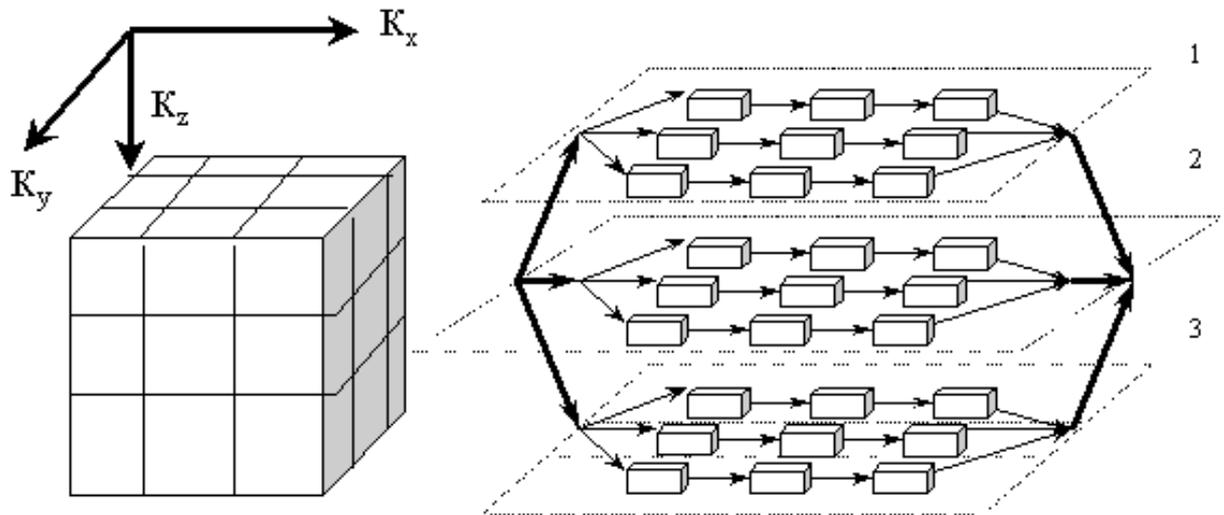


Рис. 2 Формирование цепи ячеек для определения проницаемости блока

Так как фильтрационное сопротивление в каждой ячейке обратно пропорционально проницаемости  $\varphi_{ijl} = \frac{1}{k_{ijl}}$ , то для последовательных соединений в направлении оси  $O_x$  на первом слое имеем (рис. 2):

$$\Phi_i = \sum_j \varphi_{ijl}, \quad i = \overline{1, N_y}.$$

Для первого слоя, с учетом последовательных и параллельных соединений ячеек, фильтрационное сопротивление вдоль оси  $O_x$  рассчитываем по формуле:

$$\Phi_x^{(l)} = \left( \sum_i \frac{1}{\Phi_i} \right)^{-1}.$$

Тогда полное фильтрационное сопротивление данного блока вдоль оси  $O_x$  определяется как:

$$\Phi_x = \left( \sum_l \frac{1}{\Phi_x^{(l)}} \right)^{-1}, l = \overline{1, N_z}$$

и, соответственно, проницаемость блока в направлении оси  $O_x$ :

$$K_x = \frac{1}{\Phi_x}.$$

Аналогично определяется тензор проницаемости в направлениях осей  $O_y$  и  $O_z$ . Причем для расчета проницаемости вдоль оси  $O_z$  учитывается вертикальная анизотропия объекта.

### 3. Расчет тензора проницаемости с учетом трубок тока.

В блоке, состоящем из набора геологических ячеек, с помощью специальных методов трассировки выделяются все изолированные грунтовые тела с ненулевой проницаемостью (рис. 3).

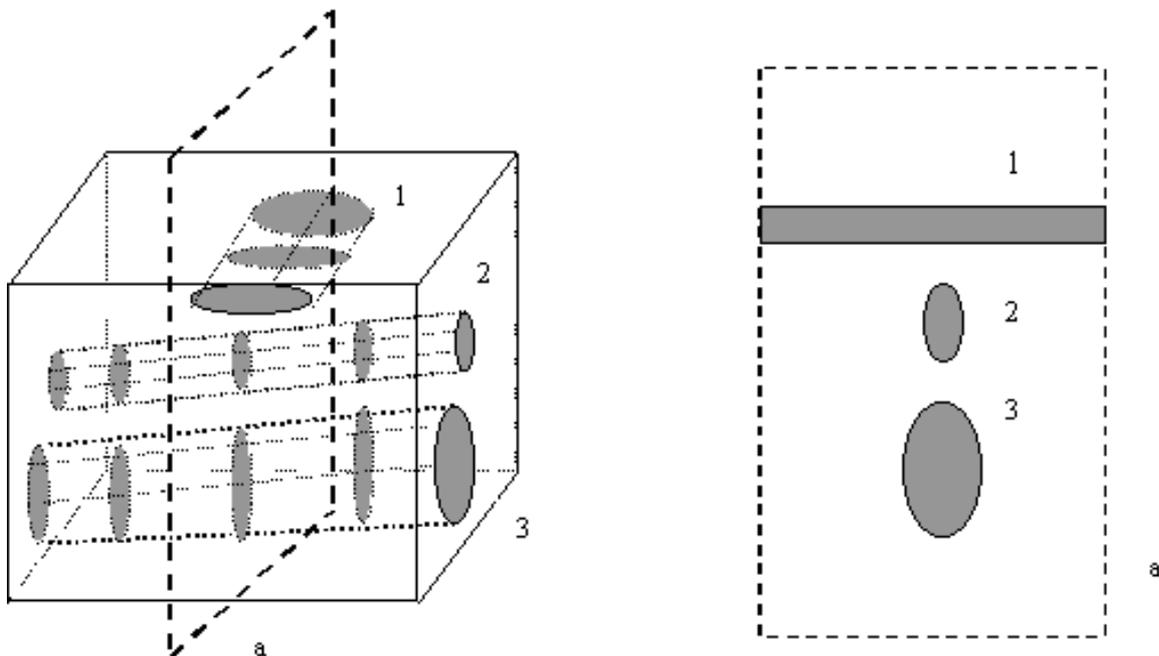


Рис. 3 Изоляция грунтовых тел с ненулевой проницаемостью

Для определения осредненной проницаемости по одному из направлений  $O_x$ ,  $O_y$  или  $O_z$  выбираются те трубки тока, которые пересекают выбранное тело в заданном направлении. В данном случае для нахождения компоненты тензора проницаемости  $K_x$  используются грунтовые тела 2 и 3, а для компоненты  $K_y$  - тело 1 (рис. 3). Считаем, что все трубки тока идут параллельно граням параллелепипеда.

Для вычисления значения  $K_x$  всем геологическим ячейкам, не входящим в выделенные тела 2 и 3, припишем фиктивную нулевую проницаемость, так как эти ячейки не участвуют в определении осредненной проницаемости в направлении оси координат  $O_x$ .

Тогда, согласно закону Дарси в сеточном виде:

$$Q_K^0 = \frac{K_K \cdot S_K^0}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L_K}, \quad (1)$$

поток жидкости  $Q_x^0$  в направлении оси  $O_x$  через боковую поверхность  $S_K^0$ , возникающий за счет перепада давления  $\Delta P = P_{N_x} - P_0$  на гранях параллелепипеда, перпендикулярных оси, выражается формулой (1).  $K_x$  – средняя проницаемость в направлении  $O_x$ .

Общий поток жидкости через  $j$ -й срез определяется суммированием всех потоков через элементарные геологические ячейки данного среза:

$$Q_x^{(j)} = \sum_{i,l} q_{i,l}^{(j)},$$

где

$$q_{i,l}^{(j)} = \frac{k_{i,j,l} \cdot h_y \cdot h_x}{\mu} \cdot \frac{\Delta P_j}{h_x},$$

а  $\Delta P_j = P_{j+1} - P_j$  – перепад давления на боковых гранях  $j$ -го среза. С другой стороны, тот же поток можно определить как:

$$Q_x^{(j)} = \frac{K_x^{(j)}}{\mu} \cdot S_x^0 \frac{\Delta P_j}{h_x},$$

где  $K_x^{(j)}$  – средняя проницаемость  $j$ -го среза в направлении оси  $O_x$ . Сравнивая соответствующие значения, получаем:

$$K_x^{(j)} = \frac{h_x \cdot h_z \cdot \sum_{i,l} k_{i,j,l}}{S_x^0} = \frac{\sum_{i,l} k_{i,j,l}}{N_y \cdot N_z}$$

(для регулярной сетки).  $N_y, N_z$  - число геологических ячеек, составляющих фильтрационную ячейку, по оси  $O_y$  и  $O_z$  соответственно. Причем суммируются только проницаемости ячеек, участвующих в фильтрационном процессе.

Используя очевидное тождество  $\Delta P = \sum_j \Delta P_j$  и равенство  $Q_x^{(j)} = Q_x^0$ , получаем рас-

четную формулу для  $K_x$ :

$$K_x = \frac{L_x}{h_x} \cdot \frac{1}{\sum_j (K_x^{(j)})^{-1}} = \frac{N_x}{\sum_j (K_x^{(j)})^{-1}},$$

где  $N_x$  - число блоков по оси  $O_x$ .

Для расчета осредненной проницаемости по другим направлениям выбираются соответствующие трубки тока. Расчет компоненты тензора проницаемости  $K_z$  производится при направлении фильтрации вдоль оси  $O_z$ . В данном случае дополнительно учитывается вертикальная анизотропия.

4. Определение тензора проницаемости по результатам численного моделирования.

Наиболее часто применяемый метод осреднения фильтрационных параметров заключается в численном моделировании потока жидкости в заданном направлении через боковую поверхность блока, состоящего из набора геологических ячеек.

В области  $\Omega$  численно решается стационарная задача (2) с краевыми условиями (3) и находится распределение давления в узлах блочно-центрированной сетки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div}(k(x, y, z)\operatorname{grad}(P + z \cdot g)) = 0 \\ (x, y, z) \in \Omega = [0, L_x] \times [0, L_y] \times [0, L_z] \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P(0, y, z) = P_0, \quad P(L_x, y, z) = P_1, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{y=0} = 0, \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{y=L_y} = 0, \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{z=0} = 0, \frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{z=L_z} = 0. \end{array} \right.$$

Для определения проницаемости в направлении оси  $O_x - K_x$  решается задача (2) с непроницаемыми границами, перпендикулярными осям  $O_y$  и  $O_z$ , а на границах области  $\Omega$  при  $x=0$  и  $x=L_x$  задается перепад давления ( $P_0 - P_1$ ). При известном распределении поля давления определяется фильтрационный поток и для данной фильтрационной ячейки вычисляется модифицированное  $K_x$ . При задании соответствующих краевых условий (3) и численном решении задачи (2)-(3) с новыми изолированными границами и выбранными направлениями перетока определяются остальные компоненты тензора проницаемости фильтрационной ячейки [3-5].

Вывод. В зависимости от качества и точности исходной информации, а также степени детальности создания геологической модели описанные выше подходы осреднения могут быть использованы для построения фильтрационной модели. Применение методов осреднения возможно как в комплексе, так и в отдельности.

The method of filtrational characteristics averaging of hydro-geological cells for computer model of filtrational and migratory processes with use of a method of final differences is submitted in article. The estimation of filtrational-capacitor properties of cells is used. Depending on quality and accuracy of the initial information, and also a degree of detail of creation of geological model the described four ways of an estimation can be used for construction of filtrational model as in a complex, and separately.

1. Борисов Ю.П., Воинов В.В., Рябина З.К. Влияние неоднородности пластов на разработку нефтяных месторождений. М.: Недра, 1970.
2. Борисов Ю.П., Рябинина З.К., Воинов В.В. Особенности проектирования разработки нефтяных месторождений с учетом их неоднородности. М.: Недра, 1976. 285 с.
3. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1980. 536 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
5. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. М.: Наука, 1980. 352 с.

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ НА РЕШЕТЧАТОЙ СТРУКТУРЕ

Орлов В.В.

В системах диагностики и идентификации систем широко используется параметрическое описание стационарных случайных процессов на основе ковариационной матрицы или в виде модели авторегрессии (АР-модель) [1,2]. При этом оптимальные алгоритмы обнаружения и распознавания основаны на измерении и преобразовании ковариационной матрицы, что требует большого числа вычислений.

Для анализа спектральных характеристик процессов в настоящее время широко применяются экономичные методы на решетчатых структурах [3], позволяющие перейти от оценивания  $N \times N$  параметров ковариационной матрицы к использованию  $N$  значений вектора авторегрессии или коэффициентов отражения решетчатой структуры (РС). В тоже время, на базе решетчатых фильтров не решены задачи обнаружения и распознавания процессов, имеющих малый временной интервал стационарности, а также отсутствует анализ их эффективности по вероятностным критериям в случае малого числа выборок. В связи с этим, представляет интерес разработка экономичных подоптимальных алгоритмов принятия решений по множеству выборок на интервале стационарности исследуемого процесса.

В работе проводится разработка и исследование эффективности экономичного по вычислительным затратам алгоритма обнаружения – распознавания на основе анализа параметров случайных процессов.

Для этого предварительно рассматриваются алгоритмы построения для задачи обнаружения нормальных стационарных процессов, а затем исследуются возможности их реализации для распознавания многих классов.

1. Модели входных процессов и параметрические алгоритмы обнаружения.

Пусть входной процесс, представляющий собой аддитивную смесь  $K$  выборок помехи  $X$  и сигнала  $S$ , в случае гипотез об отсутствии  $H_0$  и наличии  $H_1$  полезного сигнала имеет вид

$$H_0 : Y_i = X_i ; H_1 : Y_i = X_i + S_i , i = \overline{1, K} , \tag{1}$$

которые определяются соответственно ковариационными матрицами размера  $N \times N$  помехи  $R_n$ , сигнала  $R_c$  и смеси сигнала с помехой  $R_n + R_c$

$$R_0 = \overline{XX^*T} = R_n ; R_c = \overline{SS^*T} ; R_1 = R_n + R_c . \tag{2}$$

В соответствии с (1) и (2) алгоритм обнаружения сигнала по  $K$  исследуемым выборкам заключается в сравнении с порогом решающей статистики, являющейся мерой различия ковариационных матриц входных процессов [4], оцениваемой  $\hat{R} = \sum_{i=1}^K Y_i Y_i^{*T}$  и априорно задаваемой  $R_0$

$$d_1 = \sum_{i=1}^K Y_i^{*T} R_0^{-1} Y_i = \text{tr} \left\{ \sum_{i=1}^K Y_i Y_i^{*T} R_0^{-1} \right\} = \text{tr} \{ \hat{R} R_0^{-1} \} > c , \tag{3}$$

где  $\text{tr}\{*\}$  – операция определения следа матрицы;  $Y_i$ ,  $i = \overline{1, K}$  – векторы размера  $N$  исследуемых выборок;  $c$  – пороговый уровень обнаружителя.

Плотность распределения вероятностей решающей статистики (3) подчиняется  $\chi^2$  распределению с  $2KN$  степенями свободы, что позволяет легко рассчитать вероятности превышения порога в отсутствие и при наличии сигнала.

Если входной процесс соответствует модели авторегрессии

$$z_i = y_i + \sum_{n=2}^N a_n y_{i-n}, \quad i = \overline{1, K}, \quad (4)$$

где  $z_i$  – отсчеты некоррелированного шума, тогда  $a_n$  – коэффициенты авторегрессии (4) связаны с ковариационной матрицей  $R$  соотношением

$$A = (1, a_2^{(N)}, \dots, a_N^{(N)})^T = R^{-1} E_N / E_N^T R^{-1} E_N; \quad E_N = (0, 0, \dots, 0, 1)^T. \quad (5)$$

В качестве решающей статистики, по аналогии с (3), используется норма разницы векторов авторегрессии

$$d_2 = (\hat{A}_1 - A_0)^* T (\hat{A}_1 - A_0) > c. \quad (6)$$

В отличие от первого алгоритма (3), для (6) требуется оценивать не  $N^2$ , а лишь  $N$  параметров исследуемого процесса, что не только упрощает реализацию, но и должно повысить скорость сходимости алгоритма при ограниченном числе исследуемых выборок.

Если принять оценку параметров авторегрессии как достаточную информацию для принятия решений, то различие параметров известного и наблюдаемого процессов используется для обнаружения, а близость измеренных параметров авторегрессии к одному из классов известных процессов применяется для распознавания классов. Заметим, что процедура оценивания АР-модели  $N$ -ого порядка связана с необходимостью измерения и обращения ковариационной матрицы исследуемого процесса, в связи с чем требуется вычислительных затрат около  $N^3$  операций умножения и сложения.

Дальнейшее уменьшение вычислений достигается при постоянном интервале дискретизации за счет применения решётчатой структуры, коэффициенты отражения  $\rho_n$ , которой однозначно связаны с АР-параметрами рекуррентными соотношениями Левинсона-Дербина [2]

$$\begin{aligned} \rho_1 &= -R(1) / R(0) \sigma_1^2 = (1 - |\rho_1|^2) R(0); \quad a_1^1 = 1; \quad n = \overline{1, N-1}; \quad (7) \\ \rho_n &= -[R^{(n)} + \sum_{i=1}^{n-1} a_i^{(n-1)} R(n-i)] / \sigma_{n-1}^2; \quad a_i^{(n)} = a_i^{(n-1)} + \rho_n a_{n-i}^{*(n-1)}; \quad \sigma_n^2 = (1 - |\rho_n|^2) \sigma_{n-1}^2. \end{aligned}$$

Тогда оценка АР-модели  $N$ -ого порядка (5) трансформируется в оценку коэффициентов  $\rho_1, \dots, \rho_{N-1}$  (7) РС. Существует несколько алгоритмов оценивания в зависимости от априорных сведений о наблюдаемом процессе, стационарности, учета ошибок предсказания и т.п. [2]. Так как обрабатываемые процессы каждой ступени РС порождены одним стационарным процессом, и мощности обоих входов каждого звена РС одинаковы, то

представляется целесообразным применение максимально правдоподобных оценок коэффициента корреляции

$$\hat{\rho}_n = \frac{\sum_{i=1}^K x_{1,i}^{(n)} x_{2,i}^{(n)}}{(\sum_{i=1}^K x_{1,i}^{(n)2} x_{2,i}^{(n)2})^{1/2}}, \quad (8)$$

где  $x_1^{(n)}, x_2^{(n)}$  – обрабатываемые процессы на  $n$ -ой ступени РС.

2. Разработка квазиоптимального алгоритма.

Представляет интерес упрощенный алгоритм принятия решения на каждой ступени РС, а затем логическое объединение этих решений. В соответствии с этим положением, при проверке гипотезы  $H_1$  о наличии процесса с коэффициентами  $\rho_1^1, \dots, \rho_{N-1}^1$  отличными от задаваемых коэффициентов помехи  $\rho_1^0, \dots, \rho_{N-1}^0$  против альтернативы  $H_0$  о его отсутствии определим квазиоптимальный алгоритм обнаружения при пороговых значениях  $c_1, \dots, c_{N-1}$  каждой ступени РС :

- принимается гипотеза об отсутствии сигнала, если оценки коэффициентов отражения ниже пороговых;
- принимается гипотеза о наличии сигнала отличительного от априорно задаваемого, если хотя бы на одной из ступеней имеет место существенное различие измеряемых коэффициентов РС от априорно задаваемых

$$\begin{aligned} H_0 : & \left| \hat{\rho}_n - \rho_n^0 \right| < c_n \text{ для всех } n \leq N-1; \\ H_1 : & \left| \hat{\rho}_n - \rho_n^0 \right| \geq c_n \text{ для любого из } n \leq N-1. \end{aligned} \quad (9)$$

Решающая статистика обнаружителя, реализующего (9), имеет вид

$$d_3 = \sum_{i=1}^{N-1} \text{sign} \left\{ \left| \hat{\rho}_n - \rho_n^0 \right| - c_n \right\} \geq 0, \quad (10)$$

где  $\text{sign}\{u\}$  – единичная функция, отличная от нуля при  $u > 1$ .

Для задачи распознавания принимается решение о наличии  $j$ -ого из  $M$  классов, если минимизируется решающая статистика

$$d_4 = \min_{j \in M} \sum_{i=1}^{N-1} \text{sign} \left\{ \left| \hat{\rho}_i - \rho_i^j \right| - c_i^j \right\}. \quad (11)$$

Структурная схема обнаружителя–распознавателя в соответствии с (10), (11), приведенная на рис.1, реализуется на основе РС, состоящей из  $N$  измерителей коэффициентов корреляции,  $2N$  умножителей и  $2N$  сумматоров. Заметим, что при распознавании  $M$  процессов достаточно иметь одну решетчатую структуру. Операция обнаружения или распознавания дополнительного класса приводит к добавлению лишь  $N$  логических операций сравнения, что не вызывает существенного увеличения вычислительных затрат.

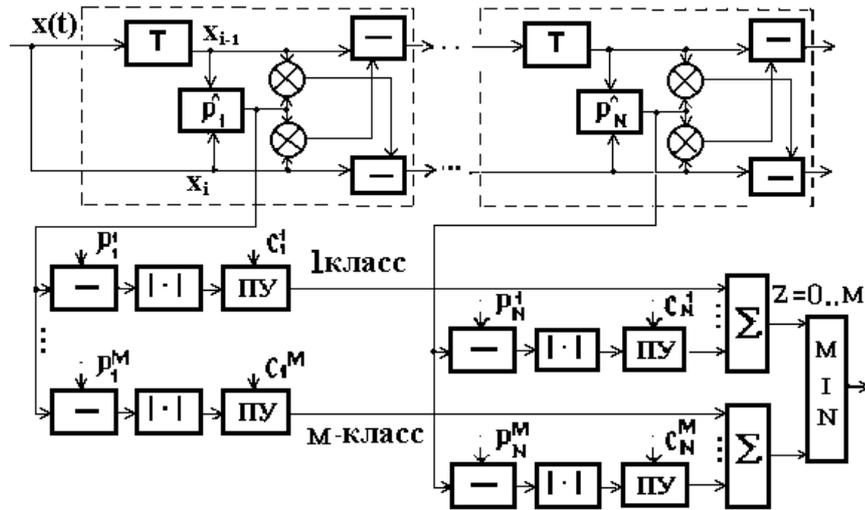


Рис.1 Алгоритм обнаружения-распознавания М классов

3. Анализ эффективности квазиоптимального алгоритма.

Для выявления особенностей оценок коэффициентов отражения рассмотрим результаты статистического моделирования РС. Исследования проводились на примере двух процессов, один из которых представляется “белым” шумом  $\rho_1^0 = -R^0(1)/R^0(0) = 0$ , другой – коррелированным процессом с гауссовой формой спектра и первым коэффициентом корреляции  $\rho_1^1 = -R^1(1)/R^1(0) = r * \exp(jf)$ , где  $r=0,9$ ,  $f = \pi/4$ . Из приведенных значений оценок коэффициентов отражения  $\rho_1, \dots, \rho_{N-1}$  первых трех ступеней (Рис.2а, Рис.2б, Рис.2в), полученных при размере выборки  $K=6$ , видно, что на последующих ступенях происходит сближение кластеров этих процессов, в связи с чем существуют ограничения на выбор РС большого размера. Из анализа Рис.2 следует, что при малом числе выборок, сравнимом с размером РС, использование ступеней  $N > 3$  не всегда целесообразно.

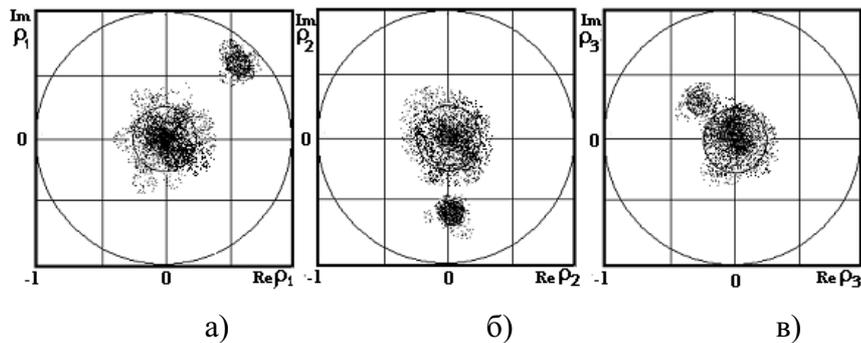


Рис.2 Ансамбли оценок коэффициентов отражения

Для анализа эффективности адаптации алгоритма в условиях конечного числа обучающих выборок рассмотрим его вероятностные характеристики.

Исследовать распределение решающей статистики (9) можно на основе вероятностных характеристик оценок коэффициентов отражения (8) ступеней РС  $\omega(r/H_0)$  и  $\omega(r/H_1)$ , зависящих от интервала наблюдения  $K$ . Для случайных процессов, подчиняющихся нормальному закону распределения, в [4] получена плотность вероятностей максимально правдоподобной выборочной оценки (8) коэффициента корреляции

$$\omega(\hat{\rho}) = \frac{K-1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\Gamma(K)}{\Gamma(K+0,5)} (1-\rho^2)^{K/2} \times \quad (12)$$

$$\times (1-\hat{\rho}^2)^{(K-3)/2} (1-|\rho\hat{\rho}|)^{-K+0,5} \Phi(0,5, 0,5; K+0,5; 0,5+|\rho\hat{\rho}|/2),$$

где  $\Phi(a, b; c; x)$  - гипергеометрическая функция.

Вероятности принятия гипотезы о наличии процесса с заданным коэффициентом отражения  $\rho_n^0$  определяется интегрированием плотности (12) в пределах от  $\rho_n^0 - c_n$  до  $\rho_n^0 + c_n$ . В частном случае, для задачи обнаружения неизвестного коррелированного сигнала на фоне белого шума (Рис.2) априорно задаваемые коэффициенты отражения шума равны нулю, в связи с чем достаточно на каждой ступени РС сравнить с порогом модуль коэффициента корреляции. При этом вероятности ложной тревоги  $F_n$  и правильного обнаружения  $D_n$  каждой  $n$ -ой ступени РС и результирующие  $F$  и  $D$  определяются выражениями:

$$F_n = 1 - \int_{-c_n}^{c_n} \omega(\hat{\rho}_n^0) d\hat{\rho}_n^0 \quad F = 1 - (1 - F_1) \dots (1 - F_{N-1}) \quad (13)$$

$$D_n = 1 - \int_{-c_n}^{c_n} \omega(\hat{\rho}_n^1) d\hat{\rho}_n^1 \quad D = 1 - (1 - D_1) \dots (1 - D_{N-1}) \quad (14)$$

При необходимости обеспечения равных ложных тревог  $F_n = F_1 \ll 1$  на ступенях РС выражения упрощаются

$$F = 1 - (1 - F_1)^{N-1} \approx (N-1)F_1 \quad (15)$$

В случае коррелированной помехи, а также при распознавании процессов, необходимо проводить интегрирование в области  $|\hat{\rho}^j - \rho^j| < c$ . Затем на основе (13-15) определяются ошибки обнаружения и классификации.

Рассмотрим эффективность обнаружения на примере полезного случайного процесса на фоне мешающего процесса с гауссовыми формами спектров и различающимися первыми коэффициентами корреляции, оцениваемых по выборке малого размера, составляющей  $K = 4N = 16$  отсчетов исследуемого интервала. На рисунке 3 изображены результаты расчетов вероятностей ошибок и правильных решений.

На Рис.3а приведены зависимости вероятности ложной тревоги от порогового уровня для различных первых коэффициентов корреляции  $\rho_1^0 = 0..0,65$ . Анализ графиков показал, что при высоких требованиях к вероятности ошибки  $F < 10^{-4}$ , эффективность существенно зависит от корреляционных свойств исследуемого процесса и с уменьшением коррелированности до белого шума вероятность ложной тревоги может возрасти на порядок и более. На Рис.3б представлены зависимости вероятности  $D$  правильного решения для случая  $M = 2$  классов. На входе присутствуют сигналы первого класса в диапазоне первого коэффициента корреляции  $\rho_1^1 = 0,5 .. 0,75$ , а отсутствуют сигналы 2-го класса, представленные слабо коррелированной помехой  $\rho_1^0 = 0,25$ . Как видно, даже для коротких выборок при различии коэффициентов корреляции на 0,35 и более существуют возможности обнаружения.

руживать и распознавать случайные процессы с небольшими интервалами стационарности.

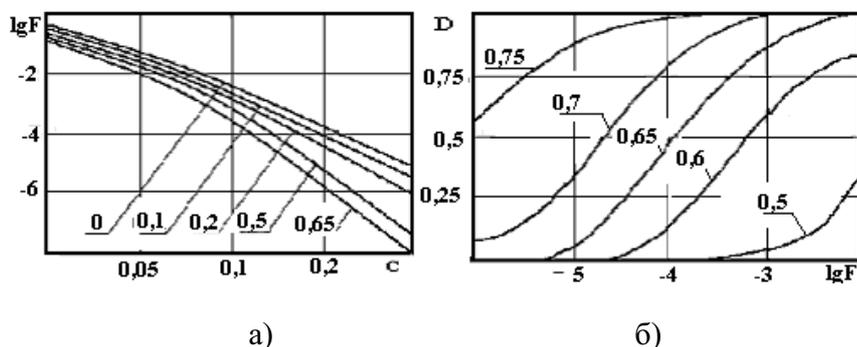


Рис.3 Вероятностные характеристики квазиоптимального алгоритма

### Заключение

Исследованы взаимосвязи параметров моделей стационарных процессов и рассмотрены соответствующие им алгоритмы обнаружения - распознавания.

Разработан простой обнаружитель – распознаватель на основе решетчатой структуры, требующей  $N$  измерителей коэффициентов корреляции,  $N$  умножителей и  $N$  сумматоров. При распознавании  $M$  процессов достаточно иметь одну решетчатую структуру, а для распознавания дополнительного класса достаточно добавление лишь  $N$  логических операций сравнения, что не вызывает существенного увеличения вычислительных затрат.

Анализ адаптации предложенного алгоритма показал возможности обеспечивать приемлемые ошибки обнаружения и распознавания для процессов с малым временем стационарности, когда число выборок не менее чем в 4 раза превышает порядок модели авто-регрессии.

The opportunities of economic realization of deciding statistics for detection and recognition of a stationary signal from the unknown by a covariance matrix are considered. It is shown, that the application of lattice structures allows reducing the quantity of calculations. The influence of the training extracts' number on the effectiveness of the useful signal detection is carried out.

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. –М.: Мир, 1990. –584 с., илл.
2. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. –М.: Физматгиз, 1963. – 500 стр. с илл.
3. Фридландер Б. Решетчатые фильтры для адаптивной обработки данных // ТИИ-ЭР, т.70, № 8, 1982. –С.54–94.
4. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. Пер.с англ. –М.: Мир, 1976. – 756с., илл.

КООРДИНАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДСИСТЕМ В  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ.

Ходаков В.Е., Соколова Н.А.

Координация – это не что иное, как согласование, что становится очевидно если рассмотреть координацию на примере предприятия, как сложной системы. Такие системы в общем виде практически не формализуемы, поэтому к ним применяется метод декомпозиции на более простые системы, который выполняется до тех пор пока будут получены все подсистемы (их структура и взаимосвязь), которые можно формализовать. Тогда координация такой системы будет процессом, при котором согласовываются выходы одних подсистем со входами других. Координацию можно считать достигнутой когда все входы и выходы всех систем согласованы. В качестве сравниваемых выходов и входов в различных системах могут использоваться показатели, характеристики различной физической природы: расходы каких-то компонентов, величины напряжения тока, время, стоимость, объем, количество и др. Однако ни в литературе, ни на практике вопросам координации не уделялось должного внимания, они до сих пор не получили серьезного теоретического обоснования, отсутствуют математические модели координации и результаты их использования [1,2].

Рассмотрим систему типа АСУТП из  $N$  подсистем (участков технологических объектов управления (ТОУ)), описываемых в установившемся режиме следующими уравнениями подсистем [3]:

$$\vec{Y}_i = \vec{f}_i(\vec{V}_i, \vec{U}_i), \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $\vec{f}_i$  – векторный интегро-дифференциальный, в общем случае, оператор (здесь и далее размерность векторов в общем случае зависит от индекса  $i$ );

$\vec{V}_i$  – вектор входных воздействий, приложенных к  $i$ -й подсистеме со стороны других подсистем;

$\vec{U}_i$  – вектор управления  $i$ -й подсистемой;

$\vec{Y}_i$  – вектор выходных переменных  $i$ -й подсистемы, а также системы в целом.

Связи между подсистемами будем считать установившимися:

$$\vec{V}_i = \vec{f}_{i<j>} \{ \vec{Y}_1, \dots, \vec{Y}_N \}, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где  $\vec{f}_{i<j>}$  – вектор-функция; в частности в АСУТП распространены линейные взаимосвязи между подсистемами:

$$\vec{V}_i = \sum_{j=0}^{N-1} C_{ij} \vec{Y}_j, \quad i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Ограничения при управлении технологическим процессом (ТП) имеют вид:

$$\Omega_U : \vec{H}_i(\vec{Y}_i, \vec{U}_i, \vec{V}_i) \leq 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где  $\vec{H}_i$  – вектор-функция.

Если режим ТП регламентирован, то уравнения (1) и (2), можно рассматривать как уравнения для отклонения реального режима  $X = (\vec{Y}, \vec{V}, \vec{U})^T$  от заданного. Поэтому мо-

дель цели управления можно задать лишь целевой функцией  $G(\circ)$  (обычно переменной составляющей затрат на ТП в целом) которая должна минимизироваться:

$$G_1 = (\bar{V}, \bar{U}) = G(\bar{V}, \bar{U}) \rightarrow \inf_{U \in \Omega_u} . \quad (5)$$

Целевая функция обычно является аддитивной функцией затрат в отдельных подсистемах:

$$G = \sum_{i=1}^N G_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i) \rightarrow \inf_{U \in \Omega_u} \quad (6)$$

Таким образом, исходная задача заключается в минимизации целевой функции (6) при связях (1), (2) и ограничениях (4). Метод решения таких задач основан на обобщении метода множителей Лагранжа для ограничений-неравенств и состоит в сведении указанной задачи на условный экстремум к задаче на безусловный, связанной с минимизацией Лагранжа:

$$G_\lambda = \sum_{i=1}^N G_i(\bar{V}, \bar{U}_i) + \sum_{i=1}^N [\lambda_i^T (\bar{Y}_i - \bar{f}_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i)) + \rho_i^T (\bar{V}_i - \bar{f}_{i<j>}(\bar{Y})) + \mu_i^T \bar{H}_i(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i)] \rightarrow \inf \quad (7)$$

Согласно теореме Куна-Такера о седловой точке [3] необходимые (и достаточные, если функции  $G_i$ ,  $\bar{H}_i$  выпуклы) условия оптимальности имеют вид условий стационарности Лагранжа при вариации переменных  $\bar{U}_i, \bar{V}_i, \bar{Y}_i, \bar{\lambda}_i, \bar{\rho}_i, \bar{\mu}_i$ :

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{dG_\lambda}{d\bar{U}_i} \right)^T &= \frac{d}{d\bar{U}_i} [G_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i) - \bar{\lambda}_i^T \bar{f}_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i) + \bar{\mu}_i^T \bar{H}_i(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i)] = 0 \\ \left( \frac{dG_\lambda}{d\bar{V}_i} \right)^T &= \frac{d}{d\bar{V}_i} [G_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i) - \bar{\lambda}_i^T \bar{f}_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i) + \bar{\rho}_i^T \bar{V}_i + \bar{\mu}_i^T \bar{H}_i(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i)] = 0 \\ \left( \frac{dG_\lambda}{d\bar{Y}_i} \right)^T &= \frac{d}{d\bar{Y}_i} [\bar{\lambda}_i^T \bar{Y}_i - \sum_{j=1}^N \bar{\rho}_j^T \bar{f}_{i<j>}(\bar{Y}) + \bar{\mu}_i^T \bar{H}_i(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i)] = 0 \\ \left( \frac{dG_\lambda}{d\bar{\lambda}_i} \right)^T &= \bar{Y}_i - \bar{f}_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i) = 0 \\ \left( \frac{dG_\lambda}{d\bar{\rho}_i} \right)^T &= \bar{V}_i - \bar{f}_{i<j>}(\bar{Y}_1, \dots, \bar{Y}_N) = 0 \\ \left( \frac{dG_\lambda}{d\bar{\mu}_i} \right)^T &= \bar{H}_i(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i) \leq 0 \\ \bar{U}_i &\geq 0 \\ \bar{V}_i &\geq 0 \\ \bar{Y}_i &\geq 0 \\ \bar{\mu}_i &\geq 0 \\ \bar{\mu}_i^T \bar{H}_i(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i) &= 0 \end{aligned} \right\} i = \overline{1, N} \quad (8)$$

Условия (8) должны выполняться в точке оптимума  $\bar{U}^*, \bar{\lambda}^*, \bar{\rho}^*, \bar{\mu}^*$ , при этом множители Лагранжа  $\bar{\lambda}^*, \bar{\rho}^*, \bar{\mu}^*$  можно рассматривать как некоторые оптимальные «цены», устанавливаемые в процессе взаимодействия переменных как внутри подсистемы («цены»  $\{\bar{\lambda}_i\}$ ), так и между подсистемами («цены»  $\{\bar{\mu}_i\}$ ). Ввиду высокой размерности системы уравнений-неравенств (8) ее решение в практических случаях сложно. Если же «цены» заранее заданы – известны, то задача может быть решена путем независимого решения каждой  $i$ -й подзадачи, т.е. независимой оптимизации каждой  $i$ -й подсистемы. Поскольку размерность каждой  $i$ -й подзадачи существенно меньше размерности исходной задачи (системы в целом), то решение отдельных подзадач существенно проще. Используется два метода реализации такого подхода:

- метод предсказания взаимодействий;
- метод баланса взаимодействий.

Метод предсказания взаимодействий основан на том, что связи между подсистемами мысленно разрываются, рассматриваются отдельные подсистемы, точнее – их модели, определяемые уравнениями (1). Однако возможно, что оптимизируя каждую подзадачу в отдельности можно получить такие значения выходных переменных  $\{\bar{Y}_i\}$ , которые не удовлетворяют уравнениям взаимодействий подсистем (2). Для устранения этого применяется координация путем изменения величин  $\{\bar{\rho}_i\}$ , что и делается следующим образом.

Рассматривая лагранжиан (7) исходной задачи при условии, что выходные переменные  $\{\bar{Y}_i\}$  можно варьировать, сформулируем задачу оптимизации  $i$ -й подсистемы ( $i = 1, \dots, N$ ) в виде:

Минимизировать при заданных  $\bar{Y}_1, \dots, \bar{Y}_N$  подцелевую функцию

$$G_{iY}(\bar{V}_i, \bar{U}_i, \bar{\lambda}_i, \bar{\rho}_i, \bar{\mu}_i) = G_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i) + \lambda_i^T(\bar{Y}_i - \bar{f}_i(\bar{V}_i, \bar{U}_i)) + \rho_i^T(\bar{V}_i - \bar{f}_{i<j>}(\bar{Y}_1, \dots, \bar{Y}_N)) + \mu_i^T \bar{H}_i(\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i) \rightarrow \inf \quad (9)$$

Для решения этой задачи используются уравнения (8), кроме уравнения  $\left(\frac{dG_\lambda}{d\bar{Y}_i}\right)^T$ , которое должно выполняться в точке оптимума. Поскольку решения  $\bar{U}_i, \bar{\lambda}_i, \bar{\rho}_i, \bar{\mu}_i$  подзадач (9) зависят от переменных  $\{\bar{Y}\}$ , то уравнение  $\left(\frac{dG_\lambda}{d\bar{Y}_i}\right)^T$  исходной задачи при заданных  $\{\bar{Y}\}$  может не выполняться. Поэтому «предложения»  $\{\bar{Y}\}$  следует изменять до тех пор, пока уравнение  $\left(\frac{dG_\lambda}{d\bar{Y}_i}\right)^T$  станет удовлетворяться. Задача координации подсистем формулируется следующим образом:

При заданных (определенных из  $N$  подзадач) (9) значениях  $\bar{U}_i(\bar{Y}), \bar{\lambda}_i(\bar{Y}), \bar{\rho}_i(\bar{Y}), \bar{\mu}_i(\bar{Y})$  найти такие  $\bar{Y}_1, \dots, \bar{Y}_N$ , чтобы удовлетворялось уравнение  $\left(\frac{dG_\lambda}{d\bar{Y}_i}\right)^T$ .

Решение является итеративным:

- 1) замеряются начальные значения выходов системы  $\{\bar{Y}_i[0]\}$ .

2) решают системы уравнений (8) (за исключением уравнений  $\left(\frac{dG_{\lambda}}{d\bar{Y}_i}\right)^T$  т.к. оно должно выполняться в точке оптимума), из них определяют  $\bar{U}_i(0), \bar{\lambda}_i(0), \bar{\rho}_i(0), \bar{\mu}_i(0)$ .

3) вычисляются невязки:

$$\begin{aligned} \bar{E}_i[t] = & \bar{\lambda}_i[t] - \sum_{j=1}^N \frac{d}{d\bar{Y}_i} [\bar{f}_{j<i>}(\bar{Y}_i[t]) \cdot \bar{\rho}_j[t]] + \\ & + \frac{d}{d\bar{Y}_i} [\bar{H}_i(\bar{U}_i, \bar{Y}_i, \bar{V}_i) \cdot \bar{\mu}_i[t]], \quad i = \overline{1, N} \end{aligned} \quad (10)$$

если значение  $\bar{E}_i^T \bar{\gamma}_i < \varepsilon$  (где  $\varepsilon$  – погрешность) равно нулю, то решение задачи прекращается (координация достигнута). Если же значение отлично от нуля, значение  $\bar{Y}_i[t]$  корректируется и процесс повторяется.

Если при  $t \geq 2$  система не имеет решения или  $\bar{E}_i[t]$  меняет знак то  $\gamma = \gamma/2$ , производится возврат на 1 шаг и пересчитывается  $\bar{Y}_i[t]$ .

Процесс коррекции является итеративным:

$$\bar{Y}_i[t+1] = \bar{Y}_i[t] - \gamma \cdot \bar{E}_i[t] \quad (11)$$

где  $\gamma$ -скаляр, от которого зависит сходимость процесса координации, т.е. выполнение условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i[t] = \rho_i^* \quad (12)$$

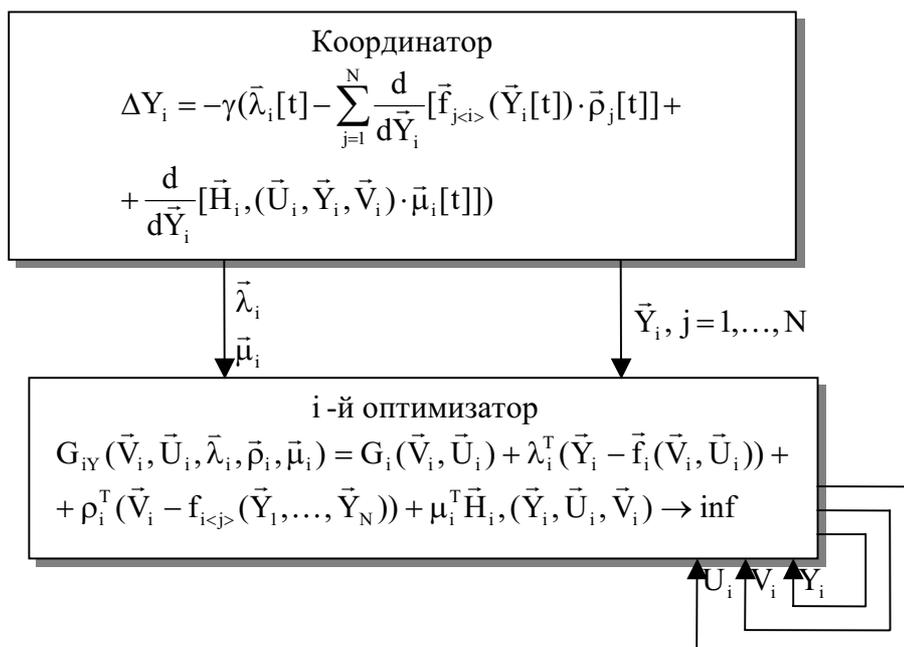


Рис. 1 Схема двухуровневой координации

Схема двухуровневой координации, реализующей указанные алгоритмы, показана на рис.1: на первом уровне решается задача (8), а найденные «цены»  $\bar{\lambda}_i, \bar{\rho}_i, \bar{\mu}_i$  посылаются на второй уровень, который координирует «предложения»  $\bar{Y}_1, \dots, \bar{Y}_N$  для первого уровня.

Покажем на не сложном примере применение координации. Пусть предприятие, выпускающее продукцию. Предприятие закупает сырье, но может не покупать сырье и не производить продукцию а покупать готовую. Рассмотрим задачу принятия решения производить или покупать какие-то изделия, определенные комплектующие для достижения минимальных затрат (рис 2.).

В соответствии с изложенным ранее подходом для описания таких систем достаточно три вектора  $\bar{Y}_i, \bar{U}_i, \bar{V}_i$  с соответствующими отношениями между ними. Перечислим эти вектора:

- для подсистемы 1 из рис 2. (снабжение):

$$\bar{Y}_1 = \{Y_{11}\}; \bar{V}_1 = \{\}; \bar{U}_1 = \{U_{11}\}.$$

- для подсистемы 2 (производство):

$$\bar{Y}_2 = \{\}; \bar{V}_2 = \{V_{21}\}; \bar{U}_2 = \{\}.$$

Переменные  $V_{C11}, V_{C12}, V_{C13}, V_{C21}, V_{C22}$  являются константами.

Рассмотрим элементы вектора.



Рис. 2 Пример систем.

Первая подсистема:

$U_{11}$  – выходное управляющее воздействие – количество изделий которое предприятие должно произвести, а не покупать;  $V_{C11}$  – цена заготовки из которой производится изделие;  $V_{C12}$  – цена покупного изделия;  $V_{C13}$  – количество заказанных изделий;  $Y_{11}$  – количество производимых изделий;  $V_{21}$  – количество изделий, производимых производством;  $V_{C21}$  – постоянные затраты при производстве;  $V_{C22}$  – затраты на одно изделие.

Опишем структуру системы (рис. 2) следующим образом:

1) Каждая из приведенных подсистем описывается уравнениями вида:

$$\bar{Y}_i = \bar{f}_i\{\bar{V}_i, \bar{U}_i\}, \quad i = 1, \dots, N$$

Количество изделий (под которое снабжение закупает узлы и комплектующие)  $Y_{11}$  должно быть равно управляющему воздействию  $U_{11}$ , определяющему количество изделий, которое предприятие должно произвести:

$$Y_{11} = U_{11}.$$

2) Связи между подсистемами описываются уравнениями вида:

$$\vec{V}_i = \vec{f}_{i<j>}(\vec{Y}_1, \dots, \vec{Y}_N), \quad i, j = 1, \dots, N$$

Количество – т.е. собственное производство  $V_{21}$  должно быть равно количеству изделий, под которое снабжение закупает узлы и комплектующие  $Y_{11}$  :

$$V_{21} = Y_{11}.$$

3) Накладываемые ограничения описываются неравенствами:

$$\Omega_U : \vec{H}_i(\vec{Y}_i, \vec{U}_i, \vec{V}_i) \leq 0 \quad i = 1, \dots, N$$

Величины  $U_{11}, Y_{11}, V_{21}$  – числа не отрицательные:

$$U_{11} \leq 0; \quad Y_{11} \leq 0; \quad V_{21} \leq 0.$$

Управляющее воздействие  $U_{11}$  не может быть больше количества заказанных изделий  $V_{C13}$  :

$$U_{11} - V_{C13} \leq 0.$$

4) Целевая функция  $G(\circ)$  имеет следующий вид:

$$G = \sum_{i=1}^N G(\vec{V}_i, \vec{U}_i) \rightarrow \inf_{U \in \Omega_U}.$$

Стоимость затрат определяется как сумма затрат на покупку заготовок для производства и затрат на покупку готовых изделий:

$$G_1 = U_{11} \cdot V_{C11} + (V_{C13} - U_{11}) \cdot V_{C12}.$$

Стоимость затрат для производства равна сумме затрат на производство и затрат на каждое изделие:

$$G_2 = V_{C21} + V_{21} \cdot V_{C22}.$$

Метод решения таких задач основан на обобщении метода множителей Лагранжа для ограничений-неравенств и состоит в сведении указанной задачи на условный экстремум к задаче на безусловный, связанной с минимизацией Лагранжа:

$$G_\lambda = \sum_{i=1}^N G_i(\vec{V}_i, \vec{U}_i) + \sum_{i=1}^N [\lambda_i^T (\vec{Y}_i - \vec{f}_i(\vec{V}_i, \vec{U}_i)) + \rho_i^T (\vec{V}_i - \vec{f}_{i<j>}(\vec{Y})) + \mu_i^T H_i(\vec{Y}_i, \vec{U}_i, \vec{V}_i)] \rightarrow \inf.$$

В соответствии с излагаемым методом решения составим уравнения систем в общей форме: приведем полученную систему для  $i = 1$  (система снабжения):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\vec{U}_{11}} \right)^T = V_{C11} - V_{C12} - \lambda_{11} - \mu_{11} + \mu_{13} = 0 \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\vec{V}_1} \right)^T = \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\vec{Y}_{11}} \right)^T = \lambda_{11} - \rho_{21} - \mu_{12} = 0 \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\lambda_{11}} \right)^T = Y_{11} - U_{11} = 0 \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\rho_1} \right)^T = \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\mu_{11}} \right)^T = -U_{11} \leq 0 \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\mu_{12}} \right)^T = -Y_{11} \leq 0 \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\mu_{13}} \right)^T = U_{11} - V_{C13} \leq 0 \\
 \mu_{11} \geq 0 \\
 \mu_{12} \geq 0 \\
 \mu_{13} \geq 0 \\
 -\mu_{11} \cdot U_{11} - \mu_{12} \cdot Y_{11} + \mu_{13} (U_{11} - V_{C13}) = 0
 \end{array} \right.$$

Для  $i = 2$  (подсистема производства):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\vec{U}_2} \right)^T = \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\vec{V}_{21}} \right)^T = V_{C22} + \rho_{21} - \mu_{21} = 0 \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\vec{Y}_2} \right)^T = \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\lambda_2} \right)^T = \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\rho_{21}} \right)^T = V_{21} - Y_{11} = 0 \\
 \left( \frac{dG_\lambda}{d\mu_{21}} \right)^T = -V_{21} \leq 0 \\
 \mu_{21} \geq 0 \\
 -\mu_{21} \cdot V_{21} = 0
 \end{array} \right.$$

Пример 1. Пусть стоимость заготовки для изготовления изделия равна 1 у.е. ( $V_{C11} = 1$ ), стоимость покупного изделия – 4 у.е. ( $V_{C12} = 4$ ), количество выпускаемых изделий 10 шт. ( $V_{C13} = 10$ ), постоянные затраты при производстве – 1 у.е. ( $V_{C21} = 1$ ), затраты на одно изделие – 2 у.е. ( $V_{C22} = 2$ ), скаляр от которого зависит сходимость процесса координации 1 ( $\gamma = 1$ ), допустимая погрешность 0.3 ( $\varepsilon = 0.3$ ).

В соответствии с предложенным алгоритмом координации элементарных подсистем, для метода баланса взаимодействий, получим:

Итерация 1:

1.1)  $Y_{11} = 0$

1.2)  $i = 1$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{C11} - V_{C12} - \lambda_{11} - \mu_{11} + \mu_{13} = 0 \\ \lambda_{11} - \rho_{21} - \mu_{12} = 0 \\ Y_{11} - U_{11} = 0 \\ -U_{11} \leq 0 \\ -Y_{11} \leq 0 \\ U_{11} - V_{C13} \leq 0 \\ \mu_{11} \geq 0 \\ \mu_{12} \geq 0 \\ \mu_{13} \geq 0 \\ -\mu_{11} \cdot U_{11} - \mu_{12} \cdot Y_{11} + \mu_{13}(U_{11} - V_{C13}) = 0 \end{array} \right.$$

Тогда  $U_{11} = 0$ ;  $\mu_{11} = 0$ ;  $\mu_{12} = 0$ ;  $\mu_{13} = 0$ ;  $\lambda_{11} = -3$ ;

$i = 2$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{C22} + \rho_{21} - \mu_{21} = 0 \\ V_{21} - Y_{11} = 0 \\ -V_{21} \leq 0 \\ \mu_{21} \geq 0 \\ -\mu_{21} \cdot V_{21} = 0 \end{array} \right.$$

Тогда  $V_{21} = 0$ ;  $\mu_{21} = 0$ ;  $\rho_{21} = -2$ .

1.3)  $E_{11}[0] = \lambda_{11}[0] - \rho_{21}[0] - \mu_{12}[0] = -1$

$Y_{11}[1] = Y_{11}[0] - \gamma \cdot E_{11}[0] = 1.$

Итерация 2:

2.1)  $Y_{11} = Y_{11}[1]$

2.2)  $i = 1$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{C11} - V_{C12} - \lambda_{11} - \mu_{11} + \mu_{13} = 0 \\ \lambda_{11} - \rho_{21} - \mu_{12} = 0 \\ Y_{11} - U_{11} = 0 \\ -U_{11} \leq 0 \\ -Y_{11} \leq 0 \\ U_{11} - V_{C13} \leq 0 \\ \mu_{11} \geq 0 \\ \mu_{12} \geq 0 \\ \mu_{13} \geq 0 \\ -\mu_{11} \cdot U_{11} - \mu_{12} \cdot Y_{11} + \mu_{13}(U_{11} - V_{C13}) = 0 \end{array} \right.$$

Тогда  $U_{11} = 0$ ;  $\mu_{11} = 0$ ;  $\mu_{12} = 0$ ;  $\mu_{13} = 0$ ;  $\lambda_{11} = -3$ ;

$$i = 2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{C22} + \rho_{21} - \mu_{21} = 0 \\ V_{21} - Y_{11} = 0 \\ -V_{21} \leq 0 \\ \mu_{21} \geq 0 \\ -\mu_{21} \cdot V_{21} = 0 \end{array} \right.$$

Тогда  $V_{21} = 0$ ;  $\mu_{21} = 0$ ;  $\rho_{21} = -2$ .

$$2.3) E_{11}[1] = \lambda_{11}[1] - \rho_{21}[1] - \mu_{12}[1] = -1$$

$$Y_{11}[2] = Y_{11}[1] - \gamma \cdot E_{11}[1] = 2.$$

...

Итерация 11:

$$11.1) Y_{11} = Y_{11}[10]$$

$$11.2) i = 1 \text{ результат } U_{11} = 0; \mu_{11} = 0; \mu_{12} = 0; \mu_{13} = 0; \lambda_{11} = -3;$$

$$i = 2 \text{ результат } V_{21} = 0; \mu_{21} = 0; \rho_{21} = -2.$$

$$11.3) E_{11}[10] = \lambda_{11}[10] - \rho_{21}[10] - \mu_{12}[10] = -1$$

$$Y_{11}[11] = Y_{11}[10] - \gamma \cdot E_{11}[10] = 11.$$

Итерация 12:

$$12.1) Y_{11} = Y_{11}[11]$$

12.2)  $i = 1$  нет решений;

$$12.3) \gamma = \gamma/2 = 0.5;$$

$$Y_{11}[12] = Y_{11}[10] - \gamma \cdot E_{11}[10] = 10.5.$$

т.к.  $E_{11}\gamma > \varepsilon$ , то переходим к следующей итерации.

Итерация 13:

12.1)  $Y_{11} = Y_{11}[12]$

12.2)  $i = 1$  нет решений;

12.3)  $\gamma = \gamma/2 = 0.25$  ;

$Y_{11}[13] = Y_{11}[10] - \gamma \cdot E_{11}[10] = 10.25$  .

т.к.  $E_{11}\gamma < \varepsilon$  , прекращаем решение – координация достигнута.

Пример 2. Те же данные, за исключением  $V_{c12} = 2$  .

Итерация 1:

1.1)  $Y_{11} = 0$

1.2)  $i = 1$  результат  $U_{11} = 0$ ;  $\mu_{11} = 0$ ;  $\mu_{12} = 0$ ;  $\mu_{13} = 0$ ;  $\lambda_{11} = -1$

$i = 2$  результат  $V_{21} = 0$ ;  $\mu_{21} = 0$ ;  $\rho_{21} = -2$

1.3)  $E_{11}[0] = \lambda_{11}[0] - \rho_{21}[0] - \mu_{12}[0] = 1$

$Y_{11}[1] = Y_{11}[10] - \gamma \cdot E_{11}[10] = -1$  .

Итерация 2:

2.1)  $Y_{11} = Y_{11}[1]$

2.2)  $i = 1$  нет решений;

2.3)  $\gamma = \gamma/2 = 0.5$  ;

$Y_{11}[2] = Y_{11}[0] - \gamma \cdot E_{11}[0] = -0.5$  .

т.к.  $E_{11}\gamma > \varepsilon$  , то переходим к следующей итерации.

Итерация 3:

3.1)  $Y_{11} = Y_{11}[2]$

3.2)  $i = 1$  нет решений;

3.3)  $\gamma = \gamma/2 = 0.25$  ;

$Y_{11}[3] = Y_{11}[0] - \gamma \cdot E_{11}[0] = -0.25$  .

Т.к.  $E_{11}\gamma < \varepsilon$  , останавливаем итерационный процесс – координация достигнута за более короткий отрезок времени (3 итерации, в первом примере 13).

Изложенные математическая модель и алгоритм координации подсистем в автоматизированных системах управления могут быть использованы при решении задач оптимизации в сложных системах различных классов.

The model of coordination of a two-level control system is described. The bottom level - a level of subsystems. The top level coordinates work of subsystems of the bottom level. The task of the coordination of levels of management is put and solved.

1. Власов С.А., Волчек Н.Г., Горгидзе Н.И. Современные компьютерные средства для согласования управления технологическими и организационными процессами в производственных системах. // Управление большими системами. Материалы международной научно-практической конференции – М.: СИНТЕГ, 1997, С. 68.

2. Живило М.Ю. Система согласованного управления производством в рыночной экономике. // Управление большими системами. Материалы международной научно-практической конференции – М.: СИНТЕГ, 1997, С. 80.

3. Егоров С.В., Мирахмедов Д.А. Моделирование и оптимизация в АСУТП. Ташкент: Мехнат – 1987. – 200 с.

УДК 677.054

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАВИВАННЯ ОСНОВНИХ НИТОК

Крупіца П.О.

### Вступ

Основним процесом для отримання високоякісної основи є процес шліхтування. Сутність цього процесу заключається в тому, що основну нитку пропитують спеціальним розчином – шліхтою, для утримання склеєних волокон та створення захисної плівки на поверхні пряжи [1]. Під час шліхтування необхідно контролювати та регулювати цілий ряд технологічних параметрів: натяг, витяжку, швидкість руху основи і вала навою, щільність намотування на ткацькому навої, вологість ошліхтованих ниток, рівень та в'язкість шліхти, температуру у кориті і в сушильній машині и т.п. [1, 2].

Задачею дослідження було експериментальне встановлення характеру зміни кутової швидкості навою, ваги наматуємих ниток, щільності намотки, моменту інерції ткацького навою від величини радіусу паковки навою та часу. В якості об'єкту дослідження використовувалася шліхтувальна машина ШБ 11/140 Херсонського ХБК, а у якості основи використовувалися нитки під тканини бязь артикул 123, миткаль артикул 20 та батист артикул 1402.

### Аналіз існуючих рішень

В даний час дані проблеми висвітлені не повністю.

Аналітичну залежність радіусу паковки навою  $R(t)$  визначали, виходячи з міркування, що площа поперечного перетину навитого матеріалу  $S$  дорівнює різниці площ поперечного перетину усього навою  $S_n$  та його ствола  $S_c$

$$S = S_n - S_c = K_n h V t_n = \pi R(t)^2 - \pi R_o^2, \quad (1)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт ущільнення;  $h$  – товщина слою матеріалу, м;  $V$  – лінійна швидкість навивання, м/с;  $t_n$  – час навивання, с;  $R_o$  – радіус ствола навою, м.

Звідси радіус паковки навою

$$R(t) = R_o \cdot \sqrt{1 + \frac{K_n h V t_n}{\pi R_o^2}}. \quad (2)$$

На рис. 1 приведені графіки експериментальних та теоретичних залежностей радіусу паковки навою  $R(t)$  від часу навивання  $t_n$ . Визначення радіусу паковки навою за кожні п'ять хвилин здійснювалось за допомогою давача радіусу.

Як видно, залежність радіусу паковки навою від часу має не лінійний характер. Крім цього, графіки експериментальних даних практично співпадають з теоретичними і тому вираз (2) будемо брати як базовий.

Теоретично величину кутової швидкості  $\omega$  визначали через радіус паковки навою  $R(t)$  за формулою:

$$\omega = \frac{V}{R(t)} = \frac{V}{R_o \cdot \sqrt{1 + \frac{K_n h V t_n}{\pi R_o^2}}}. \quad (3)$$

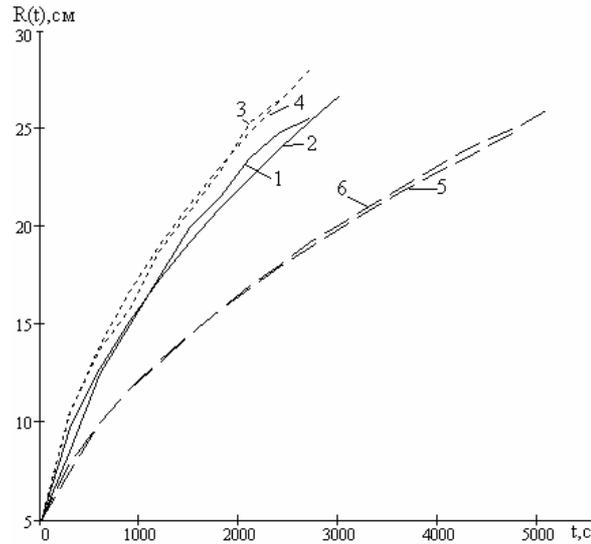


Рис. 1 Графік експериментальних (1,3,5) та розрахункових (2,4,6) значень  $R(t)$  від  $t$  для: бязь артикул 123; миткаль артикул 20; батист артикул 1402

Експериментально швидкість  $\omega$  вала ткацького навою визначали за формулою:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{t}, \quad (4)$$

де  $n$  – число обертів ткацького навою за визначений інтервал часу, об;  $t$  – час, с.

Визначення кількості обертів ткацького навою за кожні п'ять хвилин здійснювали за допомогою електромеханічного лічильника, що встановлений на машині. На рис. 2 приведені графіки експериментальних та розрахункових значень кутової швидкості  $\omega$  від радіусу навивання  $R(t)$  для різних основ. Як видно, експериментальні дані майже не відрізняються від розрахункових, і тому для подальших розрахунків вираз (3) приймаємо за основу.

Вагу ниток  $G$ , що навиті на ткацькому навою визначали за формулою:

$$G = q \cdot L = q \cdot 2\pi \cdot n \cdot R(t), \quad (5)$$

де  $q$  – питома вага одного метру основи, кг/м;  $L$  – довжина ниток, що намотані на ткацькому навою, м.

Графік зміни усереднених параметрів  $G$  для різних підтканин від радіусу навивання  $R(t)$  приведений на рис. 3.

Для розрахунку щільності намотки  $\gamma$  використовуємо формулу:

$$\gamma = \frac{G}{\pi \cdot (R(t)^2 - R_0^2) \cdot H}, \quad (8)$$

де  $R(t)$  – зовнішній радіус намотки, м;  $H$  – довжина ствола ткацького навою, м.

На рис. 4 приведені усереднені значення  $\gamma$  від радіусу навивання  $R(t)$  для різних основ.

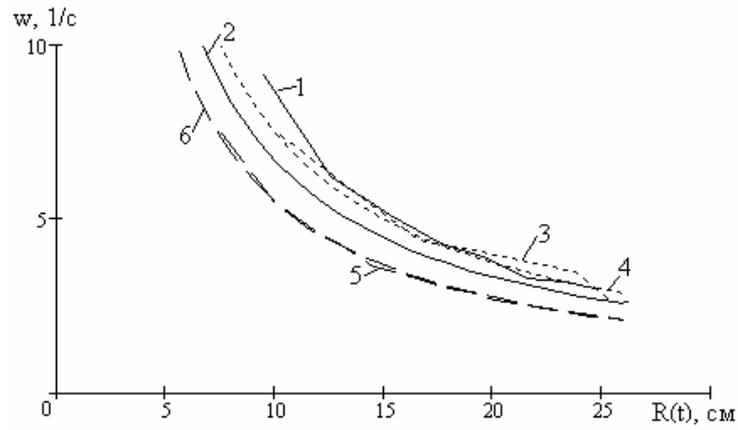


Рис. 2 Графік експериментальних (1,3,5) та розрахункових (2,4,6) значень  $\omega$  від  $R(t)$  для: бязь артикул 123; миткаль артикул 20; батист артикул 1402

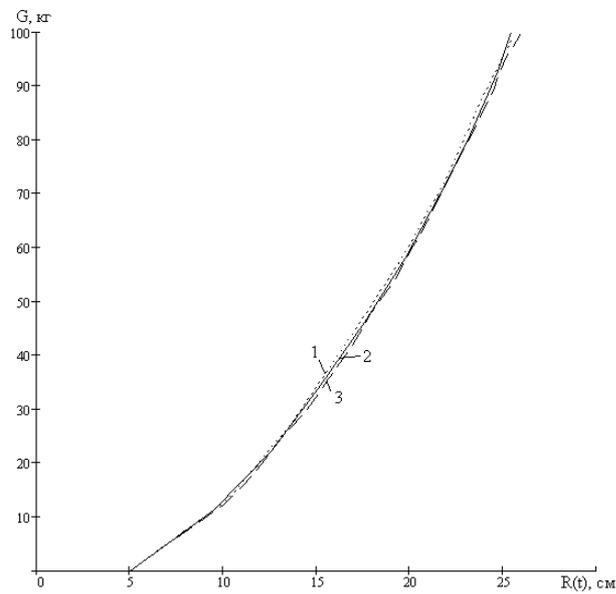


Рис. 3 Графік зміни усереднених значень  $G$  від  $R(t)$  для:

1 – бязь артикул 123, 2 - миткаль артикул 20, 3 – батист артикул 1402

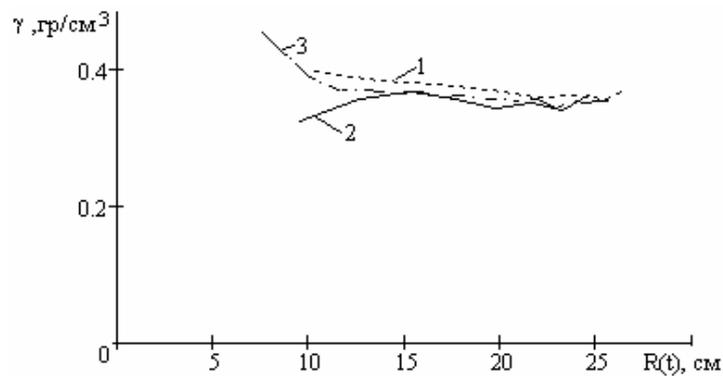


Рис. 4 Графік зміни усереднених значень  $\gamma$  від  $R(t)$  для:

1 – бязь артикул 123, 2 - миткаль артикул 20, 3 – батист артикул 1402

Для визначення якісних показників механізму навою необхідно знати момент інерції ткацького навою, який відіграє основну роль в розрахунку перехідних процесів. Визначали момент інерції ткацького навою  $J_H$  за виразом:

$$J_H = \frac{\pi \cdot H \cdot \gamma}{2} (R(t)^4 - R_0^4), \quad (9)$$

Графік залежності такого моменту інерції приведений на рис. 5

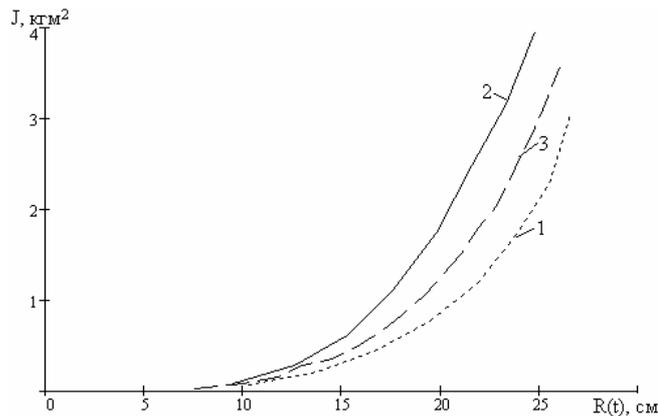


Рис. 5 Графік зміни усереднених значень  $\gamma$  від  $R(t)$  для:

1 – бязь артикул 123, 2 - миткаль артикул 20, 3 – батист артикул 1402

**Висновки:**

Експериментальні та теоретичні дослідження співпадають і тому всі теоретичні залежності можна прийняти за основу для подальших розрахунків.

In clause the results of experimental and theoretical researches of process reel up of the basic strings in rising to the machine are given.

1. Потягалов А.Ф. Шлихтование основ. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 365 с.

2. Живетин В.В., Брут-Бруляко А.Б. Устройство и обслуживание шлихтовальных машин: Учебник для проф. Обучения рабочих на пр-ве. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Легпромбытиздат, 1988. – 240 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ТКАНИ  
НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рожков С.А., Куцак Р.С., Бражник Д.А.

**Постановка задачи.** Объектом исследования является текстильное производство, в частности его конечный продукт – ткань. Необходимость глубокого анализа методов построения математического описания ткани, как объекта контроля, определяет высокий интерес, проявляемый в настоящее время к вопросам повышения эффективности (качества) текстильных производств за счет снижения доли выпуска недоброкачественной продукции. Такое решение возможно только при автоматизации процесса контроля качества готовой продукции (ткани).

Данная работа является продолжением исследований математической модели ткани, описывающей взаимодействие уточных и основных нитей, как взаимодействие пространственных волн, обобщенной до ряда Фурье [1, 2, 4].

**Содержание исследования.** При оценке качества продукции в текстильной промышленности используют сложную систему баллов и физических показателей [3]. Многостадийные, сложные технологические переходы, вариативность показателей продукции (смена ассортимента, сортности и т.п.) приводят к тому, что на качество продукции существенное влияние оказывает несколько факторов: качество сырья; климатические условия; нарушение технологического процесса или его неправильный выбор; отклонения, вызванные разрегулированностью или потерей настроек оборудования.

Состояние ткани описывается состоянием элементов ее структуры [1]. При анализе качества ткани особое место занимает определение ее плотности. Для решения этой задачи предложен метод, в котором устраняются погрешности, вызываемые перекосом.

Учитывая, что по условиям технологического процесса отклонение от вертикали основной нити не имеет смысла, рассмотрим модель при нарушении ортогональности только за счет перекоса утка [4].

В этом случае:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & 0 \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{1}$$

И  $\beta_{12} = x_1/y = \text{tg}\gamma = 0$  тангенс угла поворота основы равен нулю.

На рис. 1 приведена иллюстрация описания деформации ткани при учете только перекоса уточных нитей.

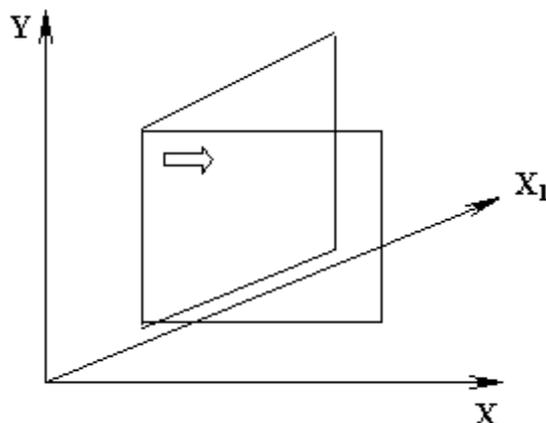


Рис. 1 Преобразование координат при перекосе уточных нитей ткани

В таком случае получаем связь между новыми и старыми координатами в виде

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{\beta_{11}\beta_{22}} \begin{pmatrix} \beta_{22} & 0 \\ -\beta_{21} & \beta_{11} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Естественно, упрощаются соотношения связи:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1}{\beta_{11}} \\ y &= \frac{-\beta_{21}x_1}{\beta_{11}\beta_{22}} + \frac{y_1}{\beta_{22}} \end{aligned} \quad (3)$$

Якобиан перехода в этом случае определяется выражением:

$$J = \frac{1}{|B|} = \frac{1}{\beta_{11}\beta_{22}}. \quad (4)$$

В этом случае

$$\begin{aligned} L_{x1} &= \beta_{11}L_x, & L_{x2} &= \infty, & L_{y2} &= \frac{|B|L_y}{\beta_{21}}, & L_{y1} &= \beta_{22}L_y. \\ n_{11} &= \frac{n\pi}{\beta_{11}L_x}, & n_{12} &= 0, & m_{22} &= \frac{m\pi}{\beta_{22}L_y}, & m_{21} &= \frac{m\pi\beta_{21}}{\beta_{11}\beta_{22}L_y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Однако существенного упрощения получить не удастся, так как возмущения по структуре полотна ткани сохраняются:

$$\begin{aligned} a'_{m,n} &= \frac{1}{|B|L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \cos(n_{11}x_1) \cos(-m_{21}x_1 + m_{22}y_1) dx_1 dy_1; \\ b'_{m,n} &= \frac{1}{|B|L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \sin(n_{11}x_1) \cos(-m_{21}x_1 + m_{22}y_1) dx_1 dy_1; \\ c'_{m,n} &= \frac{1}{|B|L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \cos(n_{11}x_1) \sin(-m_{21}x_1 + m_{22}y_1) dx_1 dy_1; \\ d'_{m,n} &= \frac{1}{|B|L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \sin(n_{11}x_1) \sin(-m_{21}x_1 + m_{22}y_1) dx_1 dy_1. \end{aligned} \quad (6)$$

В развернутой форме видно, что сохраняются связи, возникающие из-за потери ортогональности:

$$\begin{aligned}
 a'_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) [\cos(n_{11} - m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1 - \sin(n_{11} - m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1 + \\
 &\quad + \cos(n_{11} + m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1 - \sin(n_{11} + m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1] dx_1 dy_1 \\
 b'_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) [\sin(n_{11} - m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1 + \cos(n_{11} - m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1 + \\
 &\quad + \cos(n_{11} + m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1 - \sin(n_{11} + m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1] dx_1 dy_1 \\
 c'_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) [\sin(n_{11} - m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1 - \cos(n_{11} - m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1 + \\
 &\quad + \cos(n_{11} + m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1 - \sin(n_{11} + m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1] dx_1 dy_1 \\
 d'_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) [\cos(n_{11} + m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1 + \sin(n_{11} + m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1 + \\
 &\quad - \cos(n_{11} - m_{21})x_1 \cos(m_{22})y_1 + \sin(n_{11} - m_{21})x_1 \sin(m_{22})y_1] dx_1 dy_1
 \end{aligned} \tag{7}$$

При этом упрощается структура координатных векторов:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{nx}^+ &= \begin{bmatrix} \cos(n_{11} + m_{21})x_1 \\ \sin(n_{11} + m_{21})x_1 \end{bmatrix}, & \Phi_{nx}^- &= \begin{bmatrix} \cos(n_{11} - m_{21})x_1 \\ \sin(n_{11} - m_{21})x_1 \end{bmatrix}, \\
 \Phi_{my}^+ &= \begin{bmatrix} \cos(m_{22})y_1 \\ \sin(m_{22})y_1 \end{bmatrix}, & \Phi_{my}^- &= \begin{bmatrix} \cos(m_{22})y_1 \\ \sin(m_{22})y_1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Но по-прежнему сохраняется влияние основных и уточных компонент, а, следовательно, упрощается только определение компонентных векторов:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{nx}^+ &= \begin{bmatrix} \cos n^+ x_1 \\ \sin n^+ x_1 \end{bmatrix}, & \Phi_{nx}^- &= \begin{bmatrix} \cos n^- x_1 \\ \sin n^- x_1 \end{bmatrix}, \\
 \Phi_{my}^+ &= \Phi_{my}^- = \Phi_{my}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

При этом определение элементов спектральных матриц упрощается незначительно:

$$\begin{aligned}
 a^{+}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{+}_{nx}, f(x,y)S^{+}_{11}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\
 b^{+}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{+}_{nx}, f(x,y)S^{+}_{12}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\
 c^{+}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{+}_{nx}, f(x,y)S^{+}_{21}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\
 d^{+}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{+}_{nx}, f(x,y)S^{+}_{22}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\
 a^{-}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{-}_{nx}, f(x,y)S^{-}_{11}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\
 b^{-}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{-}_{nx}, f(x,y)S^{-}_{12}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\
 c^{-}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{-}_{nx}, f(x,y)S^{-}_{21}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\
 d^{-}_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}^{-}_{nx}, f(x,y)S^{-}_{22}\bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy.
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 n^{+} = n_{11} + m_{21} &= n\pi \frac{\beta_{22}}{|B|} \left( \frac{1}{L_x} + \frac{1}{\frac{\beta_{22}}{\beta_{21}} L_y} \right), & n^{-} = n_{11} - m_{21} &= n\pi \frac{\beta_{22}}{|B|} \left( \frac{1}{L_x} - \frac{1}{\frac{\beta_{22}}{\beta_{21}} L_y} \right) \\
 m^{+} = m_{22} &= m\pi \frac{1}{\beta_{22} L_y}, & m^{-} = m^{+} &= m.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Сохраняются, естественно и матрицы, определяющие взаимодействие компонент координатных векторов:

$$\begin{aligned}
 S^{+}_{11} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, & S^{+}_{12} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & S^{+}_{21} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & S^{+}_{22} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
 S^{-}_{11} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, & S^{-}_{12} &= \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & S^{-}_{21} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, & S^{-}_{22} &= \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Таким образом, при построении модели ткани с перекошенным утком сохраняется структура модели ткани с общим видом возмущения.

Существенное упрощение соотношений достигается при отсутствии перекоса уточных нитей. В этом случае:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & 0 \\ 0 & \beta_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (13)$$

Естественно упрощаются соотношения связи

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1}{\beta_{11}} \\ y &= \frac{y_1}{\beta_{22}} \end{aligned} \quad (14)$$

Якобиан перехода в этом случае определяется выражением:

$$J = \frac{1}{|B|} = \frac{1}{\beta_{11}\beta_{22}}. \quad (15)$$

В этом случае

$$\begin{aligned} L_{x1} &= \beta_{11}L_x, & L_{x2} &= \infty, & L_{y2} &= \infty, & L_{y1} &= \beta_{22}L_y. \\ n_{11} &= \frac{n\pi}{\beta_{11}L_x}, & n_{12} &= 0, & m_{22} &= \frac{m\pi}{\beta_{22}L_y}, & m_{21} &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Соотношения

$$\begin{aligned} a'_{m,n} &= \frac{1}{\beta_{11}\beta_{22}L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \cos(n_{11}x_1) \cos(m_{22}y_1) dx_1 dy_1; \\ b'_{m,n} &= \frac{1}{\beta_{11}\beta_{22}L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \sin(n_{11}x_1) \cos(m_{22}y_1) dx_1 dy_1; \\ c'_{m,n} &= \frac{1}{\beta_{11}\beta_{22}L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \cos(n_{11}x_1) \sin(m_{22}y_1) dx_1 dy_1; \\ d'_{m,n} &= \frac{1}{\beta_{11}\beta_{22}L_xL_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x_1, y_1) \sin(n_{11}x_1) \sin(m_{22}y_1) dx_1 dy_1. \end{aligned} \quad (17)$$

Следовательно, происходит только изменение частот в спектре модели и восстанавливается структура матриц взаимодействия

$$S_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_{12} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_{22} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

С координатными векторами

$$\varphi_{nx} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{1}{\beta_{11}} n\right)x \\ \sin\left(\frac{1}{\beta_{11}} n\right)x \end{bmatrix}, \quad \varphi_{my}^+ = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{1}{\beta_{22}} m\right)y \\ \sin\left(\frac{1}{\beta_{22}} m\right)y \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Действительно, в случае

$$\begin{aligned} \varphi_{nx}^+ &= \varphi_{nx}^- = \varphi_{nx}, \\ \varphi_{my}^+ &= \varphi_{my}^- = \varphi_{my}. \end{aligned} \quad (20)$$

Получаем

$$\begin{aligned} a_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}_{nx}, f(x,y)[S_{11}^+ + S_{11}^-] \bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\ b_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}_{nx}, f(x,y)[S_{12}^+ + S_{12}^-] \bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\ c_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}_{nx}, f(x,y)[S_{21}^+ + S_{21}^-] \bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy; \\ d_{m,n} &= \frac{1}{2|B|L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} \left\langle \bar{\varphi}_{nx}, f(x,y)[S_{22}^+ + S_{22}^-] \bar{\varphi}_{my} \right\rangle dx dy. \end{aligned} \quad (21)$$

Так как

$$\begin{aligned} S_{11}^+ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, & S_{12}^+ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & S_{21}^+ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & S_{22}^+ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ S_{11}^- &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, & S_{12}^- &= \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & S_{21}^- &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, & S_{22}^- &= \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (22)$$

то имеем:

$$\begin{aligned} S_{11}^+ + S_{11}^- &= S_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, & S_{12}^+ + S_{12}^- &= S_{12} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ S_{21}^+ + S_{21}^- &= S_{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, & S_{22}^+ + S_{22}^- &= S_{22} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (23)$$

Следовательно, при анализе качества тканей Фурье - представление модели ткани описывает две подсистемы – взаимодействие «уток – основа» и взаимодействие «основа – уток». С точки зрения определения состояния структуры ткани, эти подсистемы равно-

ценны, и можно просто рассматривать только одну компоненту, что резко упрощает задачу описания ткани.

Для примера рассмотрим результаты выполнения нормализации изображения контролируемого участка однослойной ткани. На рис. 2 показано изображение контролируемого участка ткани, полученного с помощью цифровой камеры.



Рис. 2 Изображение участка контролируемой ткани

При прямой бинаризации изображения контролируемого участка ткани (рис.3) сохраняется влияние перекосов.



Рис. 3 Результат прямой бинаризации изображения контролируемой ткани

Следовательно, сохраняются возмущения в частотном спектре, что и вызывает погрешности в определении плотности. Очевидно, что при определении плотности по результатам прямой бинаризации ошибки, связанные с деформацией структуры ткани, сохраняются.

С другой стороны, как следует из (9), при устранении перекоса восстанавливаются все основные параметры ткани и, следовательно, над полученным изображением участка ткани необходимо выполнить операцию нормализации – устранения перекоса.

Операция нормализации изображения выполнена по критерию максимума проекций на основные направления. То есть, проведен поворот изображения по осям до получения максимумов в проекциях нитей. Результат данной процедуры приведен на рисунке 4.

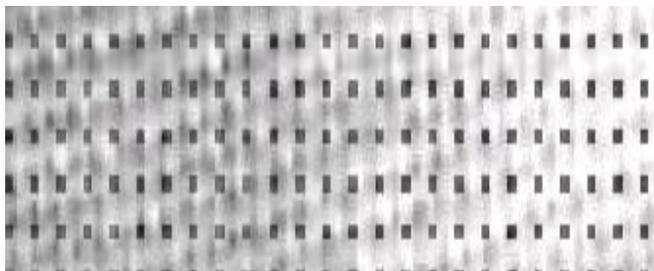


Рис. 4 Результат восстановления участка ткани

Далее выполнена пороговая бинаризация (рис.5).



Рис. 5. Бинарное изображение структуры ткани после нормирования

Все преобразования выполнены в среде MATLAB[5].

Очевидно, что в данном случае ошибки, связанные с деформацией ткани устранены. Одновременно можно оценить и угол перекоса структуры. Вопрос о погрешностях, связанных с линейными деформациями при устранении перекосов для малых углов является существенным. Однако как при возникновении, так и при устранении малых перекосов предполагается сохранение преобразования (10), что снижает ошибку.

#### **Выводы:**

- При деформации ткани, вызывающей перекос структуры возникают структуры, которые значительно превышают размер одиночного раппорта, что вызывает возмущения всего полотна ткани – складки, изменение механических свойств и т.п.
- Математическая модель ткани, построенная с учетом деформации полотна, содержит информацию о взаимодействии уточной и основной составляющей и для анализа можно использовать упрощенную модель.
- Для устранения влияния деформаций на точность измерения основных геометрических характеристик ткани необходимо предварительно выполнить преобразование изображения ткани, устраняющее деформации.

In article questions of influence of deformation of a fabric on definition of its density for the automated monitoring systems of quality are investigated. On experimental - analytical model of a fabric with use Fourier - representations.

1. Храпливый А.П. Теоретические основы и практика разработки систем и средств контроля и управления структурными показателями тканей. (Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук). Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени институт текстильной и легкой промышленности им. С.М. Кирова, 1990 г.
2. Толстов В.В. Ряды Фурье. -М.: Мир, 1979. –211 с.
3. Автоматизированные системы контроля качества готовых тканей в отделочном производстве / Ю.А.Павлов, Г.Я.Иезуитова, Я.М.Ребарбер, В.Н.Роматов. –М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. –264 с.
4. Рожков С.А., Бражник Д.А., Куцак Р.С. Описание объекта как двумерной структуры с продолжением по раппортам. Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины –2004. №1(8), С. 274-281.
5. Рудаков П.И., Сафонов И.В. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x:/ Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. –М.: Диалог–МИФИ, 2000. –416 с. –(Пакеты прикладных программ; Кн.2).

## ІНФОРМАЦІОННО-ІЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАНЬ  
ФАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ  
НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ LABVIEW

Бабак В.П., Дегтярьов В.В, Куц Ю.В, Щербак Л.М.

**Вступ.** Фазові методи перетворення, обробки та передачі інформації широко застосовуються в наукових дослідженнях і технічних вимірюваннях. Ці методи дозволило вирішити ряд важливих науково-технічних задач, пов'язаних з прецизійним вимірюванням кутів, відстаней, часових інтервалів в радіотехніці, радіонавігації, радіоелектронній геодезії [1-6]. Значна область використання та ефективність фазових методів обумовили швидкі темпи розвитку фазовимірювальної техніки у 80-90 роках двадцятого століття. Були створені і серійно випускались фазометри серед яких Ф5126, Ф5131 (Україна), Ф2-34, ФК2-35 (Росія) та ін., а також експериментальні зразки фазометрів з підвищеними метрологічними характеристиками (точністю, динамічним діапазоном сигналів, розширеним за межі інтервалу  $[0, 2\pi)$  рад діапазоном вимірювання, тощо) [7]. Нові можливості у підвищенні метрологічних показників фазовимірювальної апаратури відкрито завдяки використанню цифрової техніки і цифрових методів обробки сигналів, але на сьогодні не всі переваги цифрових методів повністю реалізовані. Так, замість визначення фазових характеристик сигналів через цифрову обробку інформаційних сигналів, виконувались додаткові проміжні перетворення фазового зсуву в інші аналогові величини, наприклад, часовий інтервал або значення напруг. При цьому сам вимірювальний сигнал часто спотворювався, піддавався нелінійним перетворенням (обмеженню, диференціюванню з метою визначення нуль-переходів та інші), що неминуче вело до зменшення достовірної інформації про фазові характеристики сигналів. Таке "спрощення" для можливості апаратурної реалізації стало джерелом виникнення додаткових методичних похибок, причиною виникнення ланцюга додаткових проблем – низької завадостійкості, наявності "мертвих зон", збільшення часу вимірювання тощо, і обмежило можливості подальшого удосконалення фазовимірювальної апаратури. Реалізація оптимальних алгоритмів оцінки фазових зсувів сигналів, які передбачають застосування до сигналів таких операцій як множення, інтегрування, при реалізації в аналоговій формі супроводжувалась значними апаратурними похибками [3,7].

Розвиток засобів обчислювальної техніки, їх продуктивності та швидкодії, розвиток інформаційних технологій дозволяє на сьогодні впроваджувати більш складні алгоритми обробки інформації при побудові вимірювальних приладів і інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). Стало доступним і економічно виправданим застосування методів спектрального аналізу на основі дискретного перетворення Фур'є, кореляційного аналізу, статистичного аналізу і обробки результатів вимірювань, чисельних методів тощо. Поява сучасного прикладного програмного забезпечення (пакети LabVIEW, MATLAB), орієнтованого на вирішення питань обробки сигналів та реалізацію основних функцій ІВС програмними засобами значно полегшує та скорочує час розробки нових вимірювальних приладів та ІВС, дозволяє дослідити різні варіанти ІВС з метою покращення їх метрологічних та експлуатаційних показників.

В статті аналізуються можливості застосування нових інформаційних технологій у вимірювальній техніці на прикладі створення фазовимірювальної системи на основі технології LabVIEW.

**Постановка задачі.** Необхідно розробити структуру фазовимірювальної системи для вимірювання різниці фазових зсувів  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \in (-2\pi, 2\pi)$  між гармонічними сигналами виду

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1), \\ u_{2C}(t) &= U_2 \cos(2\pi ft + \varphi_2), \quad t \in [0, T_c) < \infty, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $U_1, U_2$  - амплітуди сигналів,  $f$  - частота (період  $T = f^{-1}$ ),  $f \in [f_H, f_B]$ ,  $f_H, f_B$  - межі частотного діапазону,  $t$  - поточний час спостереження,  $\varphi_1, \varphi_2$  - початкові фазові зсуви,  $\varphi_1, \varphi_2 \in [0, 2\pi)$ ,  $T_c$  - інтервал часу спостереження сигналів.

Для сигналів  $u_{2C}$  (1) і  $u_{2S}(t) = U_2 \sin(2\pi ft + \varphi_2)$  на інтервалах часу  $0.5T$  виконується умова ортогональності, тобто

$$\int_t^{t+0.5T} u_{2C}(\tau) u_{2S}(\tau) \mu(\tau) d\tau = 0 \quad (2)$$

при значенні вагової функції  $\mu(\tau) = 1$ .

Використаємо дискретну ортогональну обробку сигналів як основний метод вимірювання фазових зсувів сигналів (1) на базі цифрової обробки.

Програмна частина системи реалізується в програмному пакеті LabVIEW.

Система на  $S_K^0$  основі зміни алгоритмів і програмного забезпечення, статистичної обробки і візуалізації результатів вимірювань повинна мати широке коло варіантів її реалізації.

**Розв'язок.** Повний розв'язок поставленої задачі розіб'ємо на декілька етапів.

1. *Аналіз похибки вимірювання фазових характеристик внаслідок неточного визначення інтервалу ортогональності.* Ортогональний метод [3,7] передбачає розклад одного з сигналів (1), наприклад першого, в системі ортогональних функцій ( $u_{2C}(t), u_{2S}(t)$ ) на інтервалі ортогональності ( $t, t + 0.5T$ ). Для сигналів (1) результати розкладу представляються у вигляді

$$S(\varphi_1, \varphi_2) = -U_2 \int_t^{t+0.5T} u_1(\tau) \sin(2\pi f\tau + \varphi_2) d\tau, \quad C(\varphi_1, \varphi_2) = U_2 \int_t^{t+0.5T} u_1(\tau) \cos(2\pi f\tau + \varphi_2) d\tau. \quad (3)$$

Визначивши ці складові можна отримати модуль різниці фазових зсувів  $|\varphi| \in [0, 2\pi)$  за формулою

$$L(S, C) = \arctg \frac{S}{C} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign}S(1 + \text{sign}C)\} = |\varphi| = |\varphi_1 - \varphi_2|, \quad (4)$$

де  $\text{sign}(\cdot)$  - знакова функція,  $L$  - оператор перетворення сигналів (3).

Визначення фазових зсувів за формулами (3), (4) в смузі частот  $f \in [f_H, f_B]$  викликає певні складності, оскільки обчислення інтегралів в (3) має виконуватись на інтервалах ортогональності, тобто на часових інтервалах кратних періоду сигналу, який є апріорно не завжди є відомим. В той же час в більшості робіт, де розглядається такий метод вимірювання, апріорно приймається, що період сигналу відомий [3,7]. Для часу інтегрування  $T_c \neq 0.5T$  умова ортогональності (2) порушується і виникає систематична похибка вимі-

рювання фазових зсувів. Покладемо  $\varphi_2 = 0$  і позначимо час інтегрування  $T_c = \alpha T$ , де  $\alpha > 0.5$  дійсне число. Тоді вирази (3) матимуть вигляд

$$S'(\alpha, \varphi_1) = \frac{U_1 U_2}{2} \left[ \sin(\varphi_1) - \sin(2\pi\alpha + \varphi_1) \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi\alpha} \right], \quad (5)$$

$$C'(\alpha, \varphi_1) = \frac{U_1 U_2}{2} \left[ \cos(\varphi_1) + \cos(2\pi\alpha + \varphi_1) \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi\alpha} \right]. \quad (6)$$

Похибка визначення фазових зсувів, яка обумовлена відхиленням інтервалу інтегрування від інтервалу ортогональності (некратність часу інтегрування періоду сигналу) об'раховується як

$$\Delta\varphi(\alpha, \varphi_1) = L(S'(\alpha, \varphi_1), C'(\alpha, \varphi_1)) - L(S, C). \quad (7)$$

В формулі (7) складова  $L(S, C)$  отримана для  $T_c = 0.5T$ . Залежність  $\Delta\varphi = f(\alpha, \varphi_1)$  для різних значень кута  $\varphi_1$  представлені на рис.1а,б,в.

З рис.1 видно, що похибка  $\Delta\varphi$  може набувати великих значень. Наприклад, при  $\alpha = 2.25$ , тобто при  $T_c = 2.25T$  похибка дорівнює  $\Delta\varphi \approx \pm 4^\circ$ . Узагальнюючи аналіз цієї складової похибки  $\Delta\varphi$  можна зробити такі висновки:

- похибка визначення фазових зсувів дорівнює  $0^\circ$  для значень

$$\alpha = 0.5l, \quad (8)$$

де  $l \in \mathbb{N}$ , з чого виходить, що інтервал інтегрування повинен бути кратним часу  $0.5T$ ;

- незначне відхилення  $\alpha$  від значень  $0.5l$  веде до появи значних похибок, наприклад, зміна значення  $\alpha = 2$  на  $1\%$  веде до виникнення похибки  $\Delta\varphi \approx 1^\circ$ ;
- похибка набуває максимальних значень в околі значень  $\alpha = 0.5(1 + 0.5)$ ;
- максимальні значення похибки зменшуються обернено пропорційно значенню  $\alpha$ ;
- похибка залежить періодично (з періодом  $\pi$ ) від початкової фази сигналу  $\varphi_1$ .

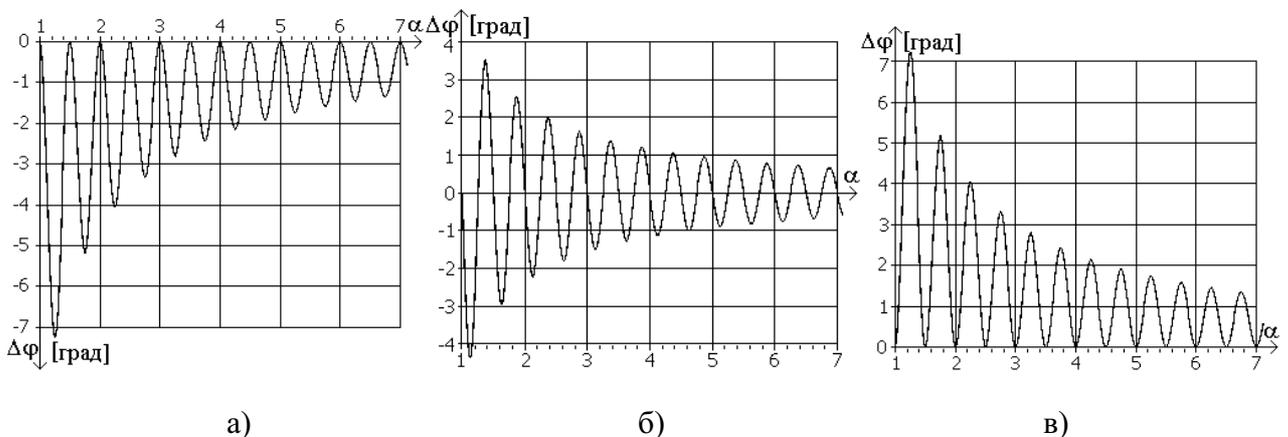


Рис.1 Графіки залежності  $\Delta\varphi = f(k)$  для різних значень фазових зсувів: а)  $\varphi_1 = 0^\circ$ , б)  $\varphi_1 = 45^\circ$ , в)  $\varphi_1 = 90^\circ$

Таким чином, при виконанні прецизійних вимірювань фазових зсувів необхідно якомога точніше задавати тривалість часу спостереження сигналів, яка повинна бути кратною половині періоду сигналу. Ця вимога стає більш жорсткою при зменшенні часу спостереження і наближенні до значень  $(1-2)T$ , оскільки однакові абсолютні похибки при визначенні  $T_c$  приводять в цій області до значно більших фазових похибок.

Проведений вище аналіз вказує на необхідність оцінки періоду сигналу  $T$  з метою адаптації часу інтегрування  $T_c$  до  $T$ , а при реалізації дискретного ортогонального методу – визначення об'єму вибірки сигналу  $M_{ад}$  також адаптованої за значенням  $T$ .

2. *Адаптація об'єму вибірки сигналу до періоду сигналу  $T$ .* Дискретний ортогональний спосіб визначення фазових зсувів передбачає виконання аналого-цифрового перетворення неперервних вхідних сигналів у вибірки їх значень

$$u_1[m] = \{u_1(mT_d), m \in \overline{1, M}\}, u_2[m] = \{u_2(mT_d), m \in \overline{1, M}\}, \quad (9)$$

де  $M = T_c F_d$  - об'єм вибірки,  $F_d$  - частота дискретизації сигналів, яка задовільняє теоремі відліків -  $F_d > 2f_v$  (зазвичай  $F_d > 10f_v$ ). Простим способом узгодження часу інтегрування з періодом сигналу без зміни частоти дискретизації є коригування об'єму вибірки, який необхідно обирати з умови

$$M_{ад} = [0.51TF_d]^+ = \left[\frac{1M}{2\alpha}\right]^+ < M, \quad (10)$$

де  $[\cdot]^+$  - позначення операції виділення цілої частини числа. Адаптація об'єму вибірки, яка відповідає інтервалу ортогональності сигналів (1), виконується за рахунок зменшення об'єму  $M$  вихідної вибірки. Найменші втрати об'єму вибірки мають місце при  $1 = [2\alpha]^+$ . З урахуванням цього представимо формулу (10) як

$$M_{ад} = \left[\frac{[2\alpha]^+ M}{2\alpha}\right]^+. \quad (11)$$

Отримане значення  $M_{ад}$  може відрізнятись від точного значення  $M_{ад,т} = \frac{[2\alpha]^+ M}{2\alpha}$  на величину  $\pm 0.5$ . Це значення визначає залишкову похибку оцінки інтервалу інтегрування, отже і залишкову похибку визначення фазового зсуву. Наприклад, при  $M = 1000$ , для всіх  $\alpha > 1$  маємо значення фазової похибки  $|\Delta\phi| < 0.03$ .

3. *Розширення діапазону вимірювання фазових зсувів.* У відповідності до поставленої задачі необхідно забезпечити однозначне вимірювання фазових зсувів в інтервалі  $(-2\pi, 2\pi)$ . Визначення фазових зсувів за відомим варіантом ортогонального методу, що здійснюється у відповідності з (3)-(5), забезпечує однозначний результат вимірювань лише в інтервалі  $(0, 2\pi)$ . Задачу розширення діапазону можна вирішити, якщо визначити фазовий зсув кожного з сигналів (1), як його розклад в системі  $(\cos(2\pi ft), \sin(2\pi ft))$ , компоненти якої можуть бути некогерентними сигналам (1). Така можливість існує з огляду на те, що, по-перше, формування таких квадратурних компонент здійснюється в цифровій формі, по-друге, період вимірювального сигналу, і частота дискретизації є величини

відомі. Синтез вибірок квадратурних компонент опорного колювання здійснюється за формулами

$$u_s[m'] = \sin(m'T_d) \quad u_c[m'] = \cos(m'T_d) \quad m' \in \overline{1, M_{ад}} \quad (12)$$

Тоді квадратурні компоненти першого сигналу (1) в цифровій формі визначаються як

$$S_1 = \sum_{j=1}^{M_{ад}} u_1[j] \cdot u_s[j], \quad C_1 = \sum_{j=1}^{M_{ад}} u_1[j] \cdot u_c[j], \quad (13)$$

для другого сигналу (1) –

$$S_2 = \sum_{j=1}^{M_{ад}} u_2[j] \cdot u_s[j], \quad C_2 = \sum_{j=1}^{M_{ад}} u_2[j] \cdot u_c[j]. \quad (14)$$

Отримавши квадратурні компоненти (13), (14) можна у відповідності до загальної формули (4) визначити окремо значення  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , отже і їх різницю  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Використання некогерентного опорного сигналу має і іншу важливу перевагу – в цьому разі немає потреби у виконанні в інтервалі частот  $[f_H, f_B]$  прецизійного зсуву сигналу на кут  $90^\circ$ , що необхідно при обрахунку квадратурних компонент за формулами (3), і що є досить складним технічним завданням. Крім того, система з некогерентними опорними сигналами зберігатиме працездатність при наявності адитивних шумових складових в обох вимірювальних сигналах.

4. *Усереднення результатів вимірювань фазових зсувів.* В умовах дії завад поточні значення різниці фазових зсувів мають суттєву випадкову похибку, яка може бути зменшена за рахунок усереднення. Для об'єму  $M_y$ , усереднюваних фазових зсувів, які утворюють вектор  $(\varphi_g \in (-2\pi, 2\pi), g = \overline{1, M_y})$ , усереднення і отримання результату в інтервалі  $(-2\pi, 2\pi)$  виконується у відповідності до алгоритму усереднення на колі [8]

$$\bar{\varphi} = 2 \arctg \frac{\bar{S}}{\bar{C}} + \pi \left\{ - \text{sign} \bar{S} (1 + \text{sign} \bar{C}) \right\}, \quad (15)$$

де

$$\bar{S} = \frac{1}{M_y} \sum_{g=1}^{M_y} \sin \frac{\varphi_g}{2}, \quad \bar{C} = \frac{1}{M_y} \sum_{g=1}^{M_y} \cos \frac{\varphi_g}{2}. \quad (16)$$

5. *Застосування пакета LabVIEW.* Розробка системи виконувалась із застосуванням програмного пакета LabVIEW версії 6, розробленої фірмою National Instruments (США) – одного зі світових лідерів в розробці програмного і апаратного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем [9]. Пакет LabVIEW має широку бібліотеку програмних модулів для генерації та обробки сигналів і надає розробнику зручний інструмент побудови вимірювальних приладів, дозволяючи поєднати первинні вимірювальні перетворювачі, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі і програмні засоби, які здатні реалізувати функції різноманітних вимірювальних приладів в єдину інформаційно-вимірювальну систему.

Мова LabVIEW за своєю структурою наближається до мов програмування СІ та Бейсік. Однак вона не потребує написання текстів програм – в LabVIEW використовується графічне програмування, за допомогою якого і створюються програми у вигляді блок-схем.

Інтерактивний інтерфейс розроблених в LabVIEW приладів уявляє собою графічне зображення передніх панелей фізичних приладів і дозволяє імітувати роботу всіх органів управління та пристроїв, які відповідають фізичному приладу.

6. Реалізація автоматизованої системи вимірювання фазових характеристик. Структура автоматизованої системи вимірювання фазових характеристик періодичних сигналів за методом дискретної ортогональної обробки і синтезом некогерентного опорного сигналу наведена на рис.2.

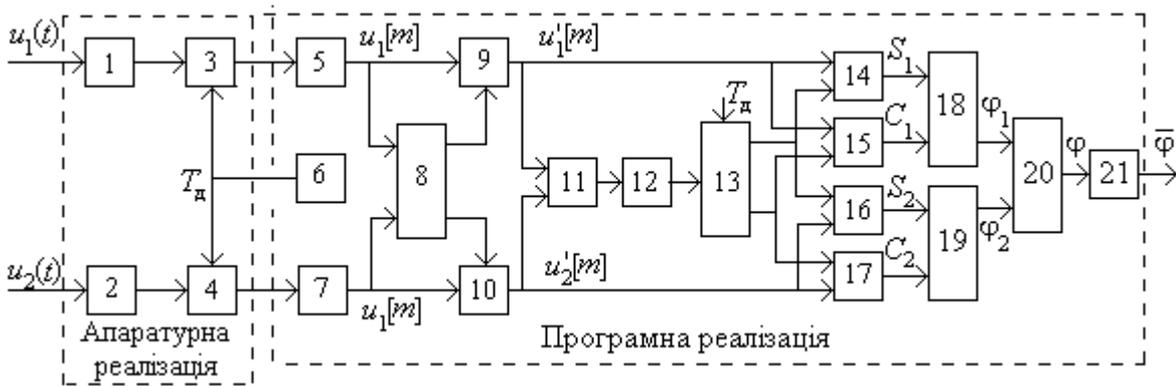


Рис.2 Структура автоматизованої фазовимірювальної системи з дискретною ортогональною обробкою сигналів

На рис.1. позначено: 1,2 – вхідні пристрої, 3,4, - аналого-цифрові перетворювачі, 5,7 – оперативні запам'ятовувальні пристрої, 6 – генератор сигналів дискретизації, 8 – блоки попереднього аналізу спектра сигналів, 9,10 – цифрові фільтри, 11 – блок визначення періоду, 12 – блок адаптації об'єму вибірки, 13 – формувач копії сигналу, 14-17 – обчислювачі квадратурних компонент, 18,19 – обчислювачі функції arctg, 20 – віднімач, 21 – блок усереднення.

Вхідні пристрої 1,2 узгоджують вхідні ланцюги системи з джерелами сигналів. Аналогово-цифрові перетворювачі 3,4 формують вибірки вхідних сигналів (9). Блоки 1-4 реалізуються у вигляді окремої плати введення/виведення аналогових сигналів, яка конструктивно розміщується на материнській платі ПК. Вибіркою даних керує пристрій 6. Потoki відліків вхідних сигналів  $u_1[m]$ ,  $u_2[m]$  надходять, відповідно, на оперативні запам'ятовувальні пристрої 5,7, розраховані на об'єми вибірок  $M$ . Пристрій 8 здійснює попередній спектральний аналіз і керує цифровими фільтрами 9,10 [10], які вилучають з сигналів, в разі наявності, зосереджені завади, оскільки фазометри з ортогональною обробкою чутливі до завад такого типу. Необхідність такої обробки обумовлена тим, що оптимальні по відношенню до білого гауссівського шуму ортогональні фазометри мають низьку завадостійкість до зосереджених завад. В роботі [6] запропонована вагова обробка сигналів для зменшення впливу завад такого типу. Проте разом з цим збільшується похибка від дії гауссівської завади. Застосування перестроюваних цифрових фільтрів розв'язує це протиріччя. Введення в структуру системи цифрових фільтрів дозволяє вирішити і інші задачі побудови ІВС – задачу прецизійного вимірювання фазових характеристик полігармонічних сигналів, сигналів зі значним рівнем нелінійних спотворень, тощо.

З метою зменшення похибки (7) в структуру рис.2 введено блоки 11,12, які узгоджують об'єм вибірки сигналів з його періодом. Синтез вибірок квадратурних компонент (12) опорного сигналу здійснюється блоком 13. Обчислювачі квадратурних компонент 14-17

виконують операції перемноження та підсумовування (13), (14) і формують квадратурні складові  $S_1, C_1, S_2, C_2$ . Обчислювачі 18,19 функції арктангенса визначають, у відповідності до (4), фазові зсуви  $\varphi_1, \varphi_2$  вхідних сигналів відносно синтезованих опорних сигналів з нульовими початковими фазовими зсувами. Поточні значення різниці фазових зсувів  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  визначає віднімач 20, а усереднення поточних значень на колі у відповідності з формулами (15), (16) виконує пристрій усереднення 21.

Програма обробки сигналів у відповідності до структури рис.2, елементи управління системою та режимами візуалізації проміжних та кінцевих результатів вимірювання виконані в системі LabVIEW, яка дозволяє також створити зручний інтерфейс користувача і підтримувати інтерактивний режим роботи. Зовнішній вигляд інтерфейсу представлено на рис. 3.

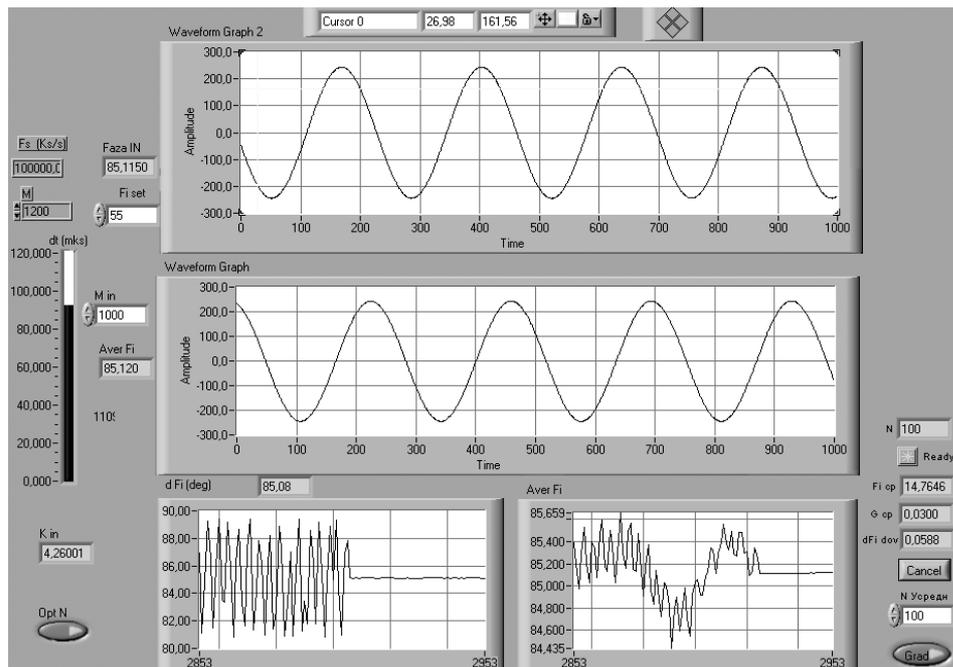


Рис.3 Інтерфейс автоматизованої фазової ІВС, створений в системі LabVIEW

Інтерфейс має чотири вікна, на яких зображено вхідні сигнали (перше і друге вікна), похибка вимірювання фазового зсуву без усереднення (третє вікно) і з усередненням при  $M_y = 100$  (четверте вікно) для випадку вимірювання фазового зсуву  $\varphi = 85.10^\circ$ . Значення похибок у третьому і четвертому вікнах наведені для випадків, коли адаптація об'єму вибірки відсутня (початок графіків) і з адаптацією (прикінцева частина графіків).

Введення аналогових сигналів в ПК здійснювалось за допомогою плати введення/виведення серії 1800 фірми ICCP DAS (шина PCI,  $F_d < 330$  кГц, комутатор на 8 каналів, 12-розрядний аналого-цифровий перетворювач). Застосування цієї плати дозволяє виконувати вимірювання в діапазоні  $f \in [10, 30000]$  Гц. Графічний інтерфейс, програма управління процесом вимірювання та обчислення реалізовані в системі LabVIEW.

Запропонована реалізація фазової ІВС забезпечує розв'язок існуючих (перелічених вище) проблем. Так, розширення діапазону вимірювання до інтервалу  $(-2\pi, 2\pi)$  та вилучення зі структури прецизійного широкосмугового фазообертача відбулося за рахунок застосування в ІВС некогерентного опорного сигналу, зменшення впливу зосереджених завад – за рахунок використання цифрової фільтрації, а зменшення похибки від неkratності часу інтегрування періоду сигналу для широкої смуги частот – оцінкою періоду вимірювальних сигналів та адаптацією об'єму вибірки.

В даній реалізації частотний діапазон системи обмежений лише швидкістю плати введення/виведення. Її заміна на більш високочастотну не потребує модернізації програми. Крім того слід сказати, що сучасні швидкісні АЦП, які встановлюються на платах введення/виведення мають пристрої вибірки та збереження, що дозволяє, при потребі, реалізувати стробоскопічний режим роботи системи, за рахунок чого суттєво розширюється частотний діапазон системи.

Таким чином, на прикладі розглянутої ІВС показано, що система LabVIEW в комплексі з платою введення/виведення та ПК дозволяє розробляти в стислі терміни складні ІВС з заданими характеристиками, властивості яких можуть бути досліджені.

### Висновки

Результати досліджень дають можливість обґрунтувати застосування у фазових ІВС новітніх інформаційних технологій на базі цифрової обробки сигналів, що дозволяє покращити метрологічні характеристики ІВС, а саме збільшити динамічний діапазон сигналів, скоротити час вимірювання, зменшити похибки вимірювання фазових зсувів сигналів при співвідношеннях сигнал/завада в околі одиниці, розширити область їх застосування та скоротити час проектування систем.

Отриманий аналітичний вираз (7) похибки фазометрів з дискретною ортогональною обробкою сигналів в залежності від тривалості часу інтегрування дозволяє обрахувати ці похибки для різних інтервалів спостереження сигналів і сформулювати обґрунтовані рекомендації по їх зменшенню шляхом адаптації об'єму вибірки сигналів до їх періоду.

Виконана із застосуванням технології LabVIEW модель фазової ІВС дозволяє не тільки здійснювати технічні вимірювання, але й проводити дослідження різних режимів роботи системи, визначення складових похибки при проведенні імітаційного модельного експерименту.

Діапазон вимірювання фазових зсувів запропонований ІВС порівняно з традиційними приладами та системами збільшений вдвічі і становить  $(-2\pi, 2\pi)$ .

The realization of phase measuring system with using of LabVIEW technology is offered and its features of functioning are considered. The analysis of new variants of the phase measuring system with discrete orthogonal signal processing are carried out. The error of the phase characteristics measurement is determined at the limited time signal processing.

1. Беляевский Л.С., Новиков В.С, Олянюк П.В. Основы радионавигации: Учебник для вузов гражд. Авиации.- М.: Транспорт, 1982. – 288 с.
2. Лобачев В.М. Радиоэлектронная геодезия.- М.: Недра, 1980.- 327 с.
3. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы (Основы статистической теории) - М.: Сов. радио, 1968. - 466 с.
4. Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А. Фазовый метод определения координат.- М.: Сов.радио, 1979.- 280 с.
5. Маєвський С.М., Куц Ю.В. Гетеродинна інтерференційна система контролю якості дзеркал // Автоматизація фізичних методів контр. в технічній діагностиці та медицині. Тези доп. школи-семінару 12-14 вер.1995р., м.Славське Львівської обл., с.19.
6. Бабак В.П., Куц Ю.В. Метод однозначного визначення великих фазових зсувів сигналів // Вісник НАУ.-2003.-№1.-С.3-8.
7. Чмых М.К. Цифровая фазометрия. – М.: Радио и связь, 1993.- 184 с.
8. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений.- М.: Наука, Гл.ред. физ.-мат. лит., 1978.- 240 с.
9. Жарков Ф.П., Каратаев В.В. и др. Использование виртуальных инструментов LabVIEW. М.: Солон-Р, Радио и связь, 1999. – 268с.
10. Бабак В.П. та ін. Обробка сигналів: Підручник/ В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1999.- 496 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА В СИСТЕМАХ ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ

Бабичева И.Ф., Шарко А.В.

**Постановка проблемы.** Современные темпы развития промышленного производства, высокий уровень динамических и статических нагрузок на изделия в режиме эксплуатации, вызывают необходимость создания высокоточных систем контроля и технической диагностики, основанных на современных методах обработки информации. Одним из возможных направлений повышения эффективности систем контроля является использование нейросетевых технологий для обработки эмпирических данных, полученных различными неразрушающими методами контроля механических характеристик металлов.

**Анализ последних публикаций.** При неразрушающем контроле прочностных свойств конечной целью контроля является определение прочностных характеристик таких, как предел прочности, текучести, относительное удлинение, относительное сужение и т.д. Эти величины можно измерить при непосредственном разрушении материала, что в рабочем режиме объекта недопустимо, т. к. это связано с большими финансовыми потерями, связанными с остановкой производства. В работах [1-6] представлены методики контроля неразрушающими методами, в которых о прочностных характеристиках металлов судят по косвенным измерениям, определив такие физические характеристики, как скорость прохождения ультразвука в металле, резонансную частоту автоциркуляции, коэрцитивную силу и т.д. и установив корреляционную зависимость между механическими и физическими характеристиками, оценивают механические свойства металлов. Но при таком подходе на точность измерений влияют большое количество сторонних факторов, которые увеличивают погрешность измерений физических характеристик. Кроме того, каждый из методов неразрушающего контроля имеет ограниченную область применения, что в некоторых случаях делает целесообразным применение нескольких методов неразрушающего контроля одновременно. В конечном итоге на основании эксперимента получается многомерная выборка, включающая в себя эмпирически определённые физические характеристики и множество величин, характеризующих факторы, влияющие на точность измерения физических величин. В работах [7,8] авторами разработана технология обработки многомерных данных с использованием нейронных сетей. Трудности заключаются в нахождении наиболее оптимальной для поставленной задачи структуры сети и алгоритма её обучения.

**Целью** статьи является разработка методики обработки многомерных данных с целью получения знаний о механических характеристиках металлов, основанная на комплексном использовании методов математической статистики и нейронной сети многослойный персептрон.

**Решение задачи.** На первом этапе необходимо выделить факторы, оказывающее наиболее существенное влияние на точность определения акустических характеристик. Это необходимо для уменьшения погрешности получения конечного результата. На втором этапе необходимо построить нейронную сеть, в качестве входных параметров которой являются полученные факторы и измеряемые экспериментально физические характеристики, а в качестве выходных – прочностные характеристики исследуемого материала. В работе рассмотрено решение задачи определения прочностных характеристик металлов с использованием трёхслойной персептронной нейронной сети. Для построения такой сети необходимо прежде всего определить число нейронов в слоях сети. При большом количестве нейронов сеть способна моделировать более сложные функции, осуществляя более точную подгонку, что может свидетельствовать о переобучении сети. Сети же с небольшим числом нейронов могут оказаться недостаточно гибкими, чтобы

большим числом нейронов могут оказаться недостаточно гибкими, чтобы смоделировать имеющиеся зависимости. Поэтому для решения задач технической диагностики поступим следующим образом: число нейронов во входном слое будет равно количеству входов сети; число нейронов в выходном слое равно числу выходов сети; для оценки числа нейронов в среднем слое можно воспользоваться формулой для оценки необходимого числа синаптических весов  $L_w$  в многослойной сети с сигмоидальными передаточными функциями:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left( \frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \quad (1)$$

где  $n$  – размерность входного сигнала,  $m$  – размерность выходного сигнала,  $N$  – число элементов обучающей выборки.

Оценив необходимое число весов, можно рассчитать число нейронов в скрытом слое:

$$L = \frac{L_w}{n + m}. \quad (2)$$

Для сравнения можно использовать другие формулы оценки количества нейронов в скрытом слое:

$$2(n + L + m) \leq N \leq 10(n + L + m) \quad (3)$$

$$\frac{N}{10} - n - m \leq L \leq \frac{N}{2} - n - m. \quad (4)$$

В конечном итоге после определения количества нейронов получаем сеть, которая при правильном обучении может решать задачу определения прочностных свойств металлопродукции

После создания сети её необходимо обучить, т.е. подобрать веса синапсов и смещения сети таким образом, чтобы сеть аппроксимировала зависимости между входными и выходными переменными. Для решения поставленной задачи используем алгоритм обучения обратного распространения ошибки. Это итеративный градиентный алгоритм обучения, который используется с целью минимизации среднеквадратичного отклонения текущих от требуемых выходов многослойных нейронных сетей с последовательными связями. В этом алгоритме вычисляется вектор градиента поверхности ошибок. Этот вектор указывает направление кратчайшего спуска по поверхности из текущей точки, движение по которому приводит к уменьшению ошибки. Последовательность уменьшающихся шагов приведет к минимуму того или иного типа. Трудность здесь представляет вопрос подбора длины шагов.

При большой величине шага сходимость будет более быстрой, но имеется опасность перепрыгнуть через решение или в случае сложной формы поверхности ошибок уйти в неправильном направлении, например, продвигаясь по узкому оврагу с крутыми склонами, прыгая с одной его стороны на другую. Напротив, при небольшом шаге и верном направлении потребуется очень много итераций. На практике величина шага берется пропорциональной крутизне склона, так что алгоритм замедляет ход вблизи минимума. Правильный выбор скорости обучения зависит от конкретной задачи и обычно делается опытным путем.

Согласно методу наименьших квадратов, минимизируемой целевой функцией ошибки нейронной сети является величина:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{j,k} \left( y_{j,k}^{(Q)} - d_{j,k} \right)^2, \quad (5)$$

где  $y_{j,k}^{(Q)}$  – реальное выходное состояние нейрона у выходного слоя нейронной сети при подаче на ее входы  $k$ -го образа;  $d_{j,k}$  – требуемое выходное состояние этого нейрона.

Суммирование ведется по всем нейронам выходного слоя и по всем обрабатываемым сетью образам. Минимизация методом градиентного спуска обеспечивает подстройку весовых коэффициентов следующим образом:

$$\Delta w_{ij}^{(q)} = -\alpha \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}, \quad (6)$$

где  $w_{ij}$  – весовой коэффициент синаптической связи, соединяющей  $i$ -й нейрон слоя  $(q-1)$  с  $j$ -м нейроном слоя  $q$ ;  $\alpha$  – коэффициент скорости обучения,  $0 < \alpha < 1$ .

В соответствии с правилом дифференцирования сложной функции:

$$\frac{dE}{dw_{ij}} = \frac{dE}{dy_j} \frac{dy_j}{dS_j} \frac{dS_j}{dw_{ij}}, \quad (7)$$

где  $S_j$  – взвешенная сумма входных сигналов нейрона  $j$ , т. е. аргумент активационной функции. Так как производная активационной функции должна быть определена на всей оси абсцисс, то функция единичного скачка и прочие активационные функции с неоднородностями не подходят для рассматриваемой нейронной сети. В качестве передаточной функции нейронов используем сигмоидальную активационную функцию

$$f(S) = \frac{S}{S + |C|}. \quad (8)$$

Первый множитель в уравнении (7) легко раскладывается следующим образом:

$$\frac{dE}{dY_j} = \sum_r \frac{dE}{dY_r} \frac{dY_r}{dS_r} \frac{dS_r}{dY_j} = \sum_r \frac{dE}{dY_r} \frac{dY_r}{dS_r} w_{jr}^{(q+1)}. \quad (9)$$

Здесь суммирование по  $r$  выполняется среди нейронов слоя  $(q+1)$ . Введя новую переменную:

$$\delta_j^{(q)} = \frac{dE}{dY_j} \frac{dY_j}{dS_j} \quad (10)$$

получим рекурсивную формулу для расчетов величин  $\delta_j^{(q)}$  слоя  $q$  из величин  $\delta_j^{(q+1)}$  более старшего слоя  $q+1$ :

$$\delta_j^{(q)} = \left[ \sum_r \delta_r^{(q+1)} w_{jr}^{(q+1)} \right] \frac{dY_j}{dS_j}. \quad (11)$$

Для выходного слоя:

$$\delta_j^{(Q)} = \left( Y_j^{(Q)} - d_j \right) \frac{dY_j}{dS_j}. \quad (12)$$

Теперь можно записать (6) в раскрытом виде:

$$\Delta w_{ij}^{(q)} = -\alpha \delta_j^{(q)} Y_i^{(q-1)}. \quad (13)$$

Для придания процессу коррекции весов некоторой инерционности, сглаживающей резкие скачки при перемещении по поверхности целевой функции, (13) дополняется значением изменения веса на предыдущей итерации:

$$\Delta w_{ij}^{(q)}(t) = -\alpha \left( \mu \Delta w_{ij}^{(q)}(t-1) + (1-\mu) \delta_j^{(q)} Y_i^{(q-1)} \right), \quad (14)$$

где  $\mu$  – коэффициент инерционности;  $t$  – номер текущей итерации.

Таким образом, полный алгоритм обучения трёхслойной нейронной сети с помощью процедуры обратного распространения строится следующим образом:

1. Инициализация сети. Весовым коэффициентам и смещениям сети присваиваются малые случайные значения из установленных диапазонов. При этом на входы сети подаётся один из возможных образов и в режиме прямого функционирования нейронной сети рассчитываются значения выходных сигналов:

$$S_j^{(q)} = \sum_{i=0}^L Y_i^{(q-1)} w_{ij}^{(q)}, \quad (15)$$

где  $L$  – число нейронов в слое  $(q-1)$  с учетом нейрона с постоянным выходным состоянием  $+1$ , задающего смещение;  $Y_i^{(q-1)} w_{ij}^{(q)}$  –  $i$ -й вход нейрона  $j$  слоя  $q$ .

2. Рассчитать  $\delta_j^{(Q)}$  для выходного слоя по формуле (12). Рассчитать по формуле (14) изменение весов  $\Delta w^{(Q)}$  слоя  $Q$ .

3. Рассчитать по формулам (11) и (14) соответственно  $\delta_j^{(q)}$  и  $\Delta w^{(q)}$  для всех остальных слоёв сети.

4. Скорректировать все веса в нейронной сети:

$$w_{ij}^{(q)}(t) = w_{ij}^{(q)}(t-1) + \Delta w_{ij}^{(q)}(t). \quad (16)$$

5. Если ошибка сети существенна, перейти на шаг 1, в противном случае обучение сети можно считать законченным.

Качество обучения сети можно проверить, используя контрольную кросс-проверку. Для этого резервируется часть обучающей выборки, которая используется не для обучения сети, а для независимого контроля результата в ходе обучения. В начале работы ошибка сети на обучающем и контрольном множествах будет одинаковой. По мере обучения сети ошибка обучения убывает, как и ошибка на контрольном множестве. Если же контрольная ошибка перестала убывать или стала расти, это указывает на то, что сеть начала слишком быстро аппроксимировать данные, т.е. она переобучилась и обучение следует остановить. При этом необходимо уменьшить число нейронов в скрытом слое, ибо сеть является слишком мощной для данной задачи. Если же обе ошибки не достигнут достаточно малого уровня, то сеть для данной задачи не достаточно мощная и количество нейронов в скрытом слое необходимо увеличить.

Таким образом, экспериментируя с различными сетями, выбирают ту, которая при наибольшей простоте даёт наименьшую ошибку.

В качестве примера предлагаемой методики рассмотрим объект контроля, представляющий собой полое тело вращения. Контроль производился акустическим методом

неразрушающего контроля. Прозвучивание осуществлялось резонансным способом, путём снятия амплитудно–частотных зависимостей. В качестве размерных факторов были взяты следующие геометрические параметры изделия:  $X_1$  – внутренний диаметр вершины,  $X_2$  – внутренний диаметр основания,  $X_3$  – внешний диаметр,  $X_4$  – высота,  $X_5$  – некруглость внешнего диаметра. Диаметр каждого изделия определялся как среднее арифметическое из 10 его измерений в разных точках окружности, а некруглость – как разность между наибольшим и наименьшим значениями этих измерений. Для выделения наиболее существенных факторов применялся дисперсионный анализ. При этом выходной переменной  $Z$  являлась одна из высших гармоник резонансной частоты деталей.

Структурная схема и соответствующие ей эквивалентные матричные структурные схемы для резонансного метода представлены на рис.1. Символами  $a_1 \dots a_5$  обозначены передаточные коэффициенты преобразующей системы, отображающие влияние рассматриваемого геометрического размера на значение резонансной частоты. Через  $a_0$  обозначено значение резонансной частоты, соответствующей изделию с номинальными размерами.

Для определения выборочных оценок передаточных коэффициентов  $a_1 \dots a_5$  и параметра  $a_0$  была исследована партия изделий в количестве 100 штук. Эксперимент включал регистрацию геометрических параметров  $X_1 \dots X_5$ , случайным образом изменяющихся в пределах заданных допусков, резонансной частоты, и времени прохождения акустического сигнала по толщине и окружности изделия. После этого для каждого образца измерялась твёрдость  $HRC(Y_3)$ , предел прочности  $\sigma_B(Y_1)$  и текучести  $\sigma_{02}(Y_2)$ . Собранные экспериментальные данные подвергались корреляционному и регрессионному анализу, результаты которых для резонансного метода приведены в таблице 1. Из неё видно, что все коэффициенты парной корреляции оказались значимыми, так как они превышают критическое значение коэффициента корреляции при доверительной вероятности 95%, равное 0,196 и, следовательно, зависимости между геометрическими параметрами и резонансной частотой действительно имеют место.

Таблица 1

Значения основных характеристик точности и взаимосвязи между погрешностями геометрических параметров и резонансной частотой детали.

Обозначение параметров	Средние значения $X_i$ в мм и $Z$ в кГц.	Стандартное отклонение	Дисперсия выборки	t-статистика	P-значение	Коэффициент корреляции $R_{ZX_i}$ и $R_{ZY_i}$
$X_1$	39,83	0,066	0,004	3,192	0,002	0,431
$X_2$	91,68	0,125	0,015	4,122	8,0633E-05	0,543
$X_3$	149,22	0,314	0,098	-6,531	3,3097E-09	-0,634
$X_4$	163,12	0,146	0,021	-2,311	0,023	-0,334
$X_5$	0,11	0,108	0,012	-2,648	0,009	-0,349
$Z$	2067,68	11,090	122,987	2,136	0,035	1
$Y_1$	632,1	46,186	2133,182	–	–	0,976
$Y_2$	630,61	61,602	3794,766	–	–	0,959
$Y_3$	300	65,129	4307,172	–	–	0,954

Из эксперимента были определены коэффициенты регрессии  $\alpha_i$  и значение параметра  $\alpha_0$ , соответствующее передаточным коэффициентам  $a_i$  и постоянной составляющей  $a_0$ :

$$\alpha_i = r_{ZX_i} \frac{S_Z}{S_{X_i}}, \quad \alpha_0 = \bar{Z} - \sum_{i=1}^5 \alpha_i \bar{X}_i. \quad (17)$$

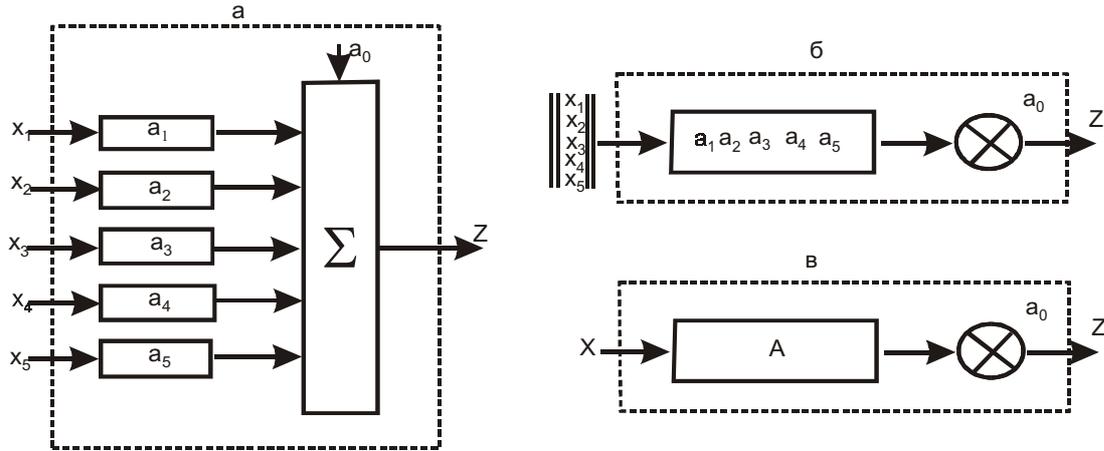


Рис. 1 Схемы связей между погрешностями геометрических параметров и резонансной частотой детали: а – структурная схема, б, в – эквивалентные матричные структурные схемы в развернутом и компактном видах

Их значения оказались равными:  $\alpha_1=35,69$ ;  $\alpha_2=25,21$ ;  $\alpha_3=-15,59$ ;  $\alpha_4=-11,33$ ;  $\alpha_5=-17,45$ ;  $\alpha_0=2510,42$ . Все найденные коэффициенты являются значимыми, так как расчетное значение t-критерия Стьюдента для всех коэффициентов больше критического  $t_{кр} = 1,987$ , найденного по таблице при доверительной вероятности 95% и числе степеней свободы  $n-2$ . Низкое значение P-значения для всех коэффициентов говорит о том, что предполагаемая линейная зависимость между переменными является значимой и выбранная модель является адекватной.

В конечном итоге получаем уравнения, позволяющие оценить точность определения прочностных свойств изделий по их резонансной частоте при заданных погрешностях геометрических параметров:

$$m_Z = 2510,42 + 35,69m_{X_1} + 25,21m_{X_2} - 15,59m_{X_3} - 11,33m_{X_4} - 17,45m_{X_5} \quad (23)$$

$$D_Z = 1274D_{X_1} + 635D_{X_2} + 243D_{X_3} + 128D_{X_4} + 304D_{X_5}. \quad (24)$$

Для определения влияния неучтённых технологических факторов на значение резонансной частоты общая дисперсия раскладывается на две составляющие:

$$D_Z = D_X + D_Y, \quad (25)$$

где  $D_X$  – дисперсия, вызванная погрешностями геометрических параметров;  $D_Y$  – дисперсия, измеряющая влияние неучтённых технологических факторов, характеризующая процесс изготовления и материал изделия. Эти дисперсии определяются по следующим выражениям:

$$D_X = \sum_{i=1}^5 \alpha_i^2 D_{X_i}, \quad D_Y = D_Z (1 - R_{ZX}^2), \quad (26)$$

где  $R_{ZX} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 r_{ZX_i}^2}$  – коэффициент множественной корреляции. Его величина оказалась равной 0,80.

Значения дисперсий  $D_Y$  и  $D_X$  равны 44,89 и 45,477 соответственно. С учетом найденного значения  $D_Y$  выражение (24) окончательно имеет вид:

$$D_Z = 44,89 + 1274D_{X_1} + 635D_{X_2} + 243D_{X_3} + 128D_{X_4} + 304D_{X_5} . \quad (27)$$

Удельный вес погрешностей геометрических параметров в совокупном влиянии всех факторов на резонансную частоту детали показан на рис.2.

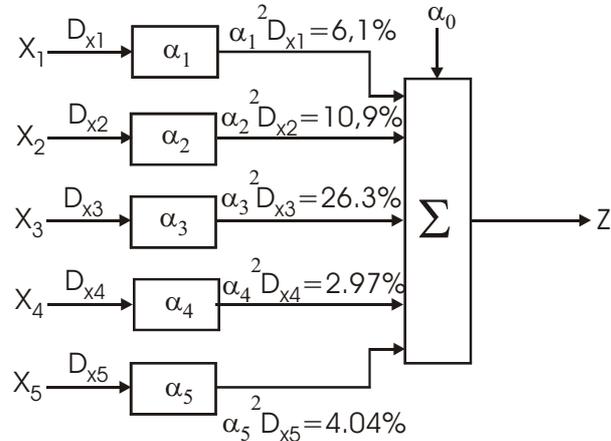


Рис.2 Удельный вес погрешностей геометрических параметров в совокупном влиянии всех факторов при резонансном методе неразрушающего контроля

Как видно, наибольшее влияние на значение частоты оказывает погрешность внешнего диаметра – 26,3%. Вследствие этого мероприятия по уменьшению колебаний значений резонансной частоты, соответствующей данным прочностным свойствам изделия, необходимо проводить прежде всего за счет уменьшения допуска на его внешний диаметр.

На основании полученной модели можно прогнозировать уменьшение колебаний резонансной частоты и, следовательно, повышения точности определения прочностных характеристик. Например, пусть в результате усовершенствования процесса изготовления изделия удалось уменьшить средние квадратичные отклонения параметров  $X_2$  и  $X_3$  втрое, то есть  $\sigma_{X_2} = 0,0415$  и  $\sigma_{X_3} = 0,1046$ . Расчет по формуле (27) даёт дисперсию суммарной погрешности резонансной частоты  $D_Z=60,48$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma_Z=7,78$  кГц, что на 3,3 кГц меньше, чем в исходном состоянии. Следовательно, такое уменьшение колебаний геометрических размеров  $X_2$  и  $X_3$  приводит к снижению разброса резонансной частоты в 1,42 раза.

Прочностные характеристики изделия определим с помощью нейронной сети многослойный персептрон. Для решения данной задачи построим трёхслойную сеть, в качестве входных параметров которой используем эмпирические данные, полученные в результате использования акустического и электромагнитного методов контроля, т.е., резонансную частоту автоциркуляции при распространении продольных волн, время распространения ультразвука при распространении поверхностных волн и коэрцитивную силу, определённую методом сдёргивания. При этом количество нейронов во входном слое будет равно количеству входных сигналов(3). Выходными параметрами сети будет являться одна из определяемых прочностных характеристик: предел прочности  $\sigma_B(Y_1)$ , предел текучести  $\sigma_{02}(Y_2)$  и твёрдость  $HRC(Y_3)$  исследуемого материала. Количество нейронов в выходном слое при этом примем равным количеству выходных сигналов(1). Количество нейронов в скрытом слое определим по методике, изложенной выше. Для обучения полученной сети создадим файл с числом обучающих примеров, равных 60. Контрольная выборка будет содержать 40 примеров.

В процессе обучения на вход сети последовательно поступают обучающие примеры, при этом сеть выдаёт некоторый результат, не обязательно верный. Градиент ошибки поступает на вход сети. После многократного предъявления примеров веса сети стабилизируются таким образом, что сеть даёт правильные ответы на все примеры из базы данных. В таком случае сеть можно считать обученной. Для определения качества работы обученной сети на вход подадим примеры из контрольной выборки и рассчитаем ошибку определения прочностных характеристик исследуемого материала. При обработке данных контрольной выборки были получены следующие результаты: среднее значение предела прочности  $\sigma_B = 627,05$  МПа, при этом средняя ошибка составила 6,37 МПа, среднее значение предела текучести  $\sigma_{02} = 623,2$  МПа при средней ошибке 6,93 МПа, среднее значение твёрдости HRC = 289,05 при средней ошибке 3,76. Расчетные значения совпали с экспериментальными в пределах допустимой ошибки.

**Выводы.** Практическая ценность предлагаемой методики по сравнению с известными состоит в следующем: данная методика способствует получению более достоверных и обоснованных результатов решения задачи определения прочностных характеристик металлов, так как механические характеристики определяются с учетом комплексного влияния большого количества косвенных факторов, влияющих на точность измерений прочностных характеристик. При этом уменьшается время обработки информации и, соответственно, увеличивается скорость контроля, что в свою очередь уменьшает трудоёмкость, а значит и стоимость контроля.

In article the decision of a problem of definition of strength characteristics of metals with use three-layer perceptron of a neural network is considered. The technique of processing of the multivariate data is developed with the purpose of noegenesis about mechanical characteristics of the metals, based on complex use of methods of mathematical statistics and a neural network multilayered perceptron. The practical value of an offered technique based on reception of more authentic results at smaller labour input of the control is shown.

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика безопасности.– Завод. лабор. Диагностика материалов.– 1998, №1, с. 16.
2. О. М. Карпаш, П. Я. Криничный, Я. Б. Даниляк, И. А. Молодецкий, М. О. Молчанов, В. К. Куций, В. О. Васьков. Стационарна установка “ЗОНД–СОТ” для автоматизованого комплексного неруйнівного контролю стальных труб. Киев.: Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 1999, №4, с. 80–83.
3. Криничный П. Я., Молодецкий И. А. Прилад для контролю фізико–механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГМА–5Т.–Методи та прилади контролю якості, 1997, №1.
4. С.А.Бабичев, А.В.Шарко, В.Л.Ульянов. – Акустический контроль прочностных свойств инструментальных сталей. Тезисы докладов 16-й Уральской региональной конференции «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами» Оренбург, 1996 г. стр. 44–45.
5. А.В.Шарко, С.А.Бабичев, В.Л.Ульянов. – О механизме взаимосвязи прочностных и акустических свойств конструкционных материалов. Тезисы докладов 3-й международной конференции «Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение». Г. Александров, 1997 г. стр. 180–182.
6. В. В. Муравьев Л. Б. Зуев К. Л. Комаров Скорость звука и структура сталей и сплавов. Наука, Новосибирск, 1996.
7. В. В. Круглов В. В. Борисов. Искусственные нейронные сети. Москва. Горячая линия – Телеком. 2001 г.
8. Е. М. Миркес. Нейрокомпьютер. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1998.

## АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОВНОГО ІНТЕРФЕЙСУ

Фаніна Л.О.

### **Введення.**

Мова є найбільш природною формою людського спілкування, тому реалізація інтерфейсу на основі аналізу мовної інформації являє собою перспективний напрямок розвитку інтелектуальних систем управління.

На перший погляд визначення мовного інтерфейсу може здаватися досить простим: людина вимовляє фразу, на яку технічна система реагує адекватно. Однак за досить простою ідеєю криються величезні складності, рішення яких знаходяться на стику багатьох галузей науки і розгадки таємниць функціонування людського інтелекту. Інтерес до даної проблеми виник досить давно, з появою обчислювальної техніки він спалахнув з новою силою. Мало кому відомо, що ще в 1939 році в Ленінградському державному університеті Л.Л. Мясніковим була продемонстрована перша у світі автоматична система розпізнавання мови (СРМ). В п'ятидесяті-шістдесяті роки, час романтики кібернетики, здавалося, що з комп'ютером можна буде спілкуватися за допомогою мови вже через 10-15 років, у кінці вісімдесятих років – рішення проблеми затяглося ще на десятиліття. Як можна побачити, безпосереднє впровадження мовного інтерфейсу в повсякденне життя звичайного користувача поки відкладається. Однак не можна недооцінювати наявний у даний час деякий прогрес, постійно збільшується попит на продукти мовної технології. Програми і системи, що володіють засобами мовного введення інформації, одержують усе більше поширення, але, з огляду на всі недосконалості, варто розглядати перспективи розвитку вузькоспрямованих або спеціалізованих систем, що мають чітке застосування:

- Управління системами життєзабезпечення для людей з обмеженими фізичними можливостями та побудови систем інтелектуалізації житла, так звані SmartHome.
- Впровадження голосового вводу інформації у компактні мобільні термінали та міні комп'ютери.
- Розробка інформаційно-довідкових служб різного призначення, в яких клієнт запитує довідки, данні, що його цікавлять й одержує інформацію в мовній або іншій формі; телефоні лінії підтримки клієнтів, електронна комерція.
- Автоматизовані системи заповнення анкет та шаблонних інформаційних листів.
- Розробка на сучасних технологіях пошуку в інформаційних мережах мовної інформації по заданих ключових словах або проблематиці.
- Можливість створення робота-мікроскопу для проведення тонких хірургічних утручань, коли лікар не відволікаючись від розглядання через мікроскоп хірургічного поля, може керувати рухом та налаштуванням мікроскопу.
- Можливість використання технології розпізнавання та розуміння мовної інформації для створення автоматичних систем перекладу з одної мови на іншу, що працює у реальному часі.
- Створення комплексу програмних засобів для відтворення спотворених та зашумлених мовних повідомлень.

**Постановка задачі.**

Задача розпізнавання мови складається в точному й ефективному відтворенні вимовленого мовного сигналу  $s(n)$ . У загальному випадку, її рішення полягає в послідовному порівнянні з еталонами, що задані словником системи розпізнавання мови.

Схематично процес розпізнавання можна представити так:



Рис. 1 Концептуальна схема розпізнавання мови

Таким чином, невідомому висловленню  $W$ , що задано вектором ознак  $X$ , буде поставлена у відповідність послідовність моделей  $W$ . Знайдена послідовність повинна мати найбільшу апостеріорну імовірність. Відповідно можна використати формулу Байєса, що дозволяє представити апостеріорну імовірність  $P(W_i|X)$  як

$$W = \arg \max_W P(W_i|X) = \arg \max_W \frac{P(X|W_i)P(W_i)}{P(X)}$$

Розрахунок апостеріорної імовірності розбивається на два етапи: розрахунок функції правдоподібності  $P(X|W_i)$  при заданій моделі  $W_i$ , що залежить від акустичних даних, та оцінка апіорної імовірності  $P(W_i)$ . На етапі розпізнавання  $P(X)$ , як правило, є константою,  $P(W_i)$  легко визначається на основі лінгвістичного аналізу мови, тому основна складність полягає в визначенні функції  $P(X|W_i)$  [1].

Для визначення векторів ознак  $X$  використовуються різноманітні методи первинної обробки мовних сигналів, що як і підходи до побудови декодерів й методи прийняття рішень протягом часу змінювались.

Основні тенденції побудови і розвитку систем розпізнавання мови можна представити як

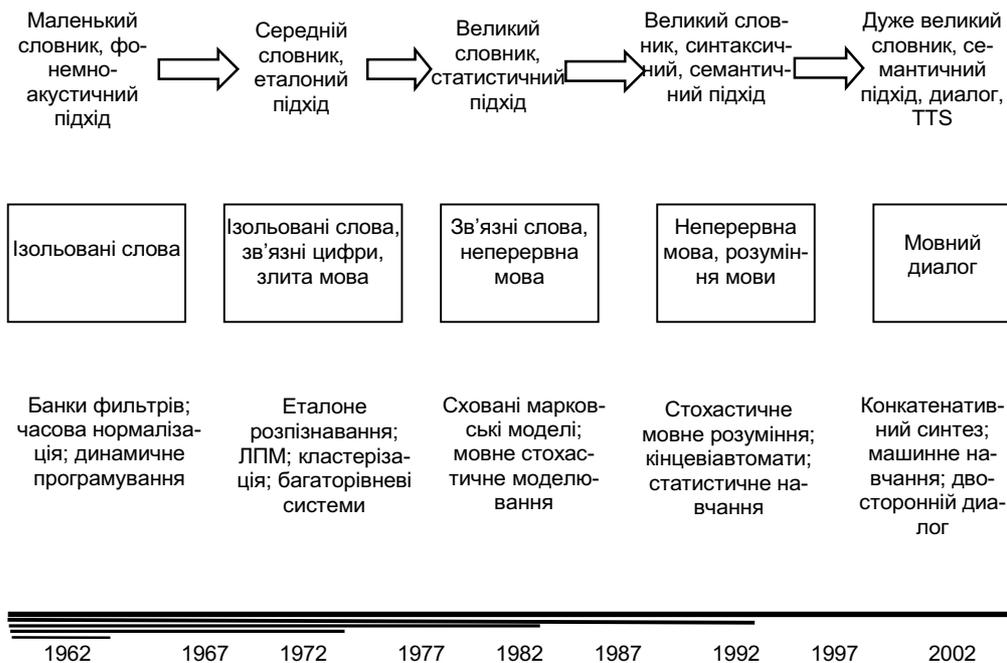


Рис. 2 Етапи розвитку СРМ

Розглянемо основні підходи до реалізації систем автоматичного розпізнавання мови.

### **Первинна обробка мовних сигналів.**

Полягає у виділенні значимої для розпізнавання інформації, усунення варіантності, як диктора, так і навколишнього середовища, стиснення сигналу.

Методи аналізу мовних сигналів, тобто безпосереднього виділення ознак, поділяються на три групи [2].

1. Параметричні методи, що засновані на представленні мовного сигналу як реалізації деякого процесу в часі і виділення яких-небудь параметрів цього процесу, найчастіше пов'язаних з його спектральними характеристиками:

- спектрально-полосні методи;
- ортогональні методи;
- кореляційні методи;
- метод обчислення спектра за допомогою швидкого перетворення Фур'є;
- методи лінійного передбачення мови (ЛПМ);
- методи, пов'язані з виділенням  $p$ -параметра (миттєвої частоти переходів через нуль);
- часові методи, засновані на аналізі розподілу тривалості інтервалів між переходами через нуль або екстремумами мовного сигналу;
- використання нелінійного перетворення і фазові співвідношення мовного сигналу;
- застосування вейвлет-перетворення для моделювання мовних сигналів.

2. Фонетичні методи, які спираються на теорію мовотворення. Суть їх полягає у виділенні ознак, що характеризують спосіб артикуляції. Фонетичні методи аналізу мовних сигналів можуть розглядатися як перший рівень розпізнавання мови, тому що більшість з них засновано на деяких перетвореннях первинних ознак мовних сигналів.

3. Неакустичні методи. Вони по своїй меті примикають до фонетичних і складаються у виділенні інформації про процеси, що супроводять артикуляцію.

### **Еталонне розпізнавання.**

Цей метод заснований на порівнянні деяких характеристик мови (енергетичних, спектральних тощо). В більшості випадків за еталони приймаються цілі слова. Даний метод зручний для використання в системах з обмеженим словником (наприклад, командні системи).

Прикладом реалізації таких систем можна розглядати найпростіші (кореляційні) детектори. На рис. 3 представлена структурна схема обробки мовного сигналу в системі розпізнавання мови на основі кореляційного аналізу [3].

Після визначення моментів початку і закінчення слів на основі методів обробки в часовій області оцінюються перші вісім коефіцієнтів кореляції зі швидкістю 67 разів/с. Для компенсації перекручування спектра, обчислюється усереднений спектр на великому інтервалі часу, що досягалося усередненням коефіцієнтів кореляції по усій фазі і припасуванням до усередненого по фазі спектрові двополюсної моделі. Параметри двополюсної моделі використовуються для побудови зворотного фільтра. Середній по фазі спектр потім нормується по входу шляхом згортки початкових і коефіцієнтів кореляції імпульсної характеристики зворотного фільтра. Перші шість нормованих автокореляційних коефіцієнтів використовуються потім як для створення еталонних зразків, так і для розпізнавання.

Після нормалізації спектра починається процедура розпізнавання. Невідома фраза порівнюється з кожним еталоном з наявних у файлі. Порівняння відбувається на основі міри розрізнення в просторі параметрів лінійного передбачення мови. Ця міра використо-

ується і для динамічного узгодження часового масштабу вхідної фрази при мінімізації відстані з кожної з еталонних фраз.

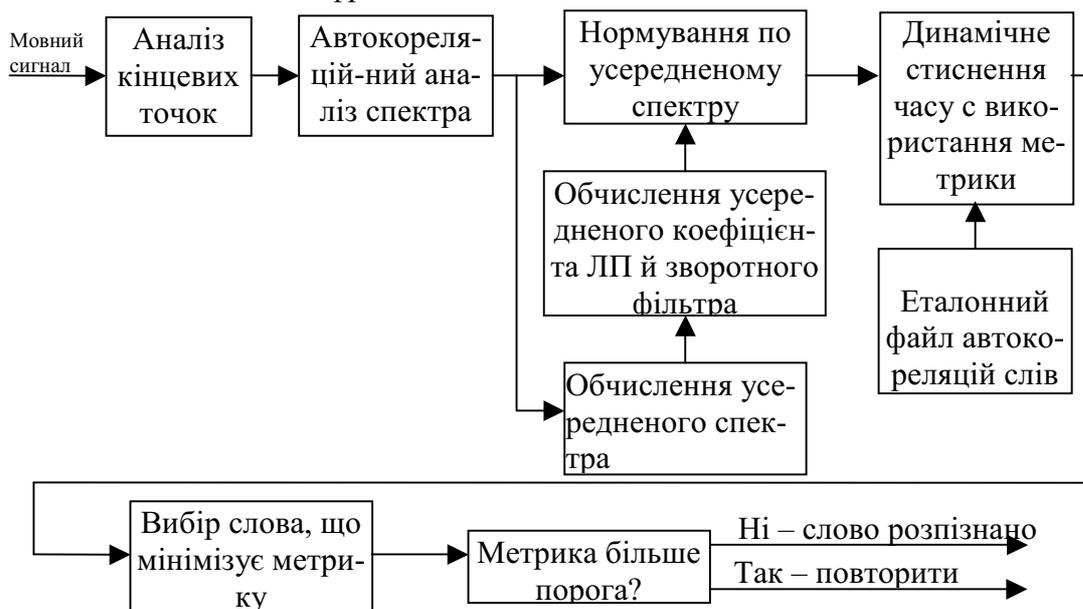


Рис. 3 Структурна схема СРМ на основі кореляційного аналізу

На основі обчислення відстаней до кожного слова зі словника вибирається те слово, для якого отримана мінімальна відстань. Якщо абсолютне значення відстані перевищує деякий поріг, то рішення не приймається. У цьому випадку вибирається інше слово з мінімальною відстанню, воно приймається як рішення і надходить на вихід системи розпізнавання.

Ця система досліджувалася [3] з використанням двох різних словників (обсягом приблизно 120 слів) і давала 97.3% правильного розпізнавання слів, однак не відрізнялася високою швидкістю і вимагала тривалого і ретельного навчання.

### Багаторівневий фонемно-орієнтований метод.

Заснований на виділенні фонем з потоку мови.

Текст, як відомо, складається з букв, слів, речень, - тобто він дискретний. Мова ж у нормальних умовах звучить разом. Людська мова, на відміну від тексту, зовсім не складається з букв. Відомо, що це слово "мама" складається з чотирьох букв, однак на фонограмі (рис. 4) чітко видно, що насправді, воно складається не з чотирьох, а тільки з двох звуків: очевидно, це ті звуки, які можна виразити складами "ма" і "ма".

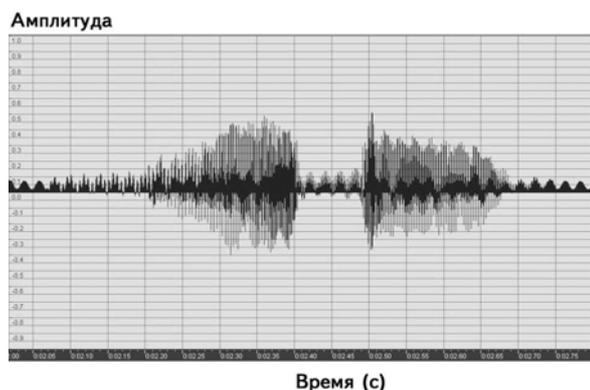


Рис. 4 Фонограма слова "мама"

Люди вже досить давно догадалися про те, що елементарні звуки, з яких складається мова, не еквівалентні буквам. Тому ввели поняття фонем для позначення елементарних звуків мови. Хоча дотепер фахівці ніяк не можуть вирішити - скільки ж усього різних фонем існує. У лінгвістичній науці є цілий розділ - фонетика. Для кожної мови існує свій кінцевий набір фонем. В українській мові по одним біля 40 фонем, по іншим - більш сотні.

Розглянемо модель побудови системи розпізнавання мови заснованої на фонемно-орієнтованому підході (рис.5).

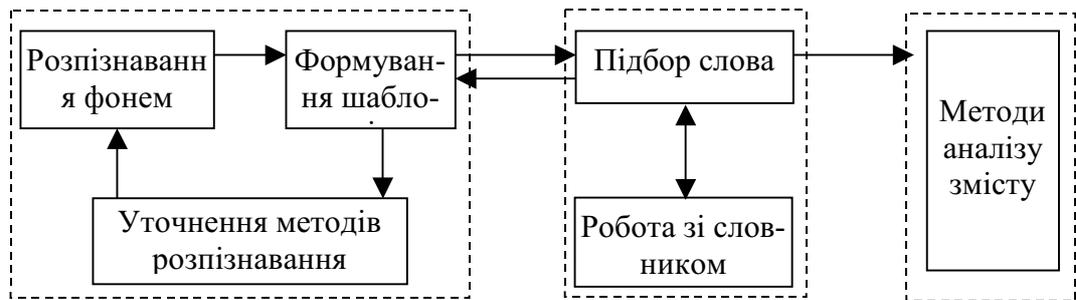


Рис. 5 Модель фонемно-орієнтованої СРМ

Зі списку фонем розпізнаних з визначеною точністю, складається шаблон, що передається на наступний рівень, де по ньому відбувається підбір найбільш підходящого слова і передача інформації про вибір на більш високий рівень для подальшого аналізу і на нижній, для підстроювання системи на конкретного користувача. Перевагою такої моделі побудови є висока адаптивність, що дає можливість динамічного самопідстроювання системи на диктора, і багаторівнева система перевірок, що підвищує точність роботи [4].

**Експертні системи.**

Системи з різними засобами формування й обробки бази знань.

Прикладом побудови таких систем може послужити система ROBOTRON, яка зображена на малюнку 6.

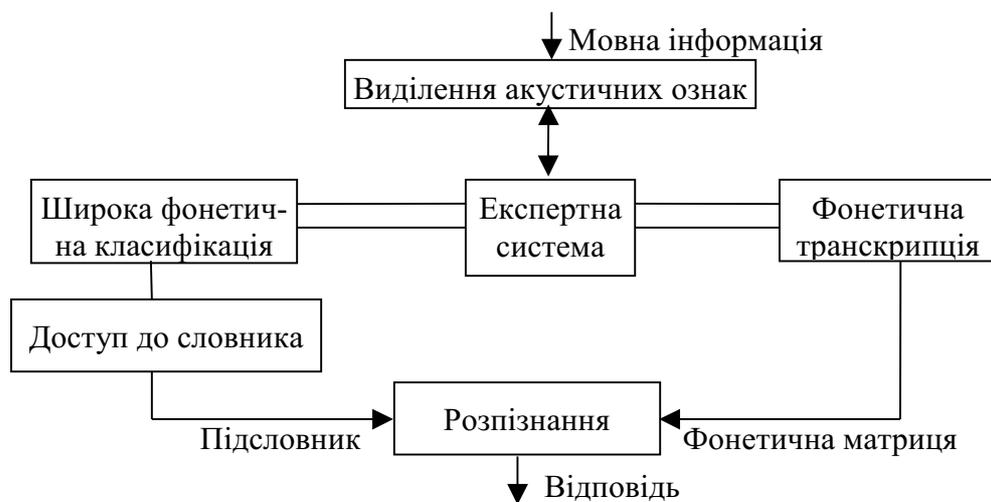


Рис. 6 Схема блоку розпізнавання системи ROBOTRON

Система розроблена в інституті інформатики Дрездена [5] й призначена для розпізнавання зливої мови. Вона дозволяє оброблювати мовну послідовність слів з необмеже-

ною тривалістю без додаткової інформації о межах слів. Розроблена для дослідження та оптимізації процесів розпізнавання мови і навчання.

Складається з аналізатора, математичного забезпечення, блоку стиснення інформації, блоку розпізнавання та алгоритму навчання.

Але побудова й обробка суцільно баз знань не є максимально ефективними, що до вирішення проблем розпізнавання, тому доводиться знаходити інші математичні підходи.

**Сховані марковські моделі.**

В даний час є одним з найбільш ефективних підходів до побудови систем автоматичного розпізнавання мови.

Той факт, що мова призначена для передачі, а отже, і для захисту інформації, дозволяє розглядати її як деякий код, а мовний потік – як послідовність деяких кодових пакетів. Неважливо, що є елементом цього коду – фонема, склади або цілі слова, значення має лише те, що імовірність появи будь-якого елемента коду залежить від деякого числа попередніх елементів. Таким чином, мова породжується марковським джерелом, а мовний код є випадковим. Для реалізації цього підходу застосовується так звана „схована марківська модель” (Hidden Markov Model)  $\lambda = (A, B, \pi)$ , в які дозволяються переходи тільки у наступний чи поточний стан.

Схованою марківською моделлю (СММ) зветься марківський процес, що не спостерігається безпосередньо. Результати дії цього процесу спотворюються випадковим процесом і лише після цього стають доступними для спостережень. Параметрами схованої марківської моделі є:

- можливі стани процесу;
- ймовірність переходу з одного стану в інший;
- ймовірність спотворення стану, що спостерігається.

Загальна теорія схованих марківських моделей може бути легко адаптована для рішення окремих задач розпізнавання мови. Конкретні вимоги й умови кожної задачі знімають або, навпаки, додатково накладають деякі обмеження на СММ, що дозволяє у визначених межах варіювати обчислювальну складність системи і вибирати найбільш ефективний алгоритм навчання моделі. Адекватність СММ мовному сигналові досягається за рахунок удалого вибору стаціонарних ділянок сигналу і визначення відповідних розподілів імовірності векторів ознак [1].

Розглянемо систему розпізнавання мови побудовану на застосуванні СММ із використанням кодової книги (рис. 7).

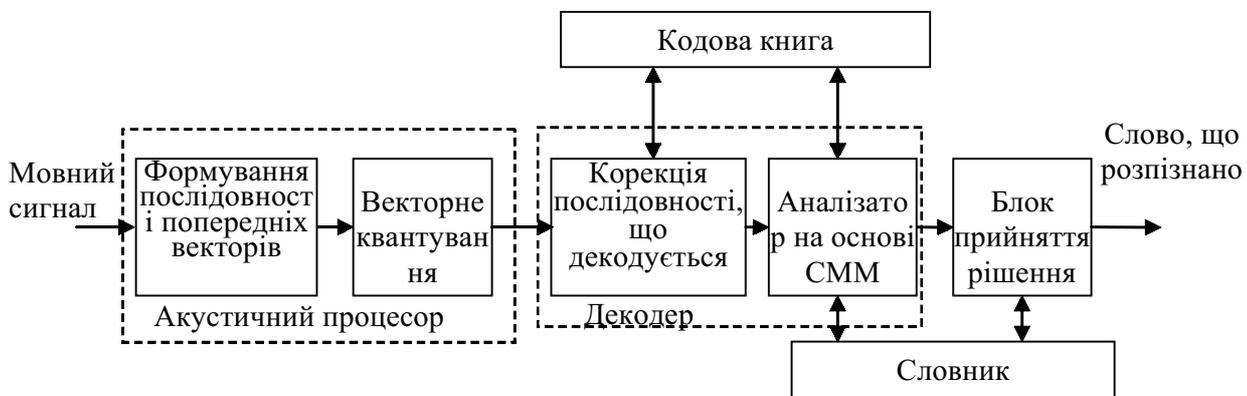


Рис. 7 Система розпізнавання мови на основі СММ

Акустичний процесор виконує задачі дискретизації, попередньої обробки й виділення характерних ознак, тобто перетворює акустичний мовний сигнал в набір характери-

стичних векторів, що в наступному використовуються для побудови кодової книги, навчання СММ та безпосередньо розпізнавання.

Декодер здійснює розрахунок найбільш імовірних слів, що відповідають послідовності кластерів, які отримані на виході акустичного процесору. При цьому кожному слову відповідає власна марківський ланцюг з  $N$  станів і вимог переходу між ними. Робота декодера здійснюється в безпосередньому зверненні до кодової книги (набору обмеженої кількості еталонних ознак, що є словами кодової книги), згідно алгоритму розпізнавання. В якості алгоритму розпізнавання обрано алгоритм послідовного декодування із поверненнями, що реалізує максимум правдоподібності. Ймовірності символів, що спостерігаються, визначаються функцією розподілу, в той час як імовірності переходу із одного стану в інший задаються дискретними значеннями з матриці розподілу. Процес розпізнавання полягає на застосуванні алгоритму Вітербі (цей алгоритм є варіантом методу динамічного програмування для ланцюгів Маркова, він складається з прямого та зворотного проходів).

Переваги алгоритму: він дозволяє досягти компромісу між об'ємом пам'яті, що вимагається й кількістю обчислень, за рахунок визначення на кожному кроці функції правдоподібності та порівняння її з граничним значенням. Тестування таких систем із словником з 50 слів, що промовляються різними дикторами, які не приймали участі в процесі настрійки та навчання системи, доводить вірогідність розпізнавання не нижче 78%.

### Нейронні мережі.

Метод використовує ймовірносно-мережеві моделі ухвалення рішення, у тому числі нейронні мережі. При даному підході будь-який мовний сигнал можна представити як вектор у параметричному просторі, потім цей вектор може бути зафіксовано у нейромережі. Одна з моделей нейромереж, що навчаються без учителя – це карта ознак Кохонена, що самоорганізується. У ній для множини сигналів формуються нейронні ансамблі, що представляють ці сигнали. Цей алгоритм має здатність до статичного усереднення, тобто вирішується проблема з варіантністю мови. Багато нейромережевих алгоритмів здійснюють рівнобіжну обробку інформації, тобто одночасно обробляють усі нейрони. Тим самим вирішується проблема зі швидкістю розпізнавання – звичайний час роботи нейромережі складає декілька ітерацій. На основі нейромереж легко будуються ієрархічні багаторівневі структури, при цьому зберігається їхня прозорість (можливість їхнього розподільного аналізу). Використання систем нейромереж, що самоадаптуються, дозволяє уникнути недоліків "некерованої" класифікації, що виявляються при використанні несупервизорних нейромережевих алгоритмів. Нижче на рис.8 приведена структура системи з використанням мереж із самостійною адаптацією для розпізнавання слів людської мови, розробленої в Красноярському інституті біофізики Російської Академії Наук [6].

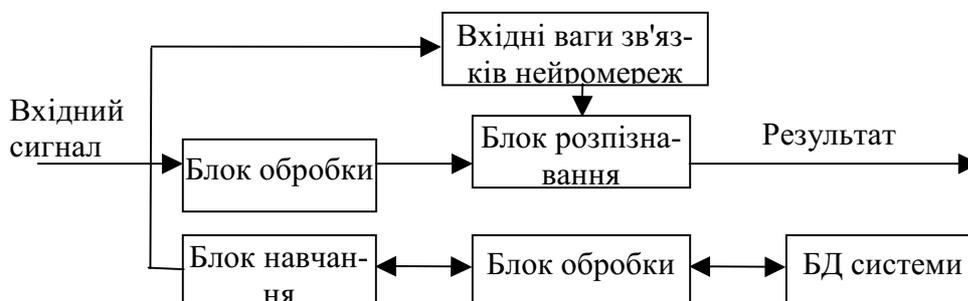


Рис. 8 Загальна схема СРМ з використанням нейромереж

Блок розпізнавання і блок навчання містять по дві нейромережі кожний. В цій роботі розглядається можливість побудови комплексу нейронних мереж з самостійною адаптацією, що навчаються по кінцевому результату.

Нейромережа має досить просту структуру і складається з трьох рівнів: вхідний шар, символний шар та ефекторний шар. Кожний нейрон наступного шару пов'язан з усіма нейронами попереднього шару. Функція передачі в усіх шарах є лінійною; а вхідному шарі моделюється конкуренція.

Навчання системи в цілому складається з трьох етапів. Спочатку системі пред'являються тільки зразки звуків, при цьому на вхідному шарі формуються нейронні ансамблі, ядрами яких є ці зразки. Потім пред'являються звуки і відповідні їм символи алфавіту, при цьому здійснюється асоціація нейронів вхідного рівня з нейронами символного рівня. На останньому етапі система навчається й адаптується.

### **Перспективи розвитку мовного інтерфейсу.**

Сьогодні самими складними елементами побудови систем розпізнавання мови є найперше алгоритми відтворення послідовності вимовлених слів, визначення ефективної інваріантної акустичної моделі й формування мовних моделей для тих, чи інших мов, що потребує багаторічної праці спеціалістів різних галузей науки: інженерів-акустиків, дослідників мовних технологій, нейрофізіологів, лінгвістів.

На акустичному рівні дуже важливим є якісне й водночас досить компактне представлення звукового сигналу в багатомірному просторі ознак, що містять значиму для розпізнавання інформацію. Для побудови векторів ознак використовуються методи спектрального аналізу (лінійне передбачення мови, гомоморфний аналіз), однак вони мають ряд недоліків. Для створення акустичної моделі сигналу пропонується використання вейвлетного базису, що має ряд переваг перед перетворенням Фур'є: локалізація в тимчасовій і частотній області, можливість масштабного перетворення і зсувів, відображення локальних особливостей сигналу. Вейвлет-перетворення може використовуватися як для акустичного представлення сигналів, так і для їхньої фільтрації.

Нейромережі дуже якісно й швидко виконують задачі класифікації, за рахунок паралельної обробки усіх нейронів. Можна отримати кореляцію інформації, що надходить на вхід мережі (подібний процес відбувається в слуховому аналізаторі людини), чого важко досягти при використанні СММ. До переваг нейромереж можна віднести відносно простий процес навчання, можливість самонавчання та адаптації, а також можливість використання генетичних алгоритмів.

Ефективність використання статистичного підходу – схованих марківських моделей для встановлення послідовностей слів безперечна, що підтверджує історія відкриття марківських процесів (Марків розробив свою теорію аналізуючи текст твору О.С. Пушкіна „Євгеній Онегін”). Однак існує ряд обмежень цього підходу, які можливо частково компенсувати за рахунок використання нейромереж, також можливо звузити область пошуку гіпотез.

Таким чином можна створити більш ефективну систему розпізнавання мови, об'єднавши нейромережовий підхід, сховані марківські моделі й вейвлетне перетворення, використовуючи їх переваги.

Треба зазначити, особливість сприйняття мови людиною – він не все те чує, що сприймає, більшість інформації він домислює. Отже потрібно створювати системи розпізнавання мови наділені властивостями інтелекту людини. Перші кроки до цього вже робляться.

В наступному можна очікувати появу не тільки систем мовного діалогу, а й створення інтерпретаторів, спроможних вірно передати зміст й семантичне наповнення створеного мовного повідомлення чи інформації отриманої в умовах наявності стаціонарних й нестаціонарних перешкод.

Незважаючи на велику зацікавленість багатьох науковців дослідження й розробка мовного інтерфейсу потребує підтримки з боку державних установ і корпорацій з випуску програмного забезпечення й комп'ютерного устаткування з іншого.

Article is devoted to the decision of a problem of recognition of speech which consists in exact and effective reproduction of the made language signal. The basic types of systems of recognition of speech and approaches to their construction are considered.

1. Е.И. Бовбель, И.Э. Хейдеров. Статистические методы распознавания речи: скрытые Марковские модели //зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998 №3, с. 45-65.
2. Плотников В.П. Речевой диалог в системах управления. –М.: Машиностроение, 1998.
3. Рабинер Р.Л. цифровая обработка речевых сигналов. – М.: Радио и связь, 1989.
4. On-line session on [http: //magazin.stankin.ru/arch/h\\_02/automation](http://magazin.stankin.ru/arch/h_02/automation)
5. Потапова Р.К. Речевое управление роботом. –М.: Радио и связь, 1989.
6. Лалетин П.А., Ланкина Э.Г., Ланкин Ю.П., Использование сетей с самостоятельной адаптацией для распознавания слов человеческой речи// Научная сессия МИФИ-2000. II Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2000». Сборник научных трудов. В 2 частях. Ч.2. – М.: МИФИ, 2000. – с. 88-95

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.3

### ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ КОРПОРАТИВНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Бараненко Р.В., Козел В.Н., Дроздова Е.А., Плотников А.О.

#### **Постановка проблемы**

Одним из важных факторов ускорения научно-технического прогресса является широкое внедрение современных информационных технологий в сферу образования, транспорта, медицины и другие отрасли, тем самым увеличивая общую информатизацию страны.

На сегодняшний день одним из основных критериев деятельности любой организации является своевременность получения и предоставления информации для принятия правильных решений, т.е. скорость обмена данными.

Для оптимизации процесса обмена данными в корпоративных компьютерных сетях уже недостаточно увеличивать скорость передачи данных, необходимо использовать программное обеспечение, реализующее алгоритмы поиска оптимальных маршрутов между подсетями с учетом пропускной способности сети.

При необходимости получения кратчайшего пути между подсетями в корпоративной сети в случае, если существует конечное множество возможных путей, возникает задача поиска кратчайшего пути.

#### **Анализ последних исследований**

Существующие алгоритмы поиска кратчайшего пути [1-3] сложны для программной реализации, обладают большой вычислительной сложностью и не обеспечивают необходимой скорости поиска в случае корпоративных сетей с большим числом подсетей и связей между ними.

#### **Цель статьи**

Целью работы является разработка простого для программной реализации и быстродействующего алгоритма поиска кратчайшего пути между подсетями в корпоративной сети, разработка математической модели процесса поиска кратчайшего пути и на их основе создание программного обеспечения для оптимизации работы корпоративных компьютерных сетей.

#### **Основной материал**

Задача поиска кратчайшего пути между подсетями в корпоративной компьютерной сети является задачей выбора оптимального маршрута и моделируется с помощью графов (рис.1).

Задача о кратчайшем пути на графе в общем виде может быть сформулирована следующим образом [4]. Дан неориентированный граф  $G(V, U)$ . Каждому ребру этого графа приписано некоторое число  $l(u) \geq 0$ , называемое длиной ребра. В частных случаях  $l(u)$  может быть расстоянием между вершинами, соединяемыми ребром  $u$ , временем или стоимостью проезда по этому ребру и т. п. При этом любая цепь  $\mu$ , будет характеризоваться длиной

$$l(\mu) = \sum_{u \in \mu} l(u), \quad (1)$$

Требуется для двух произвольных вершин  $a$  и  $b$  графа  $G$  найти путь  $\mu_{ab}$ , причем такой, чтобы его полная длина была наименьшей. Исходя из этого, задачу можно представить как задачу оптимизации.

Задача оптимизации формулируется в общем виде [5], когда заданы множество  $X$  и функция  $f(x)$ , определенная на  $X$ ; и требуется найти точки минимума функции  $f$  на  $X$ , получаем следующую запись:

$$f(x) \rightarrow \min, x \in X, \quad (2)$$

При этом  $f$  называется *целевой функцией*,  $X$  – *множеством решений*, любой элемент  $x \in X$  – *решением* задачи.

Необходимо найти точку глобального минимума функции  $f$  на множестве  $X$  такую, что

$$f(x^0) = \min_{x \in X} f(x), \quad (3)$$

Эта задача решается с помощью методов исследования операций и средств теории принятия решений [5-7].

Задачу выбора маршрута из нескольких возможных на практике решают маршрутизаторы – устройства, собирающие информацию о топологии межсетевых соединений и на ее основании пересылающие пакеты сетевого уровня в сеть назначения. С точки зрения компьютерных сетей маршрут – это последовательность маршрутизаторов, которые должен пройти пакет от отправителя до пункта назначения. Маршрутизаторы хранят информацию о топологии сети в специальных информационных структурах – таблицах маршрутизации, которые автоматически строятся в соответствии с протоколом маршрутизации. Протоколы маршрутизации могут быть построены на основе разных алгоритмов, отличающихся способами построения таблиц маршрутизации, способами выбора наилучшего маршрута и другими особенностями своей работы [8].

Для поиска кратчайшего маршрута предлагается использовать алгоритм SPF (Shortest Path First), разработанный Дейкстрой [9]. В соответствии с этим алгоритмом кратчайший путь между вершинами графа равен [3]:

$$u_j = \min\{u_i + d_{ij}\}, \quad (4)$$

где  $d_{ij}$  – расстояния в сети между смежными узлами  $V_i$  и  $V_j$ ;

$u_j$  – кратчайший путь между «источником» -  $S$  и  $V_j$  -  $j$ -ым узлом;

$u_i$  – кратчайший путь между «источником»  $S$  и  $V_i$  - предыдущим узлом в сети.

Разработанная программная реализация алгоритма представлена в [10].

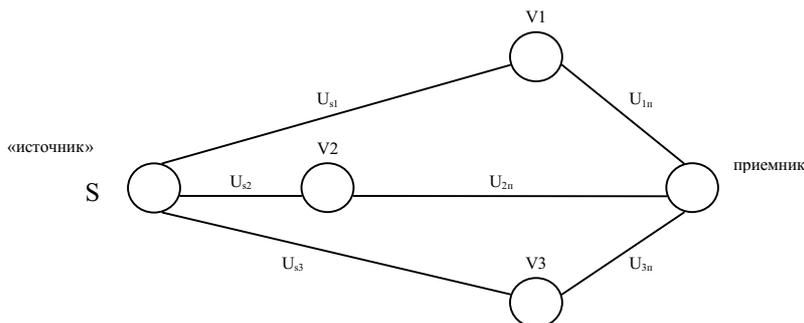


Рис. 1 Граф расстояний между подсетями в корпоративной компьютерной сети

Для больших гетерогенных сетей реализацией алгоритма SPF является протокол OSPF (Open Shortest Path First) [8, 11, 12]. В OSPF процесс построения таблицы маршрутизации разбивается на два крупных этапа. На первом этапе каждый маршрутизатор строит граф связей сети, в котором вершинами графа являются маршрутизаторы и IP-сети, а ребрами — интерфейсы маршрутизаторов. Все маршрутизаторы для этого обмениваются со своими соседями той информацией о графе сети, которой они располагают к данному моменту времени. Второй этап состоит в нахождении оптимальных маршрутов с помощью полученного графа. Каждый маршрутизатор считает себя центром сети и ищет оптимальный маршрут до каждой известной ему сети. В каждом найденном таким образом маршруте запоминается только один шаг — до следующего маршрутизатора, в соответствии с принципом одношаговой маршрутизации. Данные об этом шаге и попадают в таблицу маршрутизации. Задача нахождения оптимального пути на графе является достаточно сложной и трудоемкой [1-4].

Алгоритм SPF, основываясь на базе данных состояния связей, вычисляет кратчайшие пути между заданной вершиной  $S$  графа и всеми остальными вершинами. Результатом работы алгоритма является таблица, где для каждой вершины  $V$  графа указан список ребер, соединяющих заданную вершину  $S$  с вершиной  $V$  по кратчайшему пути.

Пусть

$S$  - заданная вершина (источник путей);

$E$  - множество обработанных вершин, т.е. вершин, кратчайший путь к которым уже найден;

$R$  - множество оставшихся вершин графа (т.е. множество вершин графа за вычетом множества  $E$ );

$O$  - упорядоченный список путей.

Предлагаемый алгоритм состоит из повторяемых выполнений следующих шагов:

1. Инициализировать  $E=\{S\}$ ,  $R=\{\text{все вершины графа, кроме } S\}$ . Поместить в  $O$  все односегментные (длиной в одно ребро) пути, начинающиеся из  $S$ , отсортировав их в порядке возрастания метрик.

2. Если  $O$  пуст или первый путь в  $O$  имеет бесконечную метрику, то отметить все вершины в  $R$  как недостижимые и закончить работу алгоритма.

3. Рассмотрим  $P$  - кратчайший путь в списке  $O$ . Удалить  $P$  из  $O$ . Пусть  $V$  - последний узел в  $P$ .

Если  $V$  принадлежит  $E$ , перейти на шаг 2; иначе  $P$  является кратчайшим путем из  $S$  в  $V$ ; перенести  $V$  из  $R$  в  $E$ .

4. Построить набор новых путей, подлежащих рассмотрению, путем добавления к пути  $P$  всех односегментных путей, начинающихся из  $V$ . Метрика каждого нового пути равна сумме метрики  $P$  и метрики соответствующего односегментного отрезка, начинающегося из  $V$ . Добавить новые пути в упорядоченный список  $O$ , поместив их на места в соответствии со значениями метрик. Перейти на шаг 2.

Протокол OSPF разрешает хранить в таблице маршрутизации несколько маршрутов к одной сети. Если такие записи образуются в таблице маршрутизации, то маршрутизатор реализует режим баланса загрузки маршрутов (load balancing), отправляя пакеты попеременно по каждому из маршрутов.

К недостаткам протокола OSPF следует отнести его вычислительную сложность, которая быстро растет с увеличением размерности сети, то есть количества сетей, маршрутизаторов и связей между ними. Для преодоления этого недостатка в протоколе OSPF вводится понятие области сети (area). Маршрутизаторы, принадлежащие некоторой области, строят граф связей только для этой области, что сокращает размерность сети. Между областями информация о связях не передается, а пограничные для областей марш-

рутизаторы обмениваются только информацией об адресах сетей, имеющих в каждой из областей, и расстоянием от пограничного маршрутизатора до каждой сети [8].

Протокол OSPF обладает высокой вычислительной сложностью, поэтому чаще всего работает на мощных аппаратных маршрутизаторах.

### Выводы

Предложены математическая модель процесса поиска кратчайшего пути между подсетями в корпоративных компьютерных сетях, алгоритм поиска кратчайшего пути, разработана программная реализация алгоритма. Приведены рекомендации и обоснования использования протокола, реализующего данный алгоритм поиска кратчайшего пути. С применением данного протокола достигается оптимизация работы корпоративных компьютерных сетей и реализуется режим баланса загрузки маршрутов.

In given article the questions of optimization of job of corporate computer networks are considered, the basic principles of construction of such networks are formulated and the algorithm of optimization of their job is offered.

1. Ю.Н. Бардачев, Н.А. Соколова, В.Е. Ходаков / Под редакцией В.Е. Ходакова. Основы дискретной математики: учебное пособие – Херсон: Издательство ХГТУ – 2000. – 356 с.
2. Оре О. Теория графов. – М.: Наука, 1968.
3. Гудман С., Хидитмиами С. Введение в разработку и анализ алгоритмов. – К.: Вища школа, 1985. – 350с.
4. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 424 с., ил.
5. Петров Э.Г., Новожилова М.В., Гребенник И.В., Соколова Н.А. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах. Учебное пособие /Под общей редакцией Э.Г. Петрова – Херсон: ОЛДІ – плюс, 2003. – 380 с.
6. Зайченко Ю.П. Исследование операций. – К.: Вища школа, 1986.
7. Горелик В.А., Ушаков И.А. Исследование операций. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
8. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2001. – 672 с.: ил.
9. Dijkstra E. Cooperating Sequential Processes. Technological University, Eindhoven, The Netherlands, 1965. (Reprinted in Great Papers in Computer Science, P. Laplante, ed. New York, NY: IEEE Press, 1996).
10. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №7258, “Комп’ютерна програма пошуку найкращого маршруту між двома вершинами графа “ShorW”. Автори: Р.В. Бараненко, Д.В. Санін, А.Г. Степаненко, А.С. Шаповалов. Опубл. 06.03.2003.
11. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. Пятибратов и др. – ФИС, 1998.
12. Высокопроизводительные сети. Энциклопедия пользователя. Марк А. Спортак и др.; перев. с англ. – К.: ДиаСофт, 1998.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Кухаренко С.В., Балтовский А.А.

### **Введение.**

Основной задачей планирования производства является расчет оптимального плана выпуска продукции с учетом основных факторов, влияющих на его объем. В зависимости от условий и характера производства к таким факторам можно отнести общественные потребности в данном продукте, наличие сырьевых и энергетических ресурсов, производственные возможности, обеспеченность трудовыми, финансовыми и другими ресурсами. Поэтому разработка комплексов эвристических алгоритмов, для решения задач календарного планирования является весьма актуальной.

Формирование основных направлений научно-технической политики в области планирования производства продукции в течении последних лет находится в центре внимания правительства Украины, о чем свидетельствуют государственные программы, которые сформулированы в рамках государственной научно-технической программы №7 „Перспективные информационные технологии, устройства комплексной автоматизации системы связи” (Постановление Верховного Совета Украины от 16.10.1992г.).

### **Анализ предшествующих публикаций.**

В работе [1] авторы указывают, что для задач календарного планирования (КП), а также других задач, имеющих комбинаторную природу, характерен неполиномиальный рост времени решения с ростом размерности задачи. С этим связаны основные трудности построения систем КП реальных производств, имеющих как правило размерность выше средней. Проблема становится еще острее при переходе к КП единичных многономенклатурных производств. Это делает невозможным применение точных методов при решении задач КП реальных производств.

В работе [2] авторы отмечают, что для КП практическое применение находят в основном методы, базирующиеся на ограниченном переборе множества допустимых решений. Этим обусловлен интерес разработчиков систем КП к эвристическим методам решения задач, среди которых широко известен подход с использованием эвристик, называемых правилами предпочтения. Правила предпочтения устанавливают очередность технологических операций при возникновении конфликтов в процессе планирования. Они позволяют получать субоптимальные планы, существенно сокращая при этом объем необходимого перебора.

Из методов направленного перебора наибольшую известность получил метод ветвей и границ [3]. В этом методе задача КП разделяется на две части: 1 – довольно компактный алгоритм ветвления и выбора очередного претендента, 2 – определение метода оценки перспективных вершин и нахождение нижней границы. Использование метода ветвей и границ при составлении расписаний показало, что, несмотря на громоздкость решений, его можно использовать при удачном выборе способа задания оценок. Основная проблема состоит в определении взаимосвязи оценок и критерия качества.

Предпринималось довольно много попыток решить задачи КП методом Монте-Карло. В этой области полученные результаты в основном дали возможность моделировать различные способы задания правил выбора и их влияние на качество получаемых расписаний для разных производственных ситуаций.

На основе анализа работ [4-5] нами установлено, что все многообразие подходов и методов и безуспешность их использования в реальных производственных ситуациях приводят к необратимости использования эвристических методов решения. При этом под эв-

ристикой понимается правило выбора претендента на включение в комбинацию на поле расписания в конфликтных ситуациях (функции предпочтения).

В настоящее время работы по исследованию функций предпочтения ведутся по следующим основным направлениям:

- определение класса задач, в которых данная функция приоритета приводит к лучшим по сравнению с другими функциями результатам;
- выявление функций приоритета, наиболее эффективных при решении данной задачи;
- комбинированное их применение в сочетании с рандомизацией.

На основе анализа работ [1-5] приходим к выводу, что в практике используется большое разнообразие правил предпочтения, подходов к созданию новых и использованию уже известных эвристик, например, рандомизированные правила предпочтения, комбинированные правила предпочтения, и т.д. В виду отсутствия в настоящее время общего подхода, позволяющего решить задачу выбора наилучшего правила предпочтения для всего многообразия современных производств приходим к выводу, что удачная разработка новой эвристики или выбор уже известного правила предпочтения, наилучшим образом отвечающего характеру конкретного производства будет способствовать повышению качества системы КП в целом.

#### **Постановка задачи.**

Задачу календарного планирования можно сформулировать следующим образом: имеется некоторое множество объектов, состоящее из подмножеств однотипных объектов:  $E = \{E_i, i = \overline{1, I}\}$ . В качестве  $E_i$  можно рассматривать множество партий  $d_i$ , групп оборудования  $G_m^{об}$ ,  $G_m^k$ , единиц оборудования  $g_{mn}$ , инструментов или приспособлений  $\omega_{pq}$ , групп рабочих и т.д. Требуется построить на временном интервале  $(0, T)$  расписание, представляющее собой набор комбинаций по одному элементу из каждого подмножества  $E_i$ , размещенных на временной оси таким образом, чтобы удовлетворить обязательным ограничениям и дополнительным, зависящим от условий конкретной технологической системы, а также оптимизировать заданный критерий качества.

#### **Анализ задачи.**

В качестве основы нормативно-справочной базы для календарного планирования принимаются типовые технологические схемы, отражающие целесообразные последовательности и параллельности проектных работ с наиболее ожидаемыми продолжительностями их выполнения и соответствующими стоимостями этих работ, выраженными в относительных процентах от общих продолжительности и стоимости проектирования объекта представителя, для которого составляется схема. Детализация работ в этих схемах определяется необходимостью и достаточностью событий, обеспечивающих обмен техническими заданиями между участниками процесса проектирования, как и между специализированными подразделениями (смежными отделами), так и внутри комплексных отделов (мастерских).

#### **Основная часть.**

Выделение комплексов задач в системе календарного планирования на уровне проектной организации целесообразно провести по функционально-организационному признаку: формирование, оптимизация и анализ тематического плана проектных работ организации; расчет и составление планов работ производственных подразделений; составление объектных календарных графиков разработки проектной документации; корректировка (оперативное перепланирование) тематического плана в соответствии с текущими изменениями в нем и данными о ходе проектирования; формирование диспетчерской инфо-

рмации, учет и контроль за ходом выполнения проектных работ. Указанные комплексы задач объединяют основные этапы планирования и управления работами проектной организации.

Разработанная нами схема системы календарного планирования включает восемь блоков:

Блок 1. Формирование и обновление исходных данных (номенклатура и показателя проекта плана, типовые модели проектируемых объектов, временные, стоимостные и ресурсные характеристики комплексов и отдельных работ, прочие нормативно-справочные данные) в режимах планирования и оперативного управления.

Блок 2. Подготовка (корректировка) массивов исходных данных, ввод в ЭВМ, первичная обработка и хранение нормативной и текущей информации.

Блок 3. Алгоритмы календарного планирования (проверка совместимости ограничений; расчет (перерасчет) календарного плана на планируемый период по заданному критерию оптимизации; формирование календарного плана и представление основных показателей для анализа руководству.

Блок 4. Логика (Утверждается ли план руководством? Если „Да”, то переход к блоку 6, если „Нет”, то к блоку 5).

Блок 5. Логика (Изменение ограничений по представлению руководства. Если „Да”, то переход к блоку 2.

Блок 6. Формирование и печать текущих и оперативных календарных планов, диспетчерских документов и доведение их до соответствующих уровней руководства и ответственных исполнителей.

Блок 7. Реализация комплексов работ, информация о фактическом состоянии проектируемых объектов.

Блок 8. Логика (Имеются ли отклонения от плана? Если „Да”, то переход к блоку 1, если „Нет” - к блоку 7).

Центральным звеном функционирования системы является задача распределения ресурсов относящихся к оптимизационному типу, которая решена для многосетевых моделей комплексов работ с учетом одного вида ресурсов по каждой отдельной работе, но многих видов по комплексу в целом, с постоянной скоростью и интенсивностью потребления всех видов ресурсов для отдельной работы, с возможностью перерывов в ведении отдельных работ. Рассматриваемая задача с точки зрения критерия оптимальности классифицируется как задача оптимизации некоторого показателя качества использования трудоресурсов организации в заданных интервалах выполнения каждого из объектов многопроектного комплекса, поскольку качество проектов существенно зависит от качества использования этих ресурсов.

В соответствии с изложенным задача календарного планирования процесса проектирования формулируется как составление и корректировка расписания, обеспечивающего минимизацию наибольшего значения интенсивности использования отдельных видов трудовых ресурсов в каждый момент планового периода [6].

В качестве исходных данных задаются:

- плановый период;
- номенклатура объектов;
- соответствующие технологические модели;
- временные и стоимостные оценки этих моделей в натуральных единицах или относительных процентах от общей продолжительности;
- стоимости объекта как детерминированные, неотрицательные величины.

Математическая модель задачи имеет вид:

$$\sum_{m=1}^m \gamma_m \max_{t \in [T_0, T]} R^m(t, \bar{T}) \rightarrow \min ,$$

где  $\gamma_m$  - весовой коэффициент относительной ценности сглаживания ресурса  $m$  - го вида;  $R^m(t, \bar{T})$  - график использования ресурсов  $m$  - го вида в текущий момент  $t$  реализации календарного плана  $\bar{T}$ .

Ограничения модели:

1. Исходный план должен включать все множества работ проектируемых объектов организации в планируемый период

$$P = \bigcup_k P_k, P_k = \{q_{i_1 j_1}, q_{i_2 j_2}, \dots, q_{i_n j_n}\} \quad (k = 1, 2, \dots, n),$$

где  $P_k$  -  $k$  - тый объект тематического плана;  $q_{ij} \in P_k$  - работа, принадлежащая множеству работ технологической модели  $k$  - го объекта.

2. Временные ограничения. Время наступления завершающих событий моделей, характеризующих реальные объекты, не должно превышать установленных директивных дат:

$$T_j \leq T_j^{\text{дир}} \quad (e_j \in E^{\text{дир}}),$$

где  $T_j^{\text{дир}}$  - заданное директивное время наступления  $e_j$ ;  $E^{\text{дир}}$  - подмножество событий, время наступления которых задано директивно.

3. Технологические временные ограничения, соответствующие топологии технологических моделей. Технологически допустимым календарным планом назовем вектор  $\bar{T}$ , компоненты которого удовлетворяют ограничениям:

$$T_{ij} + t_{ij} \leq T_j; T_{ij} \geq T_j,$$

где  $T_{ij}, t_{ij}$  - соответственно время начала и продолжительность выполнения работы.

Вектор  $\bar{T}$  содержит  $N$  компонент ( $N$  - число работ в моделях всех объектов, т.е. число элементов множества  $P = \bigcup_k P_k$ ).

4. Ресурсные ограничения. В каждый момент планового периода число проектировщиков по каждой из специальностей данной организации не должно превышать имеющегося в наличии:

$$R^m(t, \bar{T}) \leq R_0^m(t), \quad t \in [T_0, T] \quad (m = 1, 2, \dots, m).$$

Время принято в виде дискретной величины, поэтому плановый период  $[T_0, T]$  включает в себя конечное число элементарных промежутков

$$R^m(t, T) = \sum r_{ij}^m, \quad q_{ij} \in Y^m / T_{ij} \leq t \leq t_{ij} + T_{ij},$$

где  $r_{ij}^m$  - количество ресурсов вида  $m_{ij}$ , необходимое в каждый момент времени  $t \in [T_{ij}, T_{ij} + t_{ij}]$  для выполнения работы  $q_{ij}$ , определяемое по формуле

$$r_{ij}^m = \frac{C_k p_{ij}^c}{100 \cdot \bar{v} \cdot t_{ij}},$$

где  $C_k$  – общая стоимость всех работ объекта  $P_k$ ;  $p_{ij}^c$  – относительный процент стоимости работы  $q_{ij}$  от общей стоимости объекта;  $\bar{v}$  – средняя для планового периода выработка единицы ресурса  $m$ -ой специальности.

Множество работ объекта  $P_k$  разбито на непересекающиеся подмножества  $Y_k^m \subset P_k$  таким образом, чтобы выполнялись условия:

$$Y_k^{m_1} \cap Y_k^{m_2} = \emptyset, \quad m_1 \neq m_2, \quad \bigcup_k Y_k^m = P_k \quad (k=1,2,\dots,n).$$

Фиктивные работы, а также работы типа «ожидание», не требующие ресурсов, принадлежат подмножеству  $Y_k^0$  ( $m=0$ ).

5. Плановые ограничения на сметную стоимость проектных работ. Для того чтобы финансовый план организации и ее подразделений в отчетный период был выполнен, необходимо соблюдение условия:

$$\sum C_k^v \geq C^s (s=1,2,\dots,s); \quad \left\{ (k,v) / T_{s-1} < T_k^v \leq T_s \right\},$$

где  $C_s$  – плановое задание по стоимости проектных работ, выполняемых в  $s$ -том отчетном периоде  $[T_{s-1}, T_s]$ ;  $T_{s-1}$  – время начала отчетного периода;  $T_s$  – время окончания отчетного периода.

Пусть каждый проект  $P_k$  содержит  $v_k$  разделов. Обозначим  $Q_k^v$  – подмножество работ  $l$ -го раздела проекта  $P_k$  ( $v=1,2,\dots,v_k$ ). Время наступления завершающего события  $e_k^v$   $v$ -го раздела  $k$ -го проекта:  $T_k^v = \max_{q_{ij} \in Q_k^v} (T_{ij} + t_{ij})$  ( $v=1,2,\dots,v_k$ ), ( $k=1,2,\dots,n$ ).

Если  $C_k^v$  – сметная стоимость работ каждого раздела проекта, то и стоимость всего проекта  $P_k$  будет

$$C_k = \sum_{v=1}^{v_k} C_k^v (k=1,2,\dots,n).$$

Для того, чтобы плановые задания по сметной стоимости проектных работ и номенклатур объектов тематического плана не находились в противоречии, необходимо выполнение условия

$$\sum_{k=1}^n C_k \geq \sum_{s=1}^s C^s.$$

### Полученные результаты.

Для решения задачи календарного планирования с использованием ЭВМ могут быть использованы приведенные ниже комплексы эвристических алгоритмов.

Первый комплекс. Основан на „методе ветвлений” и состоит в следующем. Мно-

жество всех работ  $P \bigcup_k P_k$  планируемого периода разбивается на  $\hat{s}$  подмножеств

( $s$  – число отчетных периодов в планируемом). Каждое подмножество  $P_s$  включает в себя работы, которые будут выполняться полностью или частично в  $s$  – том отчетном периоде. Декомпозиция задачи на подзадачи, соответствующие отчетным периодам, позволяет учесть плановые ограничения на сметную стоимость проектных работ и производить пересчет отдельных вариантов планов в процессе оперативного управления не на весь планируемый период, а на ближайший. Этот комплекс включает два этапа, первый из которых предназначен для стадии формирования и анализа годового тематического плана работ проектной организации.

Алгоритм первого этапа согласовывает время выполнения отдельных проектов с директивными сроками и одновременно производит распределение проектных работ по кварталам и месяцам с целью оптимизации суммарной загрузки трудоресурсов по критерию равномерности. Качество декомпозиции задачи календарного планирования процесса проектирования на первом этапе алгоритма оценивается следующим критерием:

$$\sum_{s=1}^s \sum_{m=1}^m \gamma_m (W^{m,s} - W_{cp}^{m,s}) \rightarrow \min ,$$

где  $W^{m,s}$  - суммарное количество ресурсов времени (человеко-дней), необходимое для выполнения работ  $s$  - го отчетного периода ресурсами  $m$  - го вида:

$$W^{m,s} = \int_{T_{s-1}}^{T_s} R^m(t, \bar{T}) dt \quad (m = 1, 2, \dots, m), \quad (s = 1, 2, \dots, s),$$

где  $W_{cp}^{m,s}$  - средняя трудоемкость  $m$  - го вида ресурсов в  $s$  - том отчетном периоде:

$$W_{cp}^{m,s} = (T_s - T_{s-1}) R_{cp}^m, \quad (m = 1, 2, \dots, m), \quad (s = 1, 2, \dots, s).$$

Задача второго этапа алгоритма заключается в определении для сети  $P_s$  времени начала  $T_{ij}$  всех работ  $q_{ij} \in P_s$ , при котором не нарушаются технологические, директивные и ресурсные ограничения, а критерий планирования принимает значение, близкое к оптимальному. Основной частью второго этапа алгоритма является алгоритм планирования по финансируемым приоритетам работ, который многократно решает задачу календарного планирования. Алгоритм основан на последовательном переходе от одного фронта работ к следующему с применением правил приоритетности выполнения проектных работ и корректировке приоритетов на каждой итерации алгоритма.

Второй комплекс. Основан на использовании случайного поиска с включением в него ряда эвристических правил, которые допускают производить выбор допустимых решений не равновероятно, а с увеличенной вероятностью получения приемлемых решений. Алгоритм включает минимально необходимое число сведений для возможности получения прогнозных решений на всех этапах календарного планирования проектных работ.

Последовательность действий для включения объекта в план следующая:

- моделирование начала выполнения объекта;
- определение загруженности каждого вида трудоресурсов при выполнении работ по заданному объекту;
- суммирование одноименных трудоресурсов при выполнении работ по всем объектам;
- вычисление критерия оптимальности.

Начало выполнения объекта определяется по формуле

$$T_{\text{нач}} = T_{\text{нач}}^P + \left( T_{\text{нач}}^П - T_{\text{нач}}^P \right) \varepsilon,$$

где  $T_{\text{нач}}^P$  и  $T_{\text{нач}}^П$  - соответственно ранний и поздний сроки начала проектирования объекта;  $\varepsilon$  - случайная величина, различно распределенная на отрезке 0,1 для объектов с различными приоритетами.

Так, для первого приоритета  $\varepsilon$  распределена с плотностью  $P_\varepsilon(x) = 0$ ; для второго приоритета принято распределение случайной величины с плотностью

$$P_\varepsilon(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0; \\ 2 - 2x & \text{при } 0 \leq x \leq 1; \\ 0 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Для третьего и четвертого приоритетов  $\varepsilon$  распределена на заданном отрезке равномерно

$$P_\varepsilon(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0; \\ 1 & \text{при } 0 \leq x \leq 1; \\ 0 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

#### **Выводы.**

1. Решение задачи календарного планирования с использованием эвристических алгоритмов позволяет получить близкий к оптимальному, относительно выбранного критерия, календарный план как для организации в целом, так и для ее подразделений на различные плановые периоды.

2. Предлагаемые алгоритмы при их программной реализации на ЭВМ обеспечивают непрерывность процесса планирования с охватом всего объема проектных работ в заданный период.

One of possible approaches of decision of task of the calendar planning with the using of heuristic algorithms is represented in the article.

1. Подчасова Т.П., Португал В.М., Татаров В.А., Шкурба В.В. Эвристические методы календарного планирования. – К.: Техника, 1980. – С. 20-25.
2. Первин Ю.А., Португал В.М., Семенов А.И. Планирование мелкосерийного производства в АСУП. – М.: Наука, 1973. – С. 16-32.
3. Перовская Е.И. Об одном алгоритме решения задачи календарного планирования // Вычислительные процессы и структуры. – Л.: Машиностроение, 1982. С. 84-92.
4. Джостон Д.Ж. Экономические методы. – М.: Статистика, 1980. – 444 с.
5. Математические вопросы кибернетики / Под ред. С.В. Яблонского. – М.: Наука. – Вып. 4, 1992. – 239 с.
6. Бирин Ю.Н., Звягинцева О.Л., Клевицкий Г.С. и др. Микро-ЭВМ в управлении строительством. – М.: Строиздат, 1989. – 296 с.

## АЛГОРИТМИ ТА МАТРИЧНІ НВІС-СТРУКТУРИ ПРИСТРОЇВ ДІЛЕННЯ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Цмоць І.Г.

### Вступ

У значній частині застосувань спеціалізованих комп'ютерних систем виникає необхідність виконувати операції ділення над інтенсивними потоками даних в реальному масштабі часу на апаратних засобах з високою ефективністю використання обладнання. Забезпечити такі вимоги можливо шляхом використання матричних НВІС-пристроїв, структура яких відображає алгоритм ділення та враховує інтенсивність надходження потоків даних:

$$P_d = knF_d$$

де  $k$  – кількість каналів надходження даних;  $n$  – розрядність даних;  $F_d$  - частота надходження даних [1-3].

Для НВІС-реалізацій ефективність використання обладнання - це інтегральний параметр, який зв'язує продуктивність пристрою з витратами обладнання на його реалізацію та дає оцінку елементам (вентилям) НВІС за продуктивністю [4-8]. Кількісна величина ефективності використання обладнання визначається наступним чином:

$$E = \frac{1}{WT}$$

де  $W$  – витрати обладнання на НВІС-пристрій;  $T$  – час виконання операції.

Для забезпечення ділення у реальному часі необхідно узгодити інтенсивність надходження даних  $P_d$  з пропускну здатністю НВІС-пристрою ділення  $D_k = F_k m p$ , де  $F_k$  – тактова частота роботи конвеєра,  $m$  - кількість трактів обробки. У випадку коли  $m$  і  $p$  величина постійна, то таке узгодження досягається шляхом зміни частоти роботи конвеєра  $F_k$ . Задача проектування матричних НВІС-структур ділення з високою ефективністю використання зводиться до мінімізації апаратних затрат при забезпеченні режиму реального часу. Для переходу від алгоритмів ділення до НВІС-реалізацій пристроїв ділення у реальному часі використовуються методи просторово-часового відображення алгоритмів у матричні структури, пропускну здатність яких узгоджена з інтенсивністю надходження даних. Процес відображення алгоритмів ділення у матричні НВІС-структури реального часу з високою ефективністю використання обладнання є складним і вимагає взаємної адаптації як алгоритмів, так і структур.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває проблема розробки нових ефективних методів, алгоритмів та синтезу матричних НВІС-структур пристроїв ділення з високою ефективністю використання обладнання для комп'ютерних систем реального часу.

### 1. Алгоритми ділення

Для НВІС-реалізацій необхідно, щоб алгоритми ділення базувались на елементарних арифметичних операціях та були рекурсивними і локально залежними. Із множини апаратно-орієнтованих алгоритмів ділення таким вимогам найбільше відповідають алгоритми ділення чисел в доповняльному коді (разом зі знаковими розрядами) без відновлення залишку [9-13]. Особливістю таких алгоритмів є те, що обчислення розрядів частки здійснюється послідовно розряд за розрядом, а точність результату залежить від числа розрядів  $h$  частки, тобто від кількості виконаних циклів (базових операцій). Для запобігання переповнення розрядної сітки при реалізації таких алгоритмів повинна виконувати-

ся наступна умова  $|A| < |B|$ , де  $A$  і  $B$  відповідно ділене і дільник. У результаті виконання операції ділення визначається частка  $Y$  і залишок  $R$  у відповідності з рівнянням  $A=BY+R$ . Базова операція алгоритму ділення чисел з фіксованою комою в доповняльному коді без відновлення залишку виконується за наступними виразами:

$$R_i = \begin{cases} 2R_{i-1} - B, & \text{коли } 3nB = 3nR_{i-1} \\ 2R_{i-1} + B, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_{i-1} \end{cases}, \quad (1)$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{коли } 3nB = 3nR_i \\ 0, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_i \end{cases}, \quad (2)$$

де  $i=0,1,\dots,h$ ,  $R_i$  –  $i$ -ий залишок,  $y_i$  –  $i$ -ий розряд частки,  $2R_{0-1}=A$ ,  $3nR_{0-1}=3nA$ .

Прискорити виконання операції ділення можна шляхом одночасного отримання двох і більше розрядів  $g \geq 2$  частки за один цикл. Для виконання такого ділення пропонується використати метод вибору залишку, за яким у кожному циклі паралельно обчислюються  $2^{g-1}$  залишків та на їх основі визначаються  $g$  розрядів частки і залишок для наступного циклу ділення. Для формування кратних дільника додатково необхідно виконати  $2^{g-1} - 1$  додавань. Обчислення залишків для  $g=2$  здійснюється за наступними виразами:

$$R_i = \begin{cases} 2R_{i-1} - B, & \text{коли } 3nB = 3nR_{i-1} \\ 2R_{i-1} + B, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_{i-1} \end{cases}, \quad (3)$$

$$R_{i+1}^- = \begin{cases} 4R_{i-1} - 3B, & \text{коли } 3nB = 3nR_{i-1} \\ 4R_{i-1} + B, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_{i-1} \end{cases}, \quad (4)$$

$$R_{i+1}^+ = \begin{cases} 4R_{i-1} - B, & \text{коли } 3nB = 3nR_{i-1} \\ 4R_{i-1} + 3B, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_{i-1} \end{cases}, \quad (5)$$

а визначення розрядів частки та вибір залишку для наступного такту роботи здійснюється так:

$$y_i y_{i+1} = \begin{cases} 00, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_i, 3nB \neq 3nR_{i+1} \\ 01, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_i, 3nB = 3nR_{i+1} \\ 10, & \text{коли } 3nB = 3nR_i, 3nB \neq 3nR_{i+1} \\ 11, & \text{коли } 3nB = 3nR_i, 3nB = 3nR_{i+1} \end{cases}, \quad (6)$$

$$R_{i+1} = \begin{cases} R_{i+1}^-, & \text{коли } 3nB = 3nR_i \\ R_{i+1}^+, & \text{коли } 3nB \neq 3nR_i \end{cases}, \quad (7)$$

де  $y_i$ ,  $y_{i+1}$  –  $i$ -ий та  $(i+1)$ -ий розряди частки,  $R_{i+1}^-$  –  $(i+1)$ -ий залишок після віднімання кратного дільника,  $R_{i+1}^+$  –  $(i+1)$ -ий залишок після додавання кратного дільника,  $2R_0=A$ ,  $4R_0=2A$ ,  $3nR_0=3nA$ .

Алгоритми ділення з одночасним визначенням трьох і чотирьох розрядів частки вимагають у кожному циклі паралельного обчислення відповідно 7 і 15 залишків та додаткового виконання відповідно 3 ( $g=3$ ) і 7 ( $g=4$ ) додавань для формування кратних дільника.

## 2. Структури пристроїв ділення

Аналіз існуючих високопродуктивних пристроїв ділення (ПД) показує, що всі вони зводяться до матричних структур, які апаратного відображають графи алгоритмів ділення [14-16]. Для забезпечення високої ефективності використання обладнання матричних ПД необхідно узгодити їх пропускну здатність з інтенсивністю надходження даних. При ді-

ленні одиночних даних використовуються однокатні швидкодіючі матричні структури, а при діленні неперервних потоків даних – конвеєрні матричні ПД.

Базова структура однокатного матричного ПД наведена на рис.1, де БПО – блок попередніх обчислень для формування кратних дільника, ПЕ – процесорні елементи обчислення базових операцій ділення.

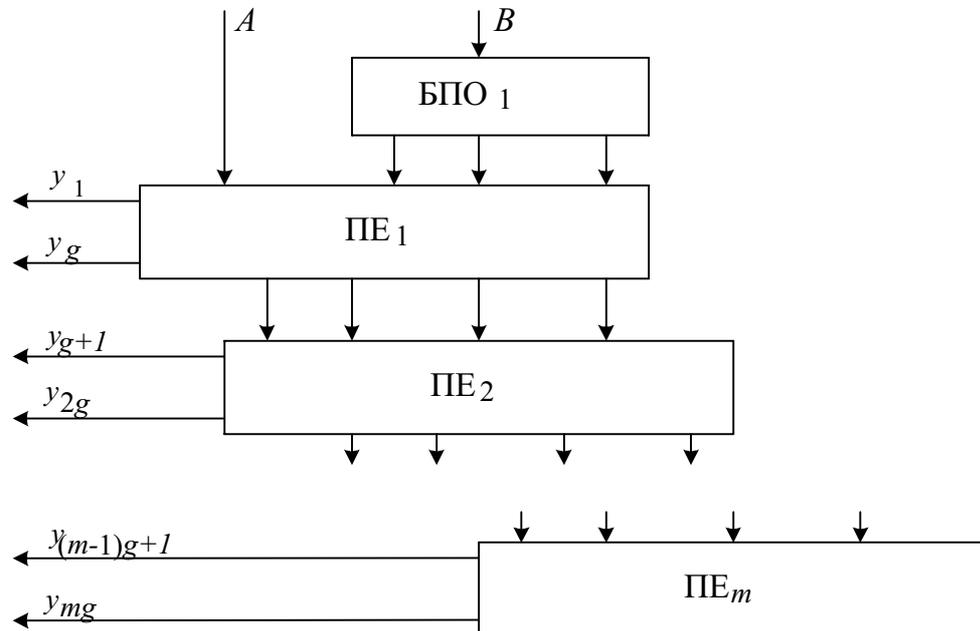


Рис.1 Базова структура однокатного матричного пристрою ділення

Основними компонентами матричного ПД є ПЕ, які реалізують базові операції алгоритмів ділення. З'єднання ПЕ<sub>j</sub> із ПЕ<sub>j+1</sub>, де j=1,...,m, у такому ПД здійснюється із зсувом вліво на g розрядів. Необхідна кількість ПЕ для синтезу матричного ПД залежить від алгоритму та точності ділення і визначається так  $m = \lceil h/g \rceil$ , де h - розрядність частки; g – кількість розрядів частки, які обчислюються за один цикл. БПО використовується при апаратній реалізації алгоритмів ділення з обчисленням у одному циклі двох і більше розрядів частки, тобто коли  $g \geq 2$ .

*Однокатні матричні пристрої ділення.* Однокатні матричні ПД будуються на базі комбінаційних ПЕ, які реалізують базові операції алгоритмів ділення. Структура ПЕ, що реалізує базову операцію алгоритму ділення з обчисленням у циклі одного розряду  $g=1$  частки, наведена на рис.2, де СВ – суматор-віднімач.

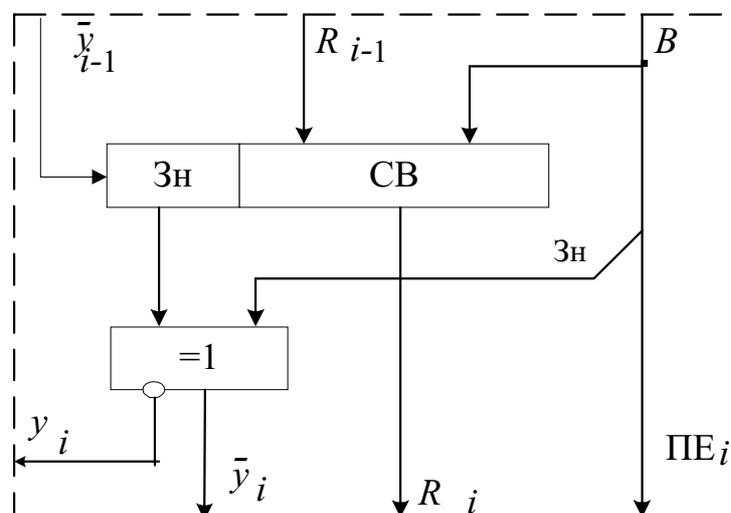


Рис.2 Структура ПЕ, що реалізує базову операцію ділення для  $g=1$

У такому ПЕ<sub>i</sub> обчислюється залишок  $R_i$  для наступного циклу ділення, визначається розряд частки  $y_i$  та сигнал управління СВ  $\bar{y}_i$  ( $\bar{y}_i=0$  - додавання,  $\bar{y}_i=1$  - віднімання) для наступного циклу обчислення. Кількість ПЕ, що використовується для побудови одноканального матричного ПД визначається розрядністю частки  $h$ . Формули для обчислення часу ділення та апаратних затрат на побудову матричного ПД з обчисленням одного розряду  $g=1$  частки у циклі наведені в таблиці 1, де  $p$  – розрядність діленого і дільника;  $t_{СВп}$  – час додавання (віднімання);  $t_{ВикАБО}$  – час спрацювання логічного елемента виключне АБО;  $W_{СВп}$  і  $W_{ВикАБО}$  – апаратні затрати відповідно на  $p$ -розрядний суматор-віднімач і логічний елемент виключне АБО.

Використання алгоритмів ділення з визначенням двох розрядів  $g=2$  частки для реалізації матричного ПД дозволяє зменшити час обчислення частки. Структура ПЕ, який реалізує базову операцію такого алгоритму ділення, наведена на рис.3.

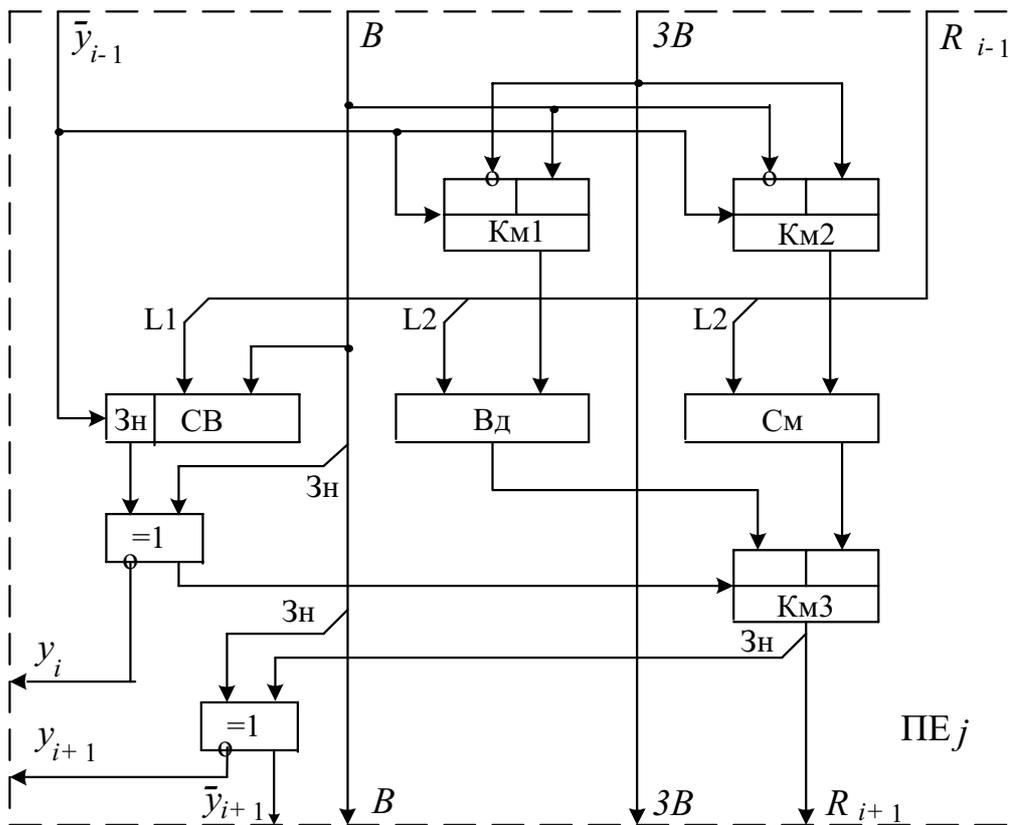


Рис. 3 Структура ПЕ, що реалізує базову операцію ділення для  $g=2$

У такому ПЕ два розряди частки  $y_i$   $y_{i+1}$ , залишок  $R_{i+1}$  і код операції  $\bar{y}_{i+1}$  для наступного циклу ділення визначаються за результатами одночасно обчислення трьох залишків  $R_i$ ,  $R_{i+1}^-$ ,  $R_{i+1}^+$ . На виходах комутаторів КМ1 і КМ2 формуються кратні дільника, які використовуються для обчислення залишків відповідно  $R_{i+1}^-$  і  $E_1 = 1/h^2(18n+2)(2+7\log_2 n)$ , а на виходах КМ3 – залишок  $R_{i+1}$  для наступного циклу ділення. На виходах логічних елементів виключне АБО отримуємо два розряди частки  $y_i$   $y_{i+1}$ . Формули для обчислення часу ділення та апаратних затрат на матричний ПД, в якому ділення виконується за алгоритмом з визначенням двох розрядів  $g=2$  частки, наведені в таблиці 1, де  $t_{КМ2-1}$  – час затримки на двох входовому комутаторі;  $W_{КМ2-1}$  – апаратні затрати на двохходовий комутатор.

Збільшення кількості розрядів  $g$  частки, які визначаються у одному циклі, веде до зменшення часу ділення та збільшення апаратних затрат на їх реалізацію. Однокантні мат-

ричні ПД, які реалізують алгоритми ділення з визначенням трьох  $g=3$  і чотирьох  $g=4$  розрядів частки, будуються на базі ПЕ, які реалізують базові операції даних алгоритмів ділення. За структурою такі ПЕ близькі до розглянутих структур з  $g=1$  і  $g=2$ . Формули для обчислення часу ділення та апаратних затрат на побудову матричних ПД з визначенням у циклі трьох  $g=3$  і чотирьох  $g=4$  розрядів частки наведені в таблиці 1, де  $W_{КМ4-1}$ ,  $W_{КМ8-1}$  – апаратні затрати відповідно на чотири і восьми входові комутатори.

Табл.1

Формули для оцінки основних характеристик одноктактних матричних ПД

Значення $g$	Апаратні затрати $W$	Час ділення $t$	Ефективність використання обладнання $E$
$g=1$	$W_1 = h(W_{СВп} + W_{ВикАБО})$	$t_1 = h(t_{СВп} + t_{ВикАБО})$	$E_1 = 1/h^2 (W_{СВп} + W_{ВикАБО})(t_{СВп} + t_{ВикАБО})$
$g=2$	$W_2 = W_{Смп} + \left[ \frac{h}{2} \right] (3W_{СВп} + 2W_{ВикАБО} + 3W_{КМ2-1})$	$t_2 = \left[ \frac{h}{2} \right] (t_{КМ2-1} + 2t_{ВикАБО} + t_{СВп})$	$E_2 = 1/W_{Смп} + \left[ \frac{h^2}{4} \right] (3W_{СВп} + 2W_{ВикАБО} + 3W_{КМ2-1})(t_{КМ2-1} + 2t_{ВикАБО} + t_{СВп})$
$g=3$	$W_3 = 3W_{Смп} + \left[ \frac{h}{3} \right] (7W_{СВп} + 7W_{КМ2-1} + W_{КМ4-1} + 3W_{ВикАБО})$	$t_3 = \left[ \frac{h}{3} \right] (t_{КМ2-1} + 3t_{ВикАБО} + t_{СВп})$	$E_3 = 1/3W_{Смп} + \left[ \frac{h^2}{9} \right] (7W_{СВп} + 3W_{ВикАБО} + 7W_{КМ2-1} + W_{КМ4-1})(t_{КМ2-1} + 2t_{ВикАБО} + t_{СВп})$
$g=4$	$W_4 = 15W_{Смп} + \left[ \frac{h}{4} \right] (15W_{СВп} + 15W_{КМ2-1} + W_{КМ4-1} + 3W_{ВикАБО} + W_{КМ8-1})$	$t_4 = \left[ \frac{h}{4} \right] (t_{КМ2-1} + 4t_{ВикАБО} + t_{СВп})$	$E_4 = 1/15W_{Смп} + \left[ \frac{h^2}{16} \right] (15W_{СВп} + 4W_{ВикАБО} + 15W_{КМ2-1} + W_{КМ4-1} + W_{КМ8-1})(t_{КМ2-1} + 2t_{ВикАБО} + t_{СВп})$

*Конвеєрні матричні пристрої ділення.* Конвеєрні матричні ПД можна розділити на дві групи: з лінійними і нелінійними зв'язками. У лінійних конвеєрних ПД передача інформації здійснюється в одному напрямку, а у нелінійних – як у прямому, так і в зворотному напрямку за допомогою системи обернених зв'язків. Конвеєрні ПД з лінійними зв'язками отримуються з одноктактних матричних ПД шляхом розбиття їх на сходинки за допомогою регістрів. Кількість сходинок, на які розбивається ПД і їх складність, визначається з умови узгодження пропускну здатності ПД з інтенсивністю знаходження вхідних даних. Пропускна здатність конвеєрних ПД визначається тактом роботи конвеєра, який може змінюватися від  $T_{max} = h(t_{Pr} + t_{СВп} + t_{ВикАБО})$  до  $T_{min} = t_{Pr} + t_{СВп} + t_{ВикАБО}$ , де  $t_{Pr}$  – час запису в регістр.

Найпростішим шляхом отримання сходинок конвеєра є доповнення розглянутих вище ПЕ вхідними регістрами. Кількість регістрів, яка необхідна для конвеєризації розглянутих матричних ПД, визначається за наступною формулою:

$$N = \left[ \frac{h}{g} \right] (2 + 2^{g-1}),$$

де  $g$  – кількість розрядів частки, які обчислюються в циклі;  $h$  – кількість розрядів частки.

Найбільша пропускна здатність та ефективність використання обладнання досягається при конвеєризації матричного ПД з визначенням у циклі одного розряду  $g=1$  частки. Конвеєрний ПД з лінійними зв'язками будується на базі ПЕ (рис.2), який допов-

нуються трьома вхідними регістрами і тригером. Такт роботи конвеєра такого ПД обчислюється за формулою:

$$T_1 = t_{Pr} + t_{CBn} + t_{ВикАБО}$$

Для побудови конвеєрних ПД з нелінійними зв'язками використаємо алгоритм ділення з визначенням у циклі одного розряду  $g=1$  частки, який зводиться до  $h$ -кратного виконання базові операції, заданої формулами 1 і 2. Структура ПЕ, який реалізує  $p$  ітерацій базової операції алгоритму ділення з  $g=1$ , наведена на рис.4, де СВ – суматор-віднімач; Тг – тригер; Пр – регістр; Км – комутатор; У1 – сигнал керування; ТП1 і ТП2 – тактові імпульси.

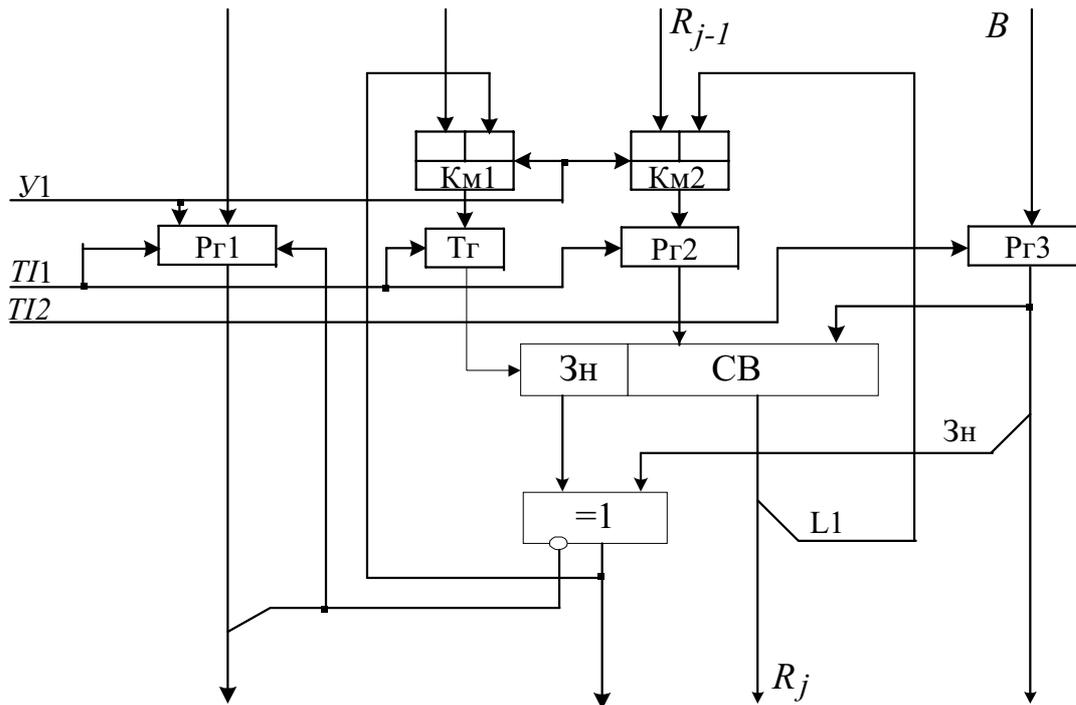


Рис. 4 Структура ПЕ конвеєрного ПД з нелінійними зв'язками

Нелінійний ПЕ будується на базі лінійного шляхом доповнення його трьома регістрами, тригером і двома комутаторами, перший з яких забезпечує подачу коду операції  $y_j$  для наступного циклу обчислення, а другий – подачу зсунутого вліво на один розряд залишку  $R_j$ . Керуванням роботою ПЕ здійснюється сигналом У1, який задає режим роботи регістра Пр1 ( $U1=0$  – паралельний запис;  $U1=1$  – послідовний запис з зсувом вліво) та управляє комутаторами Км1 і Км2 ( $U1=0$  – передача інформації з перших входів;  $U1=1$  – передача інформації з других входів). Сигнал У1 тільки перед приходом тактового імпульсу ТП2 рівний нулю, а в інший час - одиниці. Час виконання однієї ітерації базової операції алгоритму ділення у ПЕ дорівнює періоду тактових імпульсів ТП1 і обчислюється за наступною формулою:

$$T_{TP1} = t_{K_{M2-1}} + t_{Pr} + t_{CBn} + t_{ВикАБО}$$

Кількість ітерацій  $p$  базових операцій алгоритму ділення, що виконуються у ПЕ, визначаються за наступною формулою:

$$p = \left\lceil \frac{P_d}{D_k} \right\rceil = \left\lceil \frac{F_d}{F_k} \right\rceil,$$

а кількість таких ПЕ визначається так:

$$m = \left\lceil \frac{h}{p} \right\rceil,$$

де  $P_d$  – інтенсивність надходження даних;  $D_k$  – пропускна здатність конвеєра,  $F_d$  – частота надходження операндів,  $F_k$  – частота роботи макроконвеєра, яка визначається наступним виразом  $F_k=1/T_{T12}=1/pT_{T11}$ .

Необхідні апаратні затрати на побудову конвеєрного ПД з нелінійними зв'язками обчислюються за формулою:

$$W_{K1} = m(3W_{PГ} + pW_{KM2-1} + W_{CBП} + W_{ВикАБО}).$$

Використання алгоритмів ділення з визначенням у циклі двох і більше розрядів частки для побудови конвеєрних ПД як з лінійними, так нелінійними зв'язками є недоцільним, оскільки при забезпеченні однакових швидкодій для їх реалізації вимагається значно більше апаратних затрат.

*Оцінка параметрів розроблених ПД.* Для оцінки основних параметрів розроблених структур ПД за одиницю виміру витрат обладнання та часу обчислення візьмемо логічний вентилю і час його затримки. Аналітичні вирази для розрахунку основних характеристик розроблених структур ПД ґрунтуються на аналітичних виразах визначення швидкодії та витрат обладнання на функціональні вузли з роботи [4]. Отримані аналітичні вирази оцінки основних характеристик ПД, наведені в таблиці 2, де  $m = \left\lceil \frac{h}{p} \right\rceil$ ;  $p$  – розрядність операндів;  $h$  – розрядність частки;  $g$  – кількість розрядів частки, які обчислюються в циклі;  $p$  – кількість ітерацій алгоритму, що виконуються у ПЕ.

Табл. 2

Аналітичні вирази для оцінки основних параметрів

Значення $g$	Витрати обладнання (вентилів)	Час ділення ( $\tau$ вентилів)	Ефективність використання обладнання
Однотактні ПД			
$g=1$	$W_1 = 2h(10n + 1)$	$t_1 = 2h(1 + 4 \log_2 n)$	$E_1 = 1 / 4h^2 (10n + 1)(1 + 4 \log_2 n)$
$g=2$	$W_2 = 18n + 2h(18n + 1)$	$t_2 = h(2 + 4 \log_2 n)$	$E_2 = 1 / [18n + 2h(18n + 1)]$ $[h(4 \log_2 n + 2)]$
$g = 3$	$W_3 = 54n + h(53n + 2)$	$t_3 = \left\lceil \frac{h}{3} \right\rceil (8 + 8 \log_2 n)$	$E_3 = 1 / \left\lceil \frac{h}{3} \right\rceil [54n + h(53n + 2)]$ $(8 + 8 \log_2 n)$
$g=4$	$W_3 = 270n + h(78n + 2)$	$t_3 = \left\lceil \frac{h}{4} \right\rceil (10 + 8 \log_2 n)$	$E_4 = 1 / [270n + h(78n + 2)]$ $\left[ \left\lceil \frac{h}{4} \right\rceil (10 + 8 \log_2 n) \right]$
Конвеєрні ПД з лінійними зв'язками			
$g=1$	$W_{k1} = h(41n + 8)$	$T_1 = 5 + 8 \log_2 n$	$E_{k1} = 1 / h(41n + 8)(5 + 8 \log_2 n)$
Конвеєрні ПД з нелінійними зв'язками			
$g=1$	$W_{k2} = m(43n + 8)$	$T_2 = p(7 + 8 \log_2 n)$	$E_{k2} = 1 / h(43n + 8)(7 + 8 \log_2 n)$

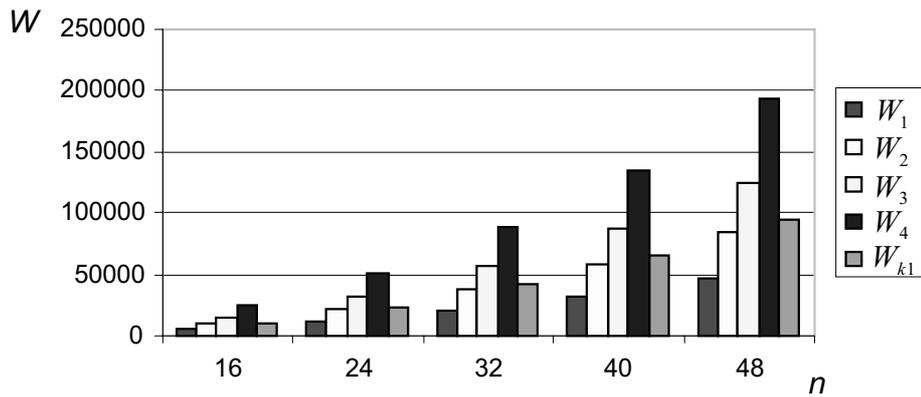


Рис. 5 Діаграми витрат обладнання на ПД

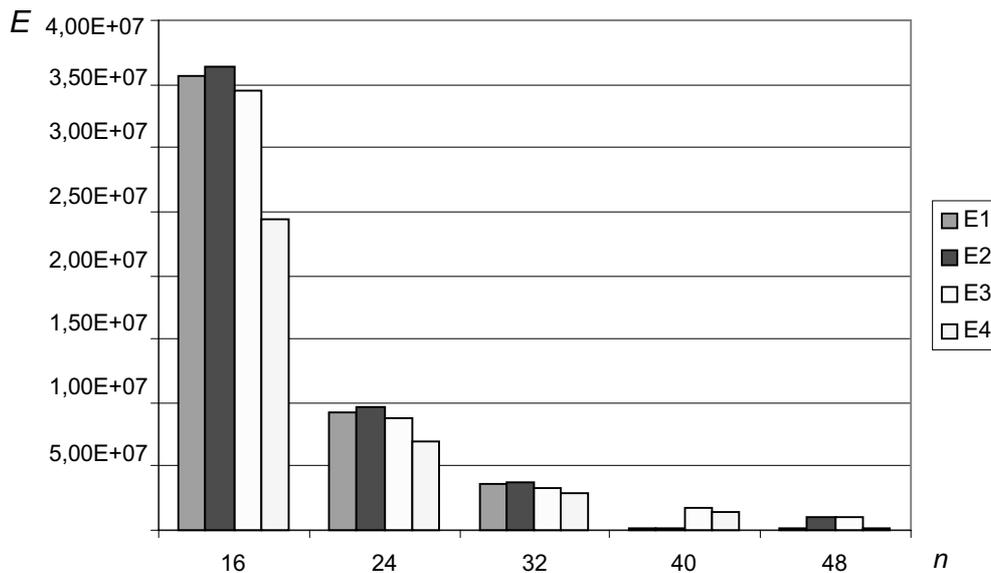


Рис. 6 Діаграми ефективності використання обладнання ПД

На основі аналітичних виразів, наведених у табл. 2, побудовано діаграми витрат  $W$  (рис.5) та ефективності (рис.6) використання  $E$  обладнання для ПД у залежності розрядності  $n$  операндів, де  $W_1, W_2, W_3$  і  $W_4$  – витрати обладнання на одноктактні ПД, що працюють за алгоритмами з визначенням у циклі відповідно  $g=1, g=2, g=3$  і  $g=4$  розрядів частки;  $W_{k1}$  – витрати обладнання на конвеєрний ПД;  $E_1, E_2, E_3, E_4$  – ефективність використання обладнання ПД, що працюють за алгоритмами з визначенням у циклі відповідно  $g=1, g=2, g=3$  і  $g=4$  розрядів частки. З аналізу наведених діаграм випливає, що найменші витрати обладнання на реалізацію одноктактних ПД досягаються при використанні алгоритму ділення з визначенням у циклі одного розряду частки, а найбільшу ефективність використання обладнання з одноктактних ПД мають пристрої з визначенням у циклі двох розрядів частки.

**Висновки:**

1. Представлення алгоритмів ділення у базисі елементарних арифметичних операцій дозволяє оптимізувати структуру і повною мірою використати можливості НВІС-технології.
2. З матричних одноктактних ПД найбільшу ефективність використання обладнання мають пристрої, структура яких відображає алгоритм з обчисленням у циклі двох розрядів частки.
3. Алгоритми ділення з одночасним визначенням у циклі  $g$  розрядів частки вимагають додаткового виконання  $2g-1-1$  додавань для формування кратних дільника та у кожному циклі паралельного обчислення  $2g-1$  залишків.

4. Кількість сходинок, на які розбивається матричний ПД і їх складність, визначається з умови узгодження пропускну здатності ПД з інтенсивністю знаходження вхідних даних.

5. Підвищити ефективність використання обладнання матричними ПД можна досягнути роздільним або комплексним використанням методів, які дозволяють: зменшити час виконання додавання (віднімання); збільшити кількість розрядів частки, які обчислюються за цикл (однотактні ПД); збільшити кількість виконуваних ПЕ базових операцій (конвеєрні ПД з нелінійними зв'язками).

Division algorithms are improved by way of their orientation on development of real-time matrix devices with high effective usage of equipment. Matrix step-type and conveyor VLSIC-structures of division devices with linear and non-linear connections are developed and estimated.

1. С.Кун. Матричные процессоры на СБИС:-М.:Мир,1991.-672 с.
2. Паралельная обработка информации: Т.4. Высокопроизводительные системы параллельной обработки информации /Под ред. В.В. Грицыка — Киев: Наук. думка, 1988. — 272с.
3. Грушицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608с.
4. Цмоць І.Г. Принципи розробки і оцінка основних характеристик високопродуктивних процесорів на надвеликих інтегральних схемах/ Вісник ДУ “Львівська політехніка”, №349, Львів, 1998 - с.5-11.
5. Коуги П.М. Архитектура конвейерных ЭВМ.: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 360 с.
6. Цмоць І.Г. Особливості проектування спеціалізованих комп'ютерних систем для обробки інтенсивних потоків інформації // Збірник наук. праць ІПМЕ НАН України: "Моделювання та інформаційні технології", - Київ, Вип. 8. 1999. – с.143-149.
7. Каневский Ю.С. Системные процессоры. — К: Техніка, 1991. — 173с.
8. Шалыто А.А. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. – СПб.: Наука,200. – 780 с. Коуги П.М. Архитектура конвейерных ЭВМ.: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 360 с.
9. Савельев А.Я. Арифметические и логические основы цифровых автоматов. М.: Высш. школа, 1980. – 225 с.
10. Соловьев Г.Н. Арифметические устройства ЭВМ. М.: Энергия, 1978. – 176 с.
11. Карцев М.А. Арифметика цифровых машин - М.,Наука, 1969.
12. Карцев М.А., Брик В.А. Вычислительные системы и синхронная арифметика. - М.: Радио и связь, 1981. - 360с.
13. Прикладная теория цифровых автоматов. К.Г. Самофалов, А.М. Романкевич, В.Н. Валуйский, Ю.С. Каневский, М.М. Пинкевич.-К.: Вища шк. Головное из-во, 1987.- 375.
14. Цмоць І.Г. Особливості проектування алгоритмічних операційних пристроїв високопродуктивних процесорів цифрової обробки сигналів. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН “Моделювання та інформаційні технології” Випуск 5, Київ 2000. 147-154с
15. А.с. 1711149 (СССР). Устройство для деления. Е.Я. Ваврук, И.Г. Цмоць., – Оpubл. в Б.И., 1992, №5.
16. 1705820 (СССР). Вычислительное устройство. Е.Я. Ваврук, И.Г. Цмоць. – Оpubл. в Б.И., 1992, №2.

## ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕДУРИ APPEND ПРИ АНАЛІЗІ АБСТРАКТНИХ ТИПІВ ДАНИХ МОДИФІКАЦІЙНИХ ЗАПИТІВ

Шекета В.І.

**Вступ.** В даний час нафтогазова галузь має автоматизовані мікропроцесорні системи різних рівнів і типів, а також різні програмні комплекси для прогнозу нафтогазоносності, пошуку та розвідки родовищ нафти і газу, але масштаби та ефективність застосування ЕОМ для кожного рівня різні [1]. Впровадження нових інформаційних технологій на базі мікропроцесорних систем в нафтогазовій справі дає можливість суттєво змінити економіко-екологічний підхід до пошуково-розвідувальних робіт на нафту і газ.

В роботі [2] база знань інформаційної системи розглядається як набір інформаційних сутностей атомарних предикатів з деякого скінченного інформаційного простору  $\mathfrak{A}$ . Всі зміни, що відбуваються в базі знань, розглядаються, як наслідок модифікаційних предикатних запитів  $Q_M$ , що генеруються інтелектуальною інформаційною системою відповідно до вказівок користувача. Основою самих запитів є набір модифікаційних предикатних правил. Розглядаються два типи правил:

$$Q_M \longleftrightarrow (K_B)^{\lll} \left\|_{K_{B_+}(o)} \lll K_{B_+}(o_1), \dots, K_{B_+}(o_1), K_{B_-}(p_1), \dots, K_{B_-}(p_m), \quad (1)$$

$$Q_M \longleftrightarrow (K_B)^{\lll} \left\|_{K_{B_-}(o)} \lll K_{B_+}(o_1), \dots, K_{B_+}(o_1), K_{B_-}(p_1), \dots, K_{B_-}(p_m), \quad (2)$$

де  $o, o_i, p_i \in \mathfrak{A}$ . Основна ідея такого запису правил полягає в тому, що  $K_{B_+}(o)$  означає, що атомарний предикат  $o$  повинен бути включений в базу знань  $K_B$ , а  $K_{B_-}$  означає, що  $o$  – повинен бути виключений з бази знань, а  $(K_B)^{\lll}$  - означає модифікацію бази знань на рівні логічної зв'язаності предикатних правил, як наслідок виконання операцій додавання і вилучення правил;  $\lll$  – розглядається, як комплексна стрілка, дослідження властивостей якої буде виконано пізніше *засобами теорії категорій*.

Порівняння різних технік і методик аналізу абстрактних типів даних в термінах точності, ефективності і загальності є досить важким завданням, оскільки такі техніки часто використовують різні методи аналізу, які базуються на протилежних вихідних гіпотезах. Виконаний нами аналіз публікацій дозволяє виділити наступні методи: методи аналізу абстрактних типів даних і побудови на його основі процедури логічного висновку подібні до тих, які використовуються в функціональних мовах програмування високого рівня [3,4]; техніки аналізу на основі методів верифікації програм [5]; аналіз абстрактних типів на основі типованих графів [6]; техніки аналізу абстрактних типів на основі абстрактної інтерпретації [7–14].

Вихідним кроком підходу до аналізу абстрактних типів даних на основі абстрактної інтерпретації, є вибір абстрактного домену, який визначає, як буде виконано присвоєння абстрактних типів термам. Формальні засоби опису базових типів не дозволяють обробляти залежності між типами. Деякі залежності абстрактних типів серед попарно різних аргументів процедур можуть бути виражені через використання змінних типу в мовах програмування, що оперують із структурними типами даних. Це є стандартне рішення, описане зокрема в [5,7,10]. Подібну техніку використано також в рамках підходу, щодо регулярної апроксимації множин успішних рішень [9]. Проте, слід відмітити, що використання змінних типу не дозволяє виразити залежності між абстрактними типами даних із точки зору позиціонування аргументів процедур. Тільки в роботах [7,8] показано приклад виключення випадку, який явним чином визначає залежності між типами. В [7] виконано оголошення абстрактного домену для аналізу базових типів. В даний роботі введено по-

няття типізованих програм, що значно звужує можливості застосування такого підходу. Крім того, оскільки змінні типів не використовуються, практичне застосування розроблених доменів є досить складним завданням. В роботі [8] автори виконують узагальнення техніки побудови домену POS для аналізу базовості до випадку абстрактних типів. Проте, коректність такого підходу не була підтверджена формальним доведенням. Більше того, використання змінних типу є в більшій мірі наслідком вибраного способу практичної реалізації, чим формальності теорії, що лежить в основі підходу. Стосовно роботи [2] недослідженим залишається питання побудови коректних методів аналізу абстрактних типів даних модифікаційних предикатних запитів.

**Таким чином метою даного дослідження** є побудова способу застосування класичної процедури *Append* при виконанні аналізу абстрактних типів даних модифікаційних предикатних запитів для інформаційних інтелектуальних систем на основі баз даних і знань нафтогазової предметної області.

Нехай задано множину змінних  $W$  і множину функцій  $M_F$ , причому кожній функції присвоєна певна розмірність. Для  $l \in \mathbb{N}$  означимо множину термів  $T$ :

- 1)  $T^\emptyset(M_F^1, W)$ ; 2)  $T^{l+1}(M_F^2, W) = T^l(M_F^1, W)W$ ;
- 3)  $\{(t_1, \dots, t_n) \mid f^n \in M_F^1\{t_1, \dots, t_n\} \subseteq T^l(M_F^1, W)\}$ ; 4)  $T(M_F, W) = \bigcap_{c \geq 0} T^c(M_F, W)$ .

**Означення 1.** (Система обмежень для абстрактних типів даних). Нехай  $ST = \langle M_F^1, M_F^2, \psi \rangle$  – система абстрактних типів даних із  $\psi$  в якості прототипу функторного відображення. Системою обмежень для системи абстрактних типів даних  $ST$  будемо вважати систему обмежень  $SO = \{SO_w\}_{w \in r_f(w)}$ , де  $SO_w \subseteq F_{M_F^1, W}$ ,  $w, w_1 \in W$ ,  $r_f$  – абстрактний оператор,  $F$  – функторний символ.  $SO$  є замкнутою відносно операції  $\wedge$  і містить діагональні елементи

$$(\theta_1)_{\langle x_1, \dots, x_k \rangle, \langle y_1, \dots, y_k \rangle}^{SO_w} = \wedge t \in T(M_F^1, \emptyset), i=1, \dots, k \{ (x_i \in t \Rightarrow y_i \in t) \wedge (y_i \in t \Rightarrow x_i \in t) \}. \quad (3)$$

**Означення 2.** Нехай дано  $\{S, S_1, S_2\} \leq r(O_w)$  і  $V$ , тоді:

$$S_1 O_w S_2 = \{ x_1 *^{O_w} x_2 \mid x_1 \in S_1, x_2 \in S_2; x_1 *^{O_w} x_2 \text{ визначеним} \}, \quad (4)$$

$$S_1 O_w S_2 = S_1 \cup S_2, \quad (5)$$

$$\exists_{\{a_1, \dots, a_n\}}^{O_w} S = \{ \exists_{a_1}^{O_w}, \dots, \exists_{a_n}^{O_w} x \mid x \in S \}. \quad (6)$$

Означимо оператор абстрактної інтерпретації [15]  $KA^{O_w} [ ] : Z^{O_w} x i^{O_w} \gg r(O_w)$  наступним чином:

$$KA^{O_w} [x] i = \{x\} \quad (7)$$

$$KA^{O_w} [Z_1 \text{ і } Z_2] i = KA^{O_w} [Z_1] i O_w KA^{O_w} [Z_2] i \quad (8)$$

$$KA^{O_w} [Z_1 \text{ або } Z_2] i = KA^{O_w} [Z_1] i O_w KA^{O_w} [Z_2] i \quad (9)$$

$$KA^{O_w} [p(a_1, \dots, a_2)] i = \exists_{\{t_1, \dots, t_n\}}^{O_w} \{ \wp_{\langle a_1, \dots, a_n \rangle, \langle t_1, \dots, t_n \rangle}^{O_w} \wp^{O_w} i(p) \} \quad (10)$$

**Означення 3.** Нехай дано запит  $Q \in Q^{O_w}$ , введемо оператор еластичний оператор [15]  $R_n : i^{O_w} \rightarrow i^{O_w}$ , як

$$R_n(i)(p^n) = \begin{cases} \left[ \exists_{w \in \{t_1, \dots, t_n\}}^{O_w} \left( \theta_{\langle t_1, \dots, t_n \rangle, \langle b_1, \dots, b_n \rangle}^{O_w} \right) \right]^{O_w} \text{КА}^{O_w} [Z]_i \\ \text{якщо } p(b_1, \dots, b_n) \ll Z \in Q \\ 0, \text{ в іншому випадку} \end{cases} \quad (11)$$

**Означення 4.** (Абстрактна аплікація). Нехай  $O^1$  і  $O^2$  дві системи обмежень:  $O^1 = \{O_w^1\}_{w \in r_f(w_1)}$  і  $O^2 = \{O_w^2\}_{w \in r_f(w_1)}$ . Для заданого запиту  $Q \in Q^{O_w^1}$  означимо  $g^1(Q) \in Q^{O_w^2}$ , як запит, отриманий із  $Q$  через заміну обмежень в твердженнях запиту на їх абстрактні відповідники через  $g_w^1$ . Подібним чином, якщо  $Q \in Q^{O_w^1}$ , тоді  $g^1(Q) \in Q^{O_w^2}$  є еластичним елементом[15], отриманим із  $Q$  через заміну кожного обмеження  $\langle h, W \rangle$  в твердженнях  $Q$  на  $\langle g_w^1(h), W \rangle$ .

**Твердження 1.** Нехай  $ST = \langle M_F^1, M_F^2, \psi \rangle$  - система абстрактних типів  $n \geq 1$ ,  $w \in r_f(w_1)$ ,  $O \in LP_w^n$ ,  $w \in W$ ,  $t \in T(M_F^1, ZT)$ ,  $LP_w^n$ -домен абстрактних логічних програм,  $ZT$ -змінна типу. Якщо  $w(t)$  може бути одержано з  $O$  за допомогою процедури резолюції[15] (тобто якщо існує спростування для  $w(t) \ll O$  із  $\eta$  в якості обчислюваної підстановки), тоді  $O \leq \{w(t) \ll\}$ .

**Означення 5.** Для заданої системи абстрактних типів  $ST = \langle M_F^1, M_F^2, \psi \rangle$ ,  $n \geq 1$  і  $w \in r_f(W_1)$  ми припускаємо, що існує Prolog -процедура  $a\_type()$  така, що для довільного  $t_1 \in T(M_F^2, w)$ ,  $V_r(t_1) = \{x_1, \dots, x_k\}$  і  $t_2 \in T(M_F^2, ZT)$  ми матимемо, що якщо  $a\_type(t_1, t_2)$  дає в результаті обчислювану підстановку  $\sigma$ , тоді для кожного  $\theta \in \sigma_w$  і  $v: ZT \rightarrow T(M_F^1, \emptyset)$  ми маємо, що  $(t_1)\theta \in [(t_2)\sigma v]\psi$  тоді і тільки тоді, коли  $\theta(x_i) \in [\sigma(x_i)v]\psi$  для кожного  $i=1, \dots, k$ . Іншими словами, розглянута процедура  $a\_type()$  визначає, чи деяка ініціалізація терма може належати до певного абстрактного типу і забезпечує необхідні і достатні умови того, що ініціалізація змінних терму дозволить співвідносити терм до певного абстрактного типу даних.

**Означення 6.** Для заданої системи абстрактних типів  $ST = \langle M_F^1, M_F^2, \psi \rangle$ , процедури  $a\_type()$  для  $ST$ ,  $n \geq 1$ ,  $W \in r_f(w_1)$ :  $h \in H_w$  в нормальній формі, для довільного  $X \in W$  ми означимо

$$\begin{aligned} \gamma_{алг}^x(h) &= \left\{ x(t_i) \leftarrow x^1(t_i^{x^1}), \dots, x^{k1}(t_i^{x^{k1}}) \mid i=1, \dots, l \cup \right. \\ &= \left. \left\{ x^j(t_i^{x^j}) \leftarrow x(t_i) \mid j=1, \dots, k, i=1, \dots, l, \right. \right. \end{aligned} \quad (12)$$

де  $V_r(h(x)) = \{x_1, \dots, x_k\}$  і  $a\_type(h(x), t_2)$  дає нам обчислювальну підстановку

$$\left\{ t_2 \mapsto t_i, x_1 \mapsto t_i^{x^1}, \dots, x_k \mapsto t_i^{x^k} \right\} \text{ для } i=1, \dots, l. \quad (13)$$

Перший крок запропонованої нами процедури виконання аналізу полягає в трансформації запиту в рамках введеного абстрактного синтаксису через використання класичної процедури *Append()*[5]. Результат матиме вигляд

$$\text{append}(x^1, x^2, x^3) \ll \{x^1 = [x^2 = x^3]\} \text{ або } (\{x^1 [C|t]\}, x^3 = [C|l]) Q^{\text{append}}(t, x^2, 1). \quad (14)$$

Другий крок полягає у виконанні абстрагування запиту (Означення 4) через відображення  $\gamma_{\text{алг}}^w$  із Означення 6. При цьому ми будемо використовувати систему абстрактних типів, що містить поліморфні списки, числові типи даних і деякий абстрактний тип даних  $u_r$ . Таким чином ми також використаємо і процедуру  $a\_type$ . Результат абстрагування матиме вигляд

$$\begin{aligned} X(\text{list\_var}(S)) \ll \text{append}(x^1, x^2, x^3) \ll x^2(S) \ll x^3(S) \text{ або } x^3(S) \ll x^2(S) \text{ або} \\ x^1(\text{list\_var}(S)) \ll C(S), t(\text{list\_var}(S)): C(S) \ll x(\text{list\_var}(S)) \\ t(\text{list\_var}(S)) \ll x^1(\text{list\_var}(S)): x^3(\text{list\_var}(S)) \ll C(S) \ll l(\text{list\_var}(S)) \\ C(S) \ll x^3(\text{list\_var}(S)): l(\text{list\_var}(S)) \ll x^3(\text{list\_var}(S)) \end{aligned} \quad (15)$$

Згідно означення, ми маємо, що  $R_Q \uparrow_0(\emptyset)(Q^{\text{Append}}) = \emptyset$ . Перше застосування процедури резолюції використовує тільки першу вітку формули (11). Причиною цього є те, що друга вітка зіставляється із нотацією  $Q^{\text{Append}}$ , яка є порожньою. Таким чином, ми маємо

$$R_Q \uparrow_1(\emptyset)(Q^{\text{Append}}) = \{t^1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t^2(S) \ll t^3(S) \ll t^2(S)\} \quad (16)$$

Відмітимо, що ми виконали переіменування змінних ( $t$  в  $t$ ) слідуючи означенню 3, хоча для цього була використана явна операція переіменування замість операції пошуку діагональних елементів і виконання циліндрифікації [15].

На другому кроці виконаємо обчислення  $KA^{LP_w^2} \left[ Q_{(t, x^2, 1)}^{\text{append}} \right] R_Q \uparrow_1(\emptyset)$ . Для цього будемо слідувати Означенню 2, і використаємо явну операцію переіменування замість неявної операції пошуку діагональних елементів і виконання циліндрифікації. Одержимо

$$\{t^1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t^2(S) \ll t^3(S) \ll t^2(S)\} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} KA^{LP_w^2} \left[ Q_{(t, x^2, 1)}^{\text{append}} \right] R_Q \uparrow_1(\emptyset) &= PN_{(t^1, t^2, t^3) \gg (t, x^2, 1)}^{LP_w^2} \\ &= \{t^1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll x^2(S) \ll l(S) \ll x^2(S)\} \end{aligned} \quad (18)$$

Далі, обчислимо

$$KA^{LP_w^2} \left[ R_Q : Q_{(t, x^2, 1)}^{\text{append}} \right] R_Q \uparrow_1(\emptyset) \quad (19)$$

Згідно означення 2 матимемо:

$$\begin{aligned}
 & \text{KA}^{LP_w^2} \left[ R_Q \wedge Q_{(t,x^2,1)}^{\text{append}} \right] R_Q \uparrow_1 (\emptyset) = \\
 & \text{KA}^{LP_w^2} [R_Q] R_Q \uparrow_1 (\emptyset) \ominus^{LP_w^2} \text{KA}^{LP_w^2} [Q_{(t,x^2,1)}^{\text{append}}] R_Q \uparrow_1 (\emptyset) = \\
 & \{R_Q\} \ominus^{LP_w^2} \text{KA}^{LP_w^2} \left[ Q_{(t,x^2,1)}^{\text{append}} \right] R_Q \uparrow_1 (\emptyset) = \\
 & = {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll x^2(S) \ll l(S) \ll x^2(S): \\
 & x(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S) \mid, {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) c(S) \ll x(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \} \\
 & {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll x(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid x^3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S), {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \\
 & c(S) \ll x^3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll x^3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S))
 \end{aligned} \tag{21}$$

Слідуючи означенню 3, ми повинні переіменувувати запит  $Q$  і виконати циліндрифікацію[15] по відношенню до змінних  $\{t^1, t^2, t^3\}$ . Операція переіменування матиме своїм результатом

$$\begin{aligned}
 & \text{PN}^{r(LP_w^2)}_{(t^1, t^2, t^3) \gg (t^1, t^2, t^3)} (\{Q\}) = \{ (\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t^2(S) \ll l(S): \\
 & l(S) \ll t^2(S): {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S), {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \} \\
 & c(S) \ll t^2(S): {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t^1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \} \\
 & t^3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S), {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid c(S) \ll t^3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \\
 & {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t^3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \}
 \end{aligned} \tag{22}$$

Виконаємо операцію циліндрифікації

$$\begin{aligned}
 & \Delta_{\{t\}}^{LP_w^2} (\{Q^1\}) = \{ t_2(S) \ll l(S): l(S) \ll t_2(S): {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S): \\
 & c(S) \ll t_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S), {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \} \\
 & c(S) \ll t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \}
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 & \Delta_{\{t\}}^{LP_w^2} (\{Q^2\}) = t_2(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid t_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S): \\
 & t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll c(S), t_2(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid c(S) \ll t_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \} \\
 & c(S) \ll t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S))
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 & R_Q \uparrow_2 (\emptyset) [Q^{\text{append}}] = \{ {}_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t_2(S) \ll t_3(S): \\
 & t_3(S) \ll t_3(S) \} \cup \Delta_{\{c\}}^{LP_w^2} (\{Q^3\}) = \{ t_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \} \\
 & t_3(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \ll t_1(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \mid t_2(\Gamma^{\text{list\_var}}(S)) \}
 \end{aligned} \tag{25}$$

Оскільки може бути показано, що  $R_Q \uparrow_3 (\emptyset) = R_Q \uparrow_2 (\emptyset)$ , то ми маємо  $S^Q = R_Q \uparrow_2 (\emptyset)$ .

Припустимо, що ми зацікавлені в абстрактній поведінці запиту, коли він виконує виклик свого першого і другого аргументів, які відповідають першому і другому спискам. Це означає, що ми хочемо обчислити

$$KA^{LP_w^2} \left[ \begin{array}{l} x^1(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \ll x^2(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \ll x^3(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \\ x^2(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \ll x^3(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \end{array} \wedge Q_{(x^1, x^2, x^3)}^{append} \right] S^Q = \{ x^1(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \ll x^1(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \ll x^2(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \ll x^2(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \ll x^3(\Gamma^{list\_var}(u_p)) \} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} x^1(\Gamma^{list\_var}(S)) \ll x^1(\Gamma^{list\_var}(S)) \ll x^3(\Gamma^{list\_var}(S)) : x^2(S) \ll x^3(S) : \\ x^2(\Gamma^{list\_var}(S)) \ll x^3(\Gamma^{list\_var}(S)) \quad x^3(S) \ll x^2(S) : \\ x^3(\Gamma^{list\_var}(S)) \ll x^1(\Gamma^{list\_var}(S)) \quad x^2(\Gamma^{list\_var}(S)) \} \end{aligned} \quad (27)$$

Оскільки із обох записів можна вивести факт  $x^3(\Gamma^{list\_var}(u_p))$  через застосування введеної процедури резолюції  $d\_inf()$ , то ми можемо зробити висновок, що  $x^3$  буде відповідати об'єднаному списку виклику із аргументами, що відповідають вихідним спискам (твердження 1).

Використаємо введений абстрактний тип  $u_p$  для представлення всієї множини термів,  $number\_var$  – для представлення цілих типів даних,  $g\_exp$  – для представлення абстрактних виразів для  $x$ , і  $nt\_alg$  для представлення виразів для  $x$ , які не включають трансцендентних операцій. Тепер, ми можемо виконати оцінювання запиту:

$$(x^1(nt\_alg) \ll x^2(nt\_alg)) \wedge d\_inf(x^1, x^2). \quad (28)$$

Результатом такого оцінювання буде множина обмежень. Якщо предикат *хиба* може бути одержаний в результаті застосування процедури резолюції до даного обмеження, то таке обмеження може бути вилучено із подальшого розгляду. В нашому випадку обмеження  $O^3$ ,  $O^6$ ,  $O^7$  і  $O^8$  можуть бути видалені. Із решти чотирьох обмежень ми виведемо факт  $x^2(g\_exp)$ . Це означає, що другий аргумент нами встановлено на відповідність сформованому виразу. Більше того, ті ж самі обмеження дозволяють нам вивести факт  $x^2(nt\_alg)$ , що означає, що другий аргумент може бути також прив'язаний і до алгебраїчного виразу. Множина обмежень, обчислених для запиту  $Q$  матиме вигляд:

**Обмеження 1.:**  $хиба \ll x^1(number\_var), x^1(nt\_alg) \ll x^1(g\_exp) \ll x^2(nt\_alg) \ll x^2(g\_exp) \ll x^2(number\_var) \ll$

**Обмеження 2.:**  $x(nt\_alg) \ll x(g\_exp) \ll x(number\_var) \ll x^2(nt\_alg) \ll x^2(g\_exp) \ll x^2(number\_var) \ll$

**Обмеження 3.:**  $хиба \ll x(nt\_alg), хиба \ll x(number\_var), хиба \ll x^2(nt\_alg), хиба \ll x^2(number\_var), x^1(nt\_alg) \ll x^1(g\_exp) \ll$

**Обмеження 4.:**  $x^1(\text{number\_var})$ ,  $x^2(\text{number\_var})$ ,  $x^1(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{nt\_alg})$ ,  $x^2(\text{g\_exp})$

**Обмеження 6.:**  $x^1(\text{number\_var})$ ,  $x^2(\text{number\_var})$ ,  $x^1(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{nt\_alg})$ .

**Обмеження 7.:**  $x^1(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{number\_var})$ ,  $x^2(\text{nt\_alg})$ ,  $x^2(\text{number\_var})$ ,  $x(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{g\_exp})$ ,  $x^1(\text{g\_exp})$ .

**Обмеження 8.:**  $x^1(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{number\_var})$ ,  $x^2(\text{nt\_alg})$ ,  $x^2(\text{number\_var})$ ,  $x^1(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{g\_exp})$ ,  $x^1(\text{g\_exp})$ .

**Обмеження 9.:**  $x^1(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{number\_var})$ ,  $x^2(\text{nt\_alg})$ ,  $x^2(\text{number\_var})$ ,  $x^1(\text{nt\_alg})$ ,  $x^1(\text{g\_exp})$ ,  $x^2(\text{g\_exp})$ .

Відмітимо, що даний результат став можливим, тільки завдяки використанню представлення інформації в формі заперечень.

Введені означення є обгрунтованими, оскільки при їх побудові ми не виходили за рамки процедури обчислення обгрунтованих семантик прийнятих в теорії абстрактного логічного програмування і стабільних семантик для логічних програм Горна [3].

**Висновки:** таким чином в даній статті виконано побудову способу застосування класичної процедури *Append* при виконанні аналізу абстрактних типів даних модифікаційних предикатних запитів для інформаційних інтелектуальних систем на основі баз даних і знань нафтогазової предметної області. Відмінними рисами пропонованого підходу є використання представлення інформації в формі логічних заперечень, явне задання поліморфних залежностей між абстрактними типами даних, і використання логічних програм, як абстрактного домену для аналізу модифікаційних запитів і побудова абстрактних доменів на формально-логічній основі теорії послідовного уточнення доменів.

**Подальші розвідки** даного напрямку будуть напрямлені на дослідження властивостей модифікаційних запитів і побудови відображення множини логічних програм на множини модифікаційних предикатних запитів в рамках конкретних процедур набуття знань нафтогазової предметної області.

In given paper the method of application of classic procedure *Append* is offered at implementation of analysis for abstract data types of predicate queries modification for the information intellectual systems on the basis of databases and knowledgebases. The use of information representation in the form of logical negation, explicit representation of polymorphic dependencies between abstract data types, and the construction of abstract domains, on the formal-logical basis of theories of sequentially improving of domains and abstract interpretation is the distinguishing features of offered approach.

1. Шекета В.І. Інформаційна система для прогнозування нафтогазоносних покладів. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Херсон.– 1999.-130с.

2. Шекета В.І. Модифікаційні предикатні запити, як інструмент підтримки діалогу з користувачем в інформаційних системах на основі баз даних і знань. Вісник Терно-

пільського державного технічного університету.- 2003-Серія:Математичне моделювання. Том 8-№4 -2003- С.113-119.

3. Barbuti R., Giacobazzi R. A Bottom-up Polymorphic Type Inference in Logic Programming. *Science of Computer Programming*, 19(3).– 1992.–P.281–313
4. Apt K. R., Marchiori E. Reasoning about Prolog Programs: from Modes through Types to Assertions. *Formal Aspects of Computing*, 6(6A).–1994.P–743–765 .
5. Yardeni E., Shapiro E. A Type System for Logic Programs. *Journal of Logic Programming*, 10.–1991.–P.125–135
6. Hentenryck P., Cortesi A., Charlier B. Type Analysis of Prolog using Type Graphs. *Journal of Logic Programming*, 22(3).–1995.–P.179–209
7. Codish M., Demoen B. Deriving Polymorphic Type Dependencies for Logic Programs Using Multiple Incarnations of Prop. In *Proc. of the first International Symposium on Static Analysis*, volume 864 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag.–1994–P.281–296
8. Codish M., Lagoon V. Type Dependencies for Logic Programs Using ACI Unification. In *Proceedings of the 1996 Israeli Symposium on Theory of Computing and Systems*, IEEE Press, June 1996.–P.136–145
9. Gallagher J., Waal D. A. Fast and Precise Regular Approximation of Logic Programs. In Pascal Van Hentenryck, editor, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Logic Programming*, Santa Margherita Ligure, Italy, The MIT Press.–1994.–P.599–613
10. Janssens G., Bruynooghe M. Deriving Descriptions of Possible Values of Program Variables by means of Abstract Interpretation. *Journal of Logic Programming*, 13(2 & 3), 1992.–P.205–258
11. Kifer M., Wu J. A First Order Theory of Types and Polymorphism in Logic Programming. In *IEEE Symposium on Logic in Computer Science*.– 1991.
12. Lunjin Lu. A Polymorphic Type Analysis in Logic Programs by Abstract Interpretation. *Journal of Logic Programming*, 36(1).–1998.–P.1–54
13. Papadimitriou C. *Computational Complexity*. Addison-Wesley.–1994.
14. Smaus J.-G., Hill P., King A. Mode Analysis for Typed Logic Programs. In *Proc. of the LOPSTR'99 Workshop*, Venice, Italy, September 1999.– P.163–170
15. Шекета В.І. Аналіз еластичних семантик шаблонів виклику модифікаційних предикатних запитів // Вісник Тернопільського державного технічного університету / Технічні науки – 2004.-Том 9-№1.-С.117-122.

## ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОЙ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОЙ СППР

Шерстюк В.Г.

CBR (Case-Based Reasoning), или метод рассуждения на основе прецедентов, является одним из интенсивно развиваемых направлений в исследованиях по искусственному интеллекту. По определению Р. Шенка [1] «СБР – способ решения новых проблем путем адаптации решений, которые использовались ранее в аналогичных ситуациях».

Прецедент включает проблемную ситуацию и ее решение (рис. 1).

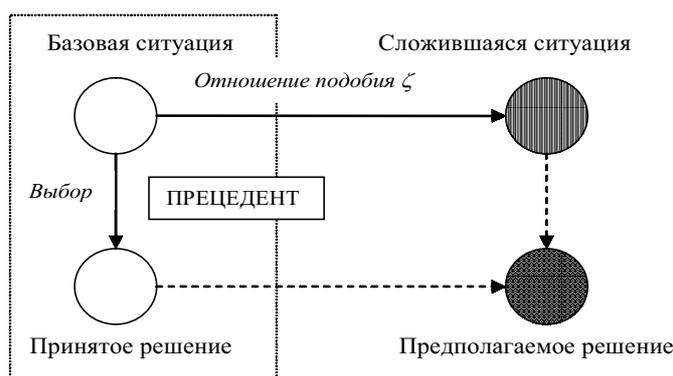


Рис. 1 Принятие решений на основе прецедента

Как только будет выявлена проблемная ситуация и будет принято решение на основе уже имеющихся (хранимых) прецедентов, соответствующая информация упаковывается в контейнер, называемый прецедентом и сохраняется в хранилище прецедентов, в качестве которого могут использоваться традиционные средства СУБД, специализированные серверы баз знаний, многомерные базы данных и т.д., для последующего использования. Ситуация, для которой был сохранен прецедент, считается опорной, или *базовой* [2].

Выбор наиболее подходящего в конкретной ситуации прецедента позволяет сформировать на его основе решение в готовом виде, либо требует проведения дополнительных действий по адаптации решения с целью учета различий в контекстах сложившейся и базовой ситуации.

Если подходящий прецедент не обнаружен или процесс адаптации требует привлечения дополнительной информации, принятие решения потребует обращения к базе знаний, содержащей основные сведения о предметной области. Общие (domain knowledge) знания о предметной области являются вспомогательными, и могут представляться при помощи продукционных правил, фреймов или семантических сетей.

Метод, с помощью которого будет осуществляться вычисление меры подобия (сходства) прецедентов, задается во время создания СБР-системы разработчиками. Наиболее популярным и часто используемым методом является поиск ближайшего соседа, в основе которого лежит способ измерения степени совпадения значений атрибутов (свойств), определяющих прецедент.

Типовой *прецедент* представляет собой структуру, состоящую из: *описания проблемы*, характеризующего сложившуюся ситуацию на момент активизации прецедента, и *решения*, содержащего список возможных вариантов принятия решений, связанных с данной проблемой, а также описание ситуации, которая (возможно) будет иметь место после выбора прецедента. Процесс функционирования прецедентных СППР обычно представляется в виде так называемого СБР-цикла (рис. 2), состоящего из четырех основных фаз [3]:

- 1) получение (выбор) из хранилища наиболее уместного прецедента или множества прецедентов, обычно на основе заданного отношения подобия;
- 2) использование выбранных прецедентов для принятия решения поставленной задачи;
- 3) пересмотр и коррекция (адаптация) в случае необходимости принимавшихся ранее в выбранных прецедентах решений;
- 4) сохранение в хранилище принятого решения и сложившейся ситуации в качестве нового прецедента или соответствующее изменение выбранного прецедента, что может быть полезным в дальнейшем при решении аналогичных задач.

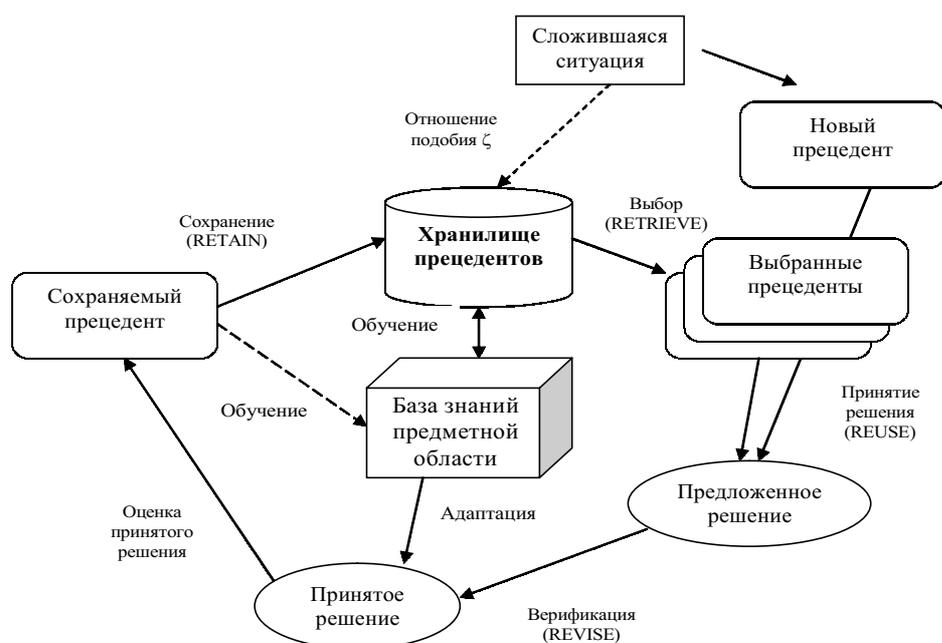


Рис. 2 Фазы CBR-цикла

Обычно CBR-цикл выполняется при непосредственном взаимодействии с ЛПП. Многие прецедентные системы только извлекают из хранилища наиболее уместные прецеденты и оставляют процесс адаптации на усмотрение ЛПП, поскольку автоматизация процесса адаптации является сложной задачей и практически не поддается обобщению, а зачастую в адаптации нет необходимости, поскольку выбранные прецеденты содержат достаточно информации для принятия решения.

Если же адаптация необходима, для ее проведения можно использовать базу знаний предметной области, содержащую набор необходимых фактов и правил, и методы индуктивного и(или) абдуктивного машинного обучения.

Основным достоинством CBR-систем является их простота и легкость реализации, что делает прецедентные системы хорошим средством для представления знаний и поддержки принятия решений, однако и прецедентным системам присущи недостатки.

В качестве основных недостатков при использовании прецедентного подхода для разработки СППР можно отметить:

- 1) сложность учета динамических факторов;
- 2) невозможность представления на уровне формальных описаний прецедентов связи между факторами, например в виде уравнений;
- 3) затруднительность учета ограничений по принятию решений, задаваемых множеством целевых факторов, а не состояний.

Традиционно указанные недостатки преодолевают или ослабляют, разрабатывая гибридные системы [4], когда объединяют механизм принятия решений на основе прецедентов с механизмом, основанным на правилах или ограничениях, что в свою очередь

усложняет СППР.

Таким образом, для использования прецедентной СППР в динамичных предметных областях в условиях неполноты и неопределенности информации актуальна разработка гибридной СППР на основе ситуационного или сценарного подхода и прецедентной системы. Назовем указанный класс гибридных СППР *сценарно-прецедентными*.

Целью статьи является формирование подхода и теоретических основ создания гибридных прецедентных систем.

Для этого необходимо построить формальную модель гибридной сценарно-прецедентной СППР.

Представим формальную модель следующим образом.

Пусть  $A$  – конечное множество параметров состояния,  $X$  – множество значений параметров, определяемое как  $X = \bigcup_{m \in A} x_m$ , где  $x_m$  – область определения параметра  $m$ .

**Определение 1.** Состояние системы  $C$  определяется как совокупность значений параметров (факторов)  $C = \langle \bigcup_{x \in A} x_m \rangle$ .

Обозначим множество возможных состояний системы (конечное или бесконечное) как  $W$ . Тогда некоторое состояние системы можно охарактеризовать как:

$$C = \langle \Theta_A^W, \Theta_O^W, \Theta_F^W, R_O^W \rangle, \quad (1)$$

где  $\Theta_A^W$  – множество выполнимых действий (процедур);

$\Theta_O^W$  – множество объектов;

$\Theta_F^W$  – множество свойств объектов;

$R_O^W$  – множество отношений между объектами.

Задать ситуацию  $s_i$  в таком пространстве состояний – значит указать свойства  $f \in \Theta_F$  объектов  $\theta_k \in \Theta_O$  и отношения между ними  $r_p \in R_O$ , а также множество выполнимых действий, которые имели, имеют или будут иметь место в некоторый момент времени  $t_i$ .

Графическая интерпретация понятия состояния представлена на рис. 3.

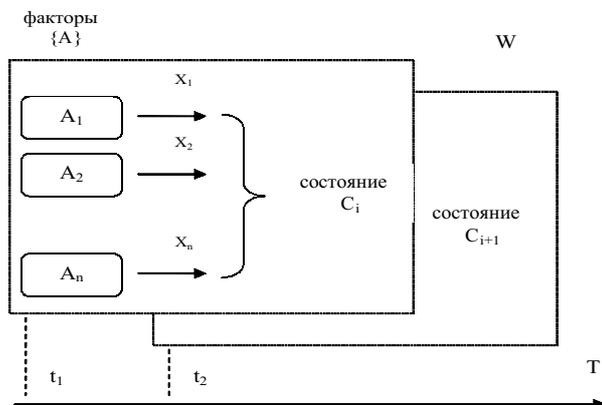


Рис. 3 Состояния системы

**Определение 2.** Ситуация  $s_i$  есть оценка совокупности значений параметров системы и связей между ними в заданный момент времени  $t_i$ :  $s_i = \langle \tilde{C}_{t_i}, L, t_i \rangle$ , где  $\tilde{C}_{t_i}$  – оцен-

ка состояния системы (значений параметров) в момент времени  $t_i$ ,  $L$  – множество известных на момент времени  $t_i$  связей между факторами,  $t_i \in T$ .

Совокупное множество ситуаций определяется как  $S = \bigcup_{C \in W} s_i$ . Существование в системе ситуации  $s_i$  определяется истинностным значением выражения  $s_i = \emptyset$ ,  $s_i \in S$ .

Связи между факторами могут быть постоянными и причинно-следственными отношениями, зависящими от произошедших событий и протекающих процессов.

Поскольку ситуация отличается от состояния системы тем, что в ней необходимо отразить связи между факторами и оценить значения качественных параметров, целесообразно описывать ситуации как множества предикатов [5].

Допустим, у нас имеется:

- множество *сортов переменных* (*тип* есть множество заданных сортов);
- множество заданных *констант*;

- конечное множество *предикатных символов*  $\Sigma = \{A_1, \dots, A_n\}$ , каждый из которых имеет заданный *тип*;

- связки  $\neg$  (*не*),  $\wedge$  (*и*),  $\vee$  (*или*).

Поскольку для описания ситуаций не требуется язык логики предикатов первого порядка, предложенный способ описания достаточно прост и компактен.

Предикатные символы позволяют определить связи между факторами когнитивной модели ситуации в заданной предметной области. Соответственно, каждый предикатный символ  $A_i$  имеет ассоциированное натуральное число  $n_i \geq 1$ , задающее его местность.

Для корректной связи между когнитивной моделью ситуации и ее описанием в качестве предиката необходимо разделить множество предикатных символов на непересекающиеся подмножества входных факторов  $I$  и целевых факторов  $O$ :  $A = I \cap O$ .

Пусть *атомарная формула* имеет вид  $A_i = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ , где  $c_j$  – константа, литерал является атомарной формулой или ее отрицанием.

*Формула* строится из атомарных формул с использованием связок *не*, *и*, *или*.

Полученный в результате язык описания ситуаций  $L$  является простым пропозициональным языком, поскольку в нем отсутствуют объектные переменные, таким образом множество интерпретаций  $\Omega$  языка  $L$  есть множество означиваний предикатов путем подстановки пропозициональных переменных.

Можно выделить два важных свойства ситуаций: *множественность* и *неоднородность* исходных данных. Важно отметить, что ситуация всегда представляет собой некую оценку (анализ, обобщение) множества данных, более того, эта оценка является субъективной, т.к. зависит от средств и методов обобщения конкретного ЛПР.

Определение 3. Обобщенное описание (отображение) системы с помощью ситуаций называется *ситуационной моделью*  $ST$ :  $ST = \langle \bigcup_{i=0}^n s_i | t_i \rangle$ .

Пусть  $S$  – пространство возможных ситуаций,  $R$  – пространство возможных решений.

Определение 4. *Прецедент*  $e$  есть пара  $\langle s, r \rangle \in \wp = S \times R$ , состоящая из ситуации  $s \in S$  и связанного с ней решения  $r \in R$ .

Ситуация  $s \in S$  задается с помощью множества формул языка  $L$ .

Всякой ситуации  $s$  могут соответствовать несколько решений, таким образом, допустимы прецеденты вида  $\langle s, r \rangle$  и  $\langle s, r' \rangle$ , которые различны в случае, если  $r \neq r'$ .

Данные в СППР представлены множеством прецедентов  $M$ :

$$M = \{ \langle s_1, r_1 \rangle, \langle s_2, r_2 \rangle, \dots, \langle s_n, r_n \rangle \} \quad (2)$$

Каждый прецедент  $e_i$  может рассматриваться как условная импликация вида

$$s_i \Rightarrow r_i, \quad (3)$$

таким образом, если задана некоторая ситуация  $s \approx s_j$  и существует прецедент  $e_j = \langle s_j, r_j \rangle$ , можно утверждать, что  $r_j$  является *приближенным* (или *правдоподобным*) решением для ситуации  $s$ .

Более того, чем ближе ситуация  $s$  к ситуации  $s_j$ , тем правдоподобнее, что  $r_j$  является решением для  $s$  [6].

Для нахождения степени близости ситуации  $s$  к ситуации  $s_j$  и соответственно оценки близости решения  $r_j$  к искомому используется функция подобия  $\zeta$ , на ее основе строится отношение подобия между прецедентами и выводится мера подобия  $SM$ .

Отношение подобия может быть построено только для множества входных факторов ситуации  $I$ .

Определение 5. *Прецедентная система* представляет собой структуру  $\langle M, SM_\Omega, K \rangle$ , где  $M$  – хранилище прецедентов,  $SM_\Omega$  – мера подобия, заданная на множестве интерпретаций  $\Omega$  языка  $L$ , описывающего входные ситуации,  $K$  – множество формул языка  $L$ .

Множество формул  $K$  составляет базу знаний о предметной области, полученную экспертным путем или с помощью методов машинного обучения.

Для каждого прецедента  $e_i$  можно с помощью оценки подобия вычислить степень уместности решения  $r_i$  в ситуации, близкой к  $s_i$ . В случае, если для этого можно также использовать имеющиеся знания о предметной области, можно утверждать, что формула

$$K \rightarrow (s \rightarrow \diamond_{SM_i} s_i) \quad (4)$$

выполнима для класса ситуаций  $s_{e_i}$ .

Хранилище прецедентов  $M$  задает экстраполяцию отношения импликации для (3), и фактически является базой знаний, содержащей приближенные импликации:  $M^* = \{s_i \Rightarrow_{\zeta_i} r_i \mid (s_i, r_i) \in M\}$ . Соответственно формула

$$M^* \rightarrow (s_i \Rightarrow_{\zeta_i} r_i) \quad (5)$$

также выполнима для класса ситуаций  $s_{e_i}$ .

Таким образом можно сказать, что прецедентная система выполняет функцию вывода по аналогии:

$$\left\{ K \rightarrow (s \rightarrow \diamond_{SM_i} s_i) \right\}_{i=1..n} \cup \{K, M^*, s\} \vdash \diamond_{SM_i \otimes \zeta_i} r_i. \quad (6)$$

Решением для любого прецедента  $e_i$  является *план* действий, направленных на компенсацию возмущающих воздействий, приведших систему в состояние отклонения от заданной целевой траектории.

Под *возможным планом* будем понимать частично упорядоченную последовательность действий, направленную на достижение целевого состояния системы из некоторого заданного начального состояния [7].

Возможный план становится планом действий в результате принятия решения ЛПР.

План действий с точки зрения прецедентного принятия решений должен включать описание списка граничных условий, целей и способов их достижения (рис. 4). Список граничных условий (список ограничений) определяет множество критических параметров системы.

Цель представляет собой желательное (целевое) состояние, которое должна достичь система в результате выполнения данного плана.

Список ограничений определяет начальные условия выполнения плана (предусловия выполнения), цель характеризует результат выполнения плана (постусловия).

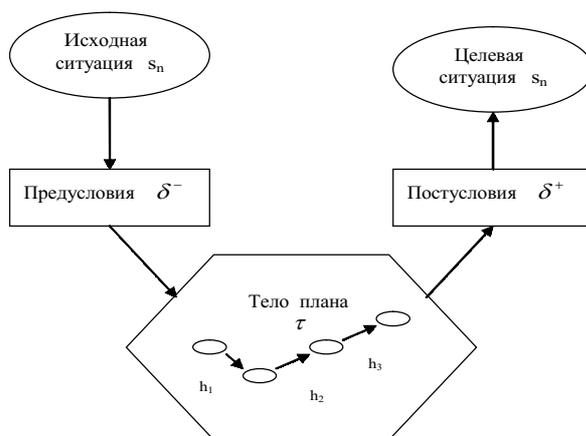


Рис. 4 Представление плана действий

Таким образом, план действий должен состоять из тела плана, содержащего информацию о порядке его реализации, и дескриптора плана, характеризующего пред- и постусловия его выполнения.

*Тело плана* обозначим  $\tau$ , совокупность существующих тел  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  образует множество  $\Delta_\tau$ . Понятно, что тело плана должно включать описание последовательности действий.

Элементарным фрагментом тела плана является *действие*  $\xi$ ,  $\xi \in \Xi$ , где  $\Xi$  – множество допустимых действий. Выполнение действия  $\xi_i$  представляет собой *шаг* плана и обозначается  $h_i$ .

Тогда тело плана может быть представлено следующим образом:

$$\tau = \left\{ \bigcup_{i=1}^n \xi_i \right\}; C_{i+1} = \xi_i(C_i). \quad (7)$$

**Определение 6.** Дескриптор плана  $\delta$  есть бинарное отношение вида  $\delta \subseteq S \times S$ , для которого выполняется ограничение: если  $((s, t), (s', t')) \in \delta$ , тогда  $s = s'$ .

**Определение 7.** Дескриптор предусловия  $\delta^-$  определяет множество ситуаций  $s^-$ , в которых допустимо выполнение тела плана  $\tau$ , т.е. является предусловием осуществления  $\tau$ .

**Определение 8.** Дескриптор постусловия  $\delta^+$  определяет множество ситуаций  $s^+$ ,

которые могут возникнуть в результате выполнения тела плана  $\tau$ , т.е. является постуловым для  $\tau$ .

Если  $(s, s') \in \delta$ , то возникновение ситуации  $s'$  возможно в результате выполнения  $\tau$ , начиная с ситуации  $s$ . Множество всех дескрипторов обозначается как  $\Delta_\delta$ .

Определение 9. План  $\gamma$  есть пара  $(\tau, \delta)$ ,  $\tau \in \Delta_\tau, \delta \in \Delta_\delta$ , множество возможных планов есть  $\Delta_\gamma = \Delta_\tau \times \Delta_\delta^\tau$ .

Если  $\gamma \in \Delta_\gamma$  – некоторый план, то  $\tau(\gamma) \in \Delta_\tau$  – тело плана,  $\delta(\gamma) \in \Delta_\delta$  – дескриптор плана,  $\delta^-(\gamma) \in \Delta_\delta$  – дескриптор предусловий,  $\delta^+(\gamma) \in \Delta_\delta$  – дескриптор постусловий.

Если  $s \in \delta^+(\gamma)$ , то  $\delta(\gamma)(s)$  представляет образ  $s$  в  $\delta(\gamma)$ , т.е.

$$\delta(\gamma)(s) = \{s' | (s', s) \in \delta(\gamma)\}. \quad (8)$$

Определение 10. План  $\gamma$  является релевантным [8] ситуации  $s$ , если его тело  $\tau(\gamma)$  начинает выполняться из ситуации  $s$ , такой, что  $s \in \delta^-(\gamma)$  и заканчивается в некоторой ситуации  $s'$ , при этом  $(s, s') \in \delta(\gamma)$ .

Определение 11. Ограниченный путь  $p'$  (ограниченный локальный курс событий) есть временная последовательность  $(t_0, t_1, \dots, t_k)$ , такая что  $\forall u \in \{0, 1, \dots, k-1\}$ ,  $(s_u, s_{u+1}) \in S$ .

Определение 12. Полный путь  $p$  есть временная последовательность  $(t_u | u \in \mathbb{N})$ , при этом  $\forall u \in \mathbb{N}$ ,  $(s_u, s_{u+1}) \in S$ .

Если  $p$  – некоторый путь и  $u \in \mathbb{N}$ , то  $p(u) = s_{u+1}$ . Совокупное множество путей обозначим  $\Delta_p$ .

Процесс выполнения некоторого плана  $\gamma$  обозначим как  $\otimes \gamma$ . Тело плана  $\tau$  выполняется на пути  $p$ , ограниченном временным интервалом  $[u, v] \in T$ .

Определение 13. План  $\gamma$  является выполнимым, если выполняются следующие условия:

- 1)  $\forall \gamma \in \Delta_\gamma, \forall s \in S \quad p \in \Delta_p(s)$ ;
- 2)  $\forall u, v \in \mathbb{N}, \otimes(\tau(\gamma), p, u, v) \Rightarrow ((s, p(u)) \in \delta^-(\gamma)) \wedge ((s, p(v)) \in \delta(\gamma) \wedge ((s, p(u)))$

Задача планирования действий задается тогда следующим образом: заданы исходная  $s_n$  и целевая  $s_k$  ситуация, необходимо из множества процедур  $\tau_i \in \Theta_A$  построить выполнимый план действий  $\gamma$ , который, будучи примененным к  $s_n$ , позволяет достичь  $s_k$ .

Сценарий  $\Sigma$  рассматривается как кортеж, состоящий из актуального состояния системы (ситуации), целевого состояния системы (и/или значений целевых факторов) и множества планов достижения целевого состояния. Для каждого плана может быть также представлена оценка возможности его выполнения:

$$\Sigma = \langle s_n, \{\gamma_i, s_{k_i}, \mu_i\} | i \in 1..n \rangle, \quad (9)$$

где  $s_n$  – исходная ситуация;

$\gamma_i$  – план;

$s_{ki}$  – конечная (целевая) ситуация в случае выполнения плана  $\gamma_i$ ;

$\mu_i$  – оценка возможности достижения целевой ситуации  $s_{ki}$  при выполнении плана  $\gamma_i$ .

Множество уместных планов  $\gamma$  для некоторой ситуации  $s_j$  есть множество решений  $r_i$  множества прецедентов  $e_i$ , выбранных из хранилища прецедентов по степени близости ситуации  $s_j$  к  $s_i$ .

Таким образом, прецедентная система является «преобразователем» актуальной ситуации в сценарий решения (рис. 5), а сценарий является траекторией продвижения к необходимому и возможному будущему состоянию системы. Отличительной особенностью сценария является его многовариантность т.е. допустимость рассмотрения нескольких альтернативных вариантов развития ситуации, а соответственно и нескольких целевых состояний.

Группировка сценариев в классы даст возможность выбора наиболее рациональной стратегии воздействия на ситуацию. Получение широкого спектра вариантов развития ситуации позволяет выявить критические ситуации для принятия решений, а также возможные последствия предлагаемых альтернативных вариантов решений с целью их сопоставления и выбора наиболее эффективного.

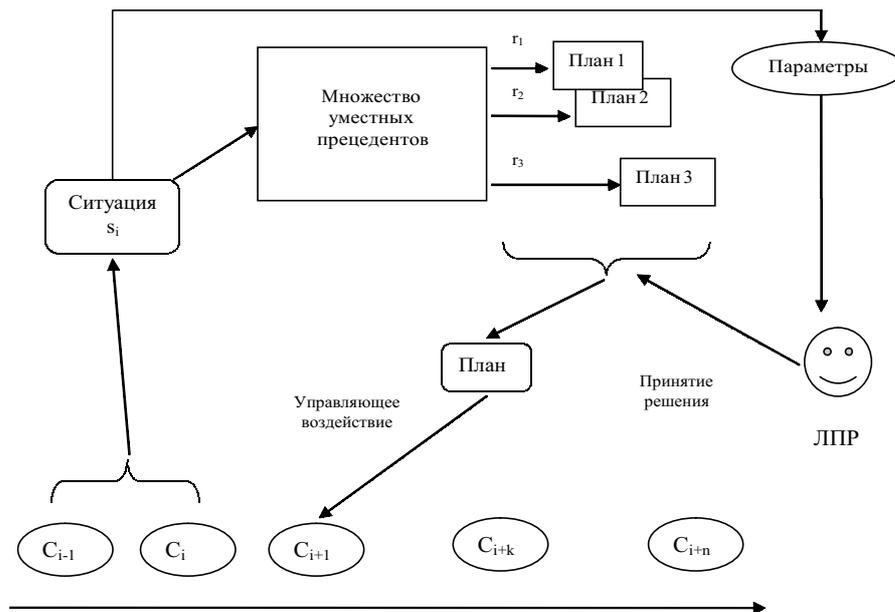


Рис. 5 Схема функционирования СППР

**Выводы.** В результате исследования на основе комбинации сценарного и прецедентного подходов, известных из ряда работ в области искусственного интеллекта, построена формальная модель нового класса интеллектуальных систем поддержки принятия решений – сценарно-прецедентных СППР. Полученная гибридная модель дает возможность разработки интеллектуальных систем, пригодных для работы в условиях неполноты и неопределенности информации в сложных динамичных предметных областях. Дальнейшим развитием модели может являться включение эпизодов (или элементарных последовательностей событий), обработка которых может быть выполнена с применением методов извлечения знаний.

The theoretical basis of a combination script and case approaches in the formal model of a new class of intelligent decision support systems – script-case system is constructed in this paper. The received hybrid model enables development of intelligent systems, suitable for works in conditions of incompleteness and uncertainty of the information in complex dynamical domains.

1. Джексон П. Введение в экспертные системы. – М. – Вильямс. – 2001. – 624 с.
2. Нечипоренко О.А. Использование технологии Case-Based Reasoning в проектировании программных систем // Перспективные информационные технологии и информационные среды. – Таганрог. – 2002. – № 3. – с. 27-32.
3. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Communications. – 1994. – Vol. 7. – №1. – pp. 39-59.
4. Main J., Dillon T.S. A hybrid case-based reasoner for footwear design // Case-Based Reasoning Research and Development. – Lecture Notes in Artificial Intelligence. – 1999. – Vol. 1650. – pp. 499-509.
5. Plaza E., Esteva F., Garcia P., Godo L., Lopez de Mantaraz R. A logical approach to case-based reasoning using fuzzy similarity relations // Information Sciences. – 1997. – Vol. 106. – №1-2. – pp. 105-122.
6. Dubois D., Esteva F., Garcia P., Godo L., Lopez de Mantaras R., Prade H. Case-Based Reasoning: A Fuzzy Approach. – Lecture Notes in Computer Science. – Springer. – 1999. – vol. 1566. – pp. 79–91.
7. Гладун В.П. Планирование решений. –К.: Наукова думка. – 1987. – 168 с.
8. Ходаков В.Е., Шерстюк В.Г., Степанский К.Г., Дидык А.А., Мартынов А.Н. Методы оценки релевантности информационных структур в базах знаний // Проблемы бионики. – Харьков. – 1998. – вып. 49. – с. 186-195.

## МАТЕМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМОПОДІБНО КОДОВАНИХ СИГНАЛІВ

Головащенко Н.В.

В останній час в технічній науці велика увага приділяється розробці та вдосконаленню системам електроніки та зв'язку. Це зобумовлено тим, що при допомозі різноманітних технічних систем і пристроїв вирішуються такі проблеми, як передача інформації, добуття інформації з електромагнітних коливань, обробка, зберігання і відображення інформації, передача команд на управляемі об'єкти, контроль і забезпечення функціонування вимірювальних і виробничих комплексів. В сучасному розвитку науки і техніки інформаційне довкілля постійно змінюється і доповнюється, тому і засоби, які забезпечують і обслуговують це інформаційне довкілля мають постійно розширюватися і вдосконалюватися. Розробки систем зв'язку останнього часу використовують не тільки можливості сучасних технологій, але й найновіші досягнення теорії зв'язку. Вони дозволяють збільшити як об'єми передаваної інформації, так і якість передачі повідомлень.

Великий науковий інтерес викликають інформаційні системи, які запроваджуються для забезпечення функціонування систем промислового управління і автоматики. Відомо, що в таких системах присутній великий об'єм інформації, яку необхідно якісно і швидко передавати. Для досягнення одночасної передачі великої кількості інформації від різних передавачів використовуються цифрові багатоканальні системи передачі даних. [1] Для складних інформаційних систем та для покращення характеристик трактів прийому-передачі даних використовують складні (шумоподібно кодовані) сигнали. [2]

Найбільш загальну уяву про властивості сигналу дає автокореляційна функція комплексної амплітуди сигналу:

$$B_a(\tau, \omega) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} U_m(t) U_m^*(t - \tau) e^{j\omega t} dt \right|, \quad (1)$$

де  $\overline{U_m(t)}$  - комплексна амплітуда сигналу,  $\overline{U_m^*(t)}$  - комплексно-спряжена амплітуда сигналу,  $\omega, \tau$  - частотне і часове зрушення.

Амплітуда центрального піка автокореляційної функції  $B_a(\tau, \omega)$  прямо пропорційна тривалості сигналу. Часовий інтервал кореляції зворотно-пропорційний смугі частот сигналу. Таким чином,  $B_a(\tau, \omega)$  дає змогу говорити про потенційну завадостійкість і розподільчу здатність за часом, що забезпечуються сигналом. У випадку, якщо взаємокореляційні функції сигналів  $B_{B3}(\tau, \omega) \cong 0$ , тобто, не мають яскраво виражених піків, а невеликі викиди розподілені по вісі часу, то  $B_{B3}(\tau, \omega)$  є еквівалентом ортогональності сигналів. Для ортогональних сигналів  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$  має виконуватися умова:

$$\overline{S_1(t) \cdot S_2(t)} = 0 \quad (2)$$

Тобто, осереднений добуток двох сигналів  $S_1(t)$  та  $S_2(t)$  дорівнює нулю. Така властивість сигналів необхідна при побудові багатоканальних систем передачі інформації.

Таким чином, функції  $B_{вз}(\tau, \omega)$  та  $B_a(\tau, \omega)$  дозволяють вирішувати питання про перспективність сигналів для створення багатоканальних систем приймання-передачі.

До класу складних сигналів відносять шумоподібні сигнали. В сигналі присутня введена надмірність кода, і тому база складного шумоподібного сигнала буде набагато більшою за одиницю:

$$B_c = \Delta F \cdot T \gg 1, \quad (3)$$

де  $\Delta F$  - смуга частот сигнала,  $T$  - тривалість сигнала.

Базу сигнала можливо збільшити за рахунок збільшення  $T$ , при цьому збільшиться енергія сигнала і як наслідок цього підвищиться завадостійкість прийома-передачі інформації. А ще можливо збільшити базу за рахунок збільшення  $\Delta F$ , при цьому збільшується розподільна здатність за часом, яка важлива при розробці пристроїв синхронізації.

Автокореляційна функція шумоподібних сигналів (АКФ) подібна АКФ шуму. І, у той же час, вони синтезуються за законами цілком детермінованих функцій – двійкових квазівипадкових послідовностей (КВП), які називають послідовностями еквівалентними імпульсу. Детерміновані послідовності, що мають властивості послідовностей, елементи яких вибираються випадково, називають квазівипадковими. АКФ цих послідовностей має один вузький з великою амплітудою центральний пік і значно менші по амплітуді бічні викиди. АКФ шумоподібних сигналів подібна АКФ КВП.

Застосування КВП як модулюючих функцій забезпечує простоту апаратурних рішень у випадках розширення смуги частот сигналу і збільшення загальної тривалості сигналу.

Структурна схема системи прийому-передачі інформації з використанням шумоподібно кодованих сигналів приведена на малюнку 1.

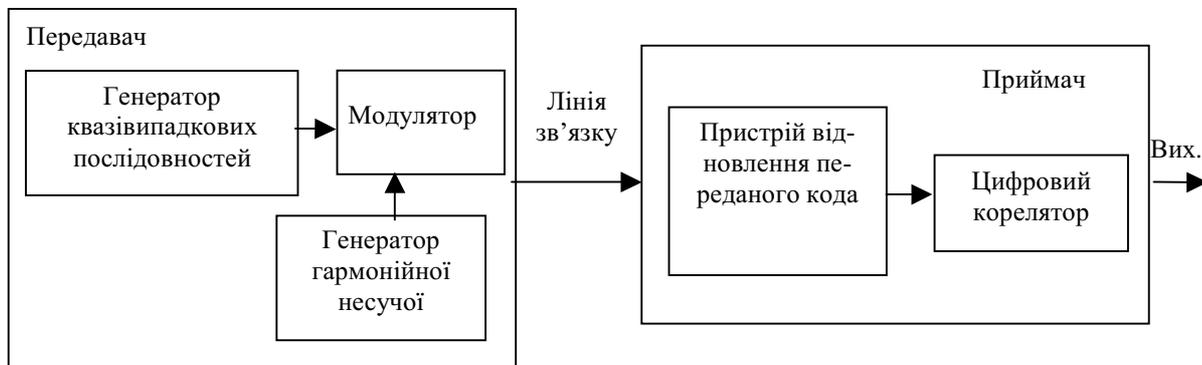


Рис. 1 Структурна схема системи прийому-передачі інформації з використанням шумоподібно кодованих сигналів.

Основними апаратурними частинами прийомо-передаючої системи, які дозволяють відтворити переваги шумоподібних сигналів є генератор квазівипадкових послідовностей і цифровий корелятор. Генератор квазівипадкових послідовностей визначає структуру шумоподібно кодованого сигналу, а цифровий корелятор здійснює узгоджений за структурою сигнала прийом.

Генератори КВП прості в апаратурному виконанні. Можна сказати, що генератори ШКС не викликають утруднень при апаратурній реалізації, а самі ШКС мають гарні потенційні можливості для удосконалення трактів приймання-передачі.

Серед двоїчних квазівипадкових послідовностей найбільш відомі  $m$  – послідовності, це послідовності максимальної довжини.

Усі КВП можна розділити на три групи: лінійні, нелінійні, кодові слова. Лінійні – процес, використаний при її генерації, лінійний. Лінійність обумовлена тим, що до цього процесу можна застосувати принцип суперпозиції. Для нелінійної зостосовуються два методи утворення:

- 1) використання нелінійної логіки при генеруванні;
- 2) застосування нелінійної вихідної матриці разом з лінійним генератором.

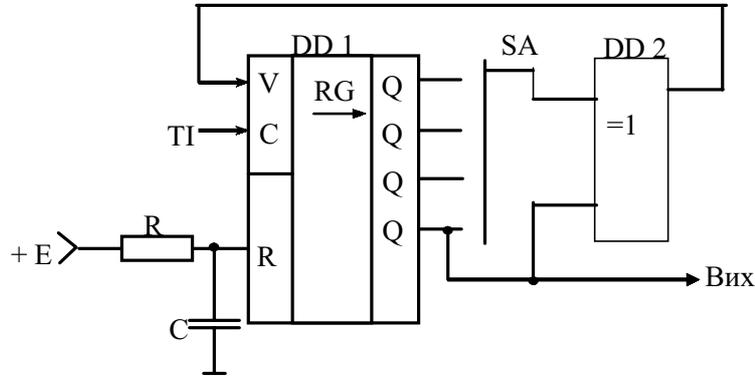


Рис. 2 Канонічна структурна схема генератора КВП

На малюнку 2 зображена канонічна функціональна схема генератора лінійних КВП. Складається вона з регістра зрушення і суматора по модулю 2, включеного в ланцюзі зворотного зв'язку генератора. Період і структура КВП визначаються місцем включення зворотного зв'язку. DD1 – регістр зрушення, у даному випадку чотирирозрядний, тобто,  $n=4$  і максимальна довжина періоду  $m=2^n-1=15$ . DD2 – суматор по модулю 2. SA – комутатор. Він визначає структуру КВП.

Лінійним КВП максимальної довжини притаманні такі основні властивості, що визначаються властивостями чисто випадкових двоїчних послідовностей:

- 1) число “одиниць” за період завжди на одну більше числа “нулів”;
- 2) періодична АКФ дорівнює

$$C(k) = \sum_{i=1}^n a_i a_{i+k} = \begin{cases} n, & k \equiv 0 \pmod{m} \\ -1, & k \not\equiv 0 \pmod{m} \end{cases} \quad (4)$$

де  $a = 1$  чи  $0$ ,  $m$  – довжина максимальної послідовності.

Часові діаграми, які пояснюють принцип створювання ШКС зображені на рис. 3. Їх структура відображує структуру квазівипадкових послідовностей  $\{a_i\}_{\tau_0}^T$ .

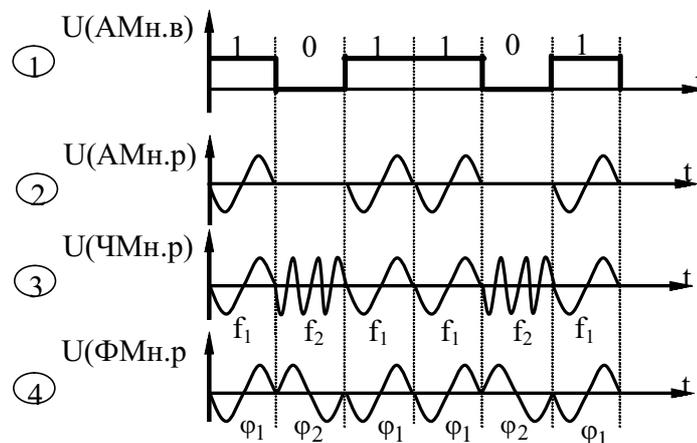


Рис. 3 Часові діаграми шумоподібно кодованих сигналів

В даному випадку:

$$\{a_i\}_{\tau_0}^T \in 101101 = x^5 + x^3 + x^2 + 1 \quad (5)$$

де  $\tau_0$  - довжина елементарного кодового знака,  $T$  – довжина послідовностей.

Принцип формування полягає в тому, що “одиниці” коду повинні відповідати одній амплітуді (частоті, фазі), а “нулі” коду – іншій амплітуді (частоті, фазі). Таким чином можна сформулювати амплітудно-маніпульовані відеосигнали (АМн-відео, часова доріжка 1), амплітудно-маніпульовані радіосигнали (АМн-радіо, часова доріжка 2), частотно-маніпульовані радіосигнали (ЧМн-радіо, часова доріжка 3), фазоманіпульовані радіосигнали (ФМн-радіо, часова доріжка 4). Алгоритми формування можна описати таким чином:

$$\begin{aligned} &\text{для АМн-відео “1”} \rightarrow A \text{ відео, “0”} \rightarrow A \text{ відео} = 0; \\ &\text{для АМн-радіо “1”} \rightarrow A \text{ радіо, “0”} \rightarrow A \text{ радіо} = 0; \\ &\quad \text{для ЧМн-радіо “1”} \rightarrow f_1, \text{ “0”} \rightarrow f_2; \\ &\quad \text{для ФМн-радіо “1”} \rightarrow \varphi_1, \text{ “0”} \rightarrow \varphi_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Згідно з рис. 3 математичні моделі зображених ШКС можна записати таким чином:

$$\begin{aligned} U(\text{ФМн}) &= A \sin[\omega_0 t + \Theta t] \\ U(\text{ЧМн}) &= A[\sin \omega_{01} t \cos \Theta t + A \sin \omega_{02} t \sin \Theta t] \\ U(\text{АММ}_{\text{радіо}}) &= A \sin \omega_0 t \sin \Theta t \\ U(\text{АММ}_{\text{відео}}) &= A \sin \Theta t \end{aligned} \quad (7)$$

де  $A$  – амплітуда сигналу;  
 $\omega_0, \omega_{01}, \omega_{02}$ , - частоти,  
 $\Theta(t) = \pi \{a_i\}_{\tau_0}^T$ .

Структурна модель генератора ШКС зображена на рис. 4, де прийняті наступні позначення:

$G_1 [A_1^B; A_1^P; f_1; \varphi_1]$  - генератор сигналів з першою амплітудою, частотою, чи фазою;  $G_2 [A_2^B; A_2^P; f_2; \varphi_2]$  - генератор сигналів з другою амплітудою, частотою, чи фазою;  $K_1$  і  $K_2$  – перемикаючі пристрої;  $R_1; R_2; R_3$  – пасивний суматор (на резисторах).

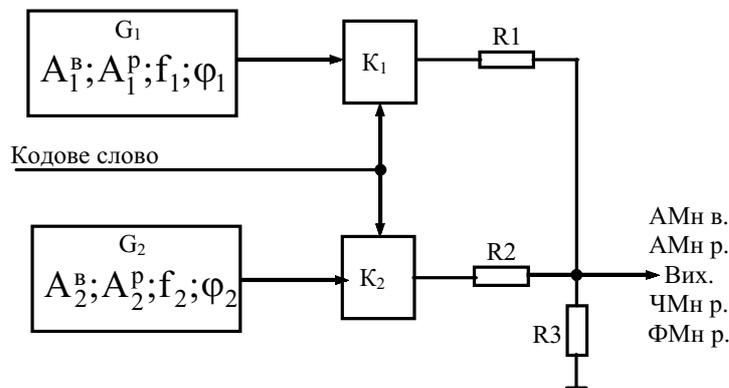
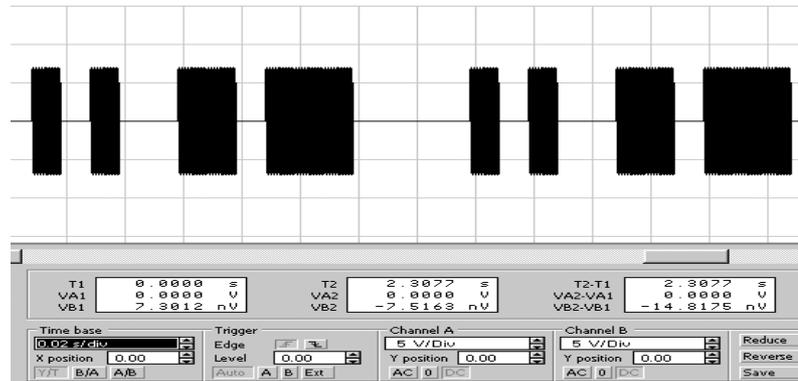


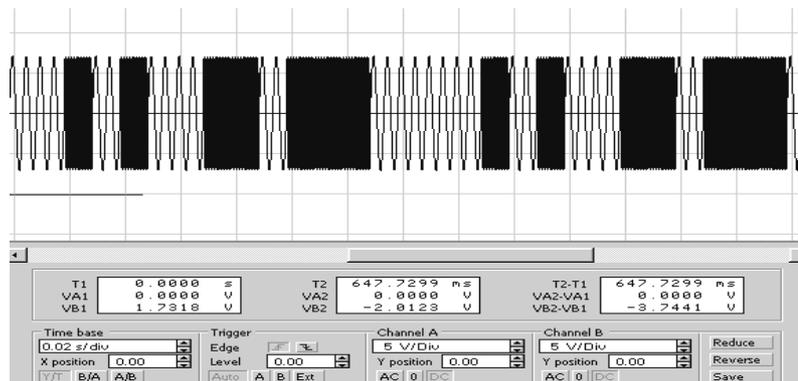
Рис. 4 Структурна схема генератора ШКС

Принцип дії генератора наступний. Якщо в кодовому слові присутній символ “1”, то замкнено перемикач  $K_1$ , а перемикач  $K_2$  розімкнено. Якщо в кодовому слові присутній символ “0”, то замкнено перемикач  $K_2$ , а перемикач  $K_1$  - розімкнено. Таким чином, на виході генератора можна одержати АМн-відео, АМн-радіо, ЧМн-радіо чи ФМн-радіо сигнали.

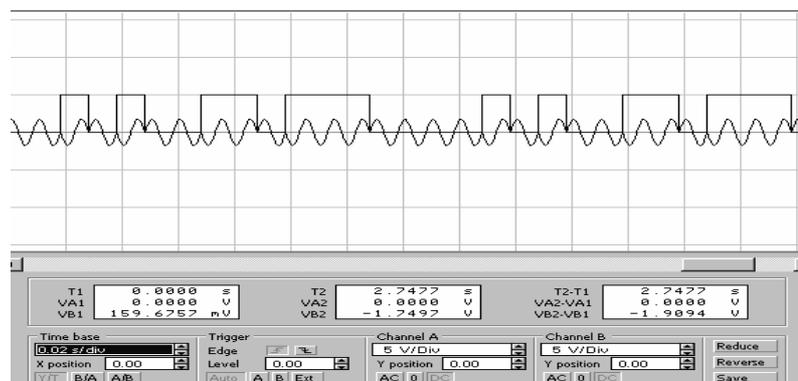
При моделюванні генератора шумоподібно кодovаних сигналів за допомогою прикладної програми Electronics Workbench [3] були здобуті наступні види сигналів, які зображені на рис.5 а) амплітудно-маніпульований сигнал; б) частотно-маніпульований сигнал; в) фазо-маніпульований сигнал.



а)



б)



в)

Рис. 5 Часові діаграми сигналів генератора ШКС  
а) амплітудно-маніпульований сигнал; б) частотно-маніпульований сигнал;  
в) фазо-маніпульований сигнал.

Для передачі сполучень використовується деякий набір /множина/ сигналів. На функціонування лінії зв'язку суттєво впливають кореляційні характеристики цих сигналів.[4]

Нехай використовується набір сигналів  $\{S_i\}=\{S_1, S_2, \dots, S_M\}$ , де  $i = 1, 2, \dots, M$ .

Автокореляційна функція сигналу  $S_j(t)$  буде мати вигляд:

$$\rho'_{jj}(t, \tau) = \overline{S_j(t)S_j(t+\tau)} \quad (8)$$

Взаємокореляційна функція сигналів:

$$\rho'_{jk}(t, \tau) = \overline{S_j(t)S_k(t+\tau)} \quad (9)$$

Риска над символом означає статичне осереднення, тому такі кореляційні функції називаються статичними. В загальному випадку функції  $\rho'_{jj}(t, \tau)$  залежать від двох аргументів: часу  $t$ , та відносного часового зсуву  $\tau$ . Існує клас процесів, для яких кореляційні функції не залежать від часу. Процеси, для яких автокореляційна функція  $\rho'_{jj}(\tau)$  не залежить від часу, називаються стаціонарними в широкому розумінні. Для таких процесів  $\rho'_{jj}(t, \tau) = \rho'_{jj}(\tau)$ . Якщо для функцій  $S_j(t)$  та  $S_k(t)$  взаємокореляційна функція не залежить від часу, то такі функції називаються стаціонарно-пов'язаними у широкому розумінні. Для них справедливе рівняння:

$$\rho'_{jk}(t, \tau) = \rho'_{jk}(\tau) \quad (10)$$

Кореляційні функції наборів сигналів  $\{S_j(t)\}$  утворюють прямокутну кореляційну матрицю  $\|\rho'_{jk}\|$  розмірністю  $M \times M$ , по головній діагоналі якої розташовані автокореляційні функції ( $M$  – число сигналів у наборі).

Часова періодична взаємокореляційна функція періодичних сигналів  $S_j(t)$  та  $S_k(t)$  має вигляд :

$$\rho_{jk}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T S_j(t)S_k(t+\tau)dt \quad (11)$$

Для ергодичних процесів:

$$\rho'_{jk}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \rho_{jk}(\tau);$$

$$S_j(t)S_k(t+\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S_j(t)S_k(t+\tau)dt \quad (12)$$

Два сигнали  $S_j(t)$  та  $S_k(t)$  називаються ортогональними, якщо виконується співвідношення:

$$\rho_{jk}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T S_j(t)S_k(t)dt = 0 \quad (13)$$

Широко застосовується поняття коефіцієнта автокореляції, обумовленого рівнянням:

$$R_{jj}(\tau) = \frac{\rho'_{jj}(\tau)}{\sigma_{sj}^2} \quad (14)$$

де  $\sigma_{sj}^2$  - дисперсія сигналу  $S_j$ .

Коефіцієнт взаємної кореляції:

$$R_{jk}(\tau) = \frac{\rho'_{jk}(\tau)}{\sigma_{sk}\sigma_{sj}} \quad (15)$$

де  $\sigma_{sk}; \sigma_{sj}$  - діючі значення сигналів  $S_k$  та  $S_j$ .

Максимальне значення коефіцієнта кореляції  $\pm 1$ .

Якщо коефіцієнт взаємної кореляції дорівнює нулю при всіх  $\tau$ , то функції  $S_j(t)$  та  $S_k(t)$  називаються некорельованими. Поряд зі звичайними кореляційними функціями широко використовують знакові кореляційні функції. Їх розрахунок потребує менших затрат. Технічні спрощення при автоматичному розрахунку знакових кореляційних функцій досягаються завдяки тому, що процеси які досліджуються (один або обидва з кожної порівнюваної пари процесів) замінюють їх знаками /полярностями/. З цією метою використовується функція  $\text{Sgn } x$  – сігнум (знак)  $x$ , яка обумовлена рівнянням:

$$\text{Sgn } x = \begin{cases} -1 & \text{якщо } x < 0 \\ 0 & \text{якщо } x = 0 \\ 1 & \text{якщо } x > 0 \end{cases} \quad (16)$$

Знакова взаємна кореляційна функція  $\iota_{XY}(\tau)$  стаціонарно пов'язаних випадкових процесів  $X(t)$  та  $Y(t)$  обумовлена рівнянням:

$$\iota_{XY}(\tau) = M[\text{Sgn } \overset{0}{X}(t)\text{Sgn } \overset{0}{Y}(t-\tau)] \quad (17)$$

Припустив, що  $X=Y$  будемо мати вираз, для знакової автокореляційної функції  $\iota_X(\tau)$  стаціонарного випадкового процесу:

$$\iota_X(\tau) = M[\text{Sgn } \overset{0}{X}(t)\text{Sgn } \overset{0}{X}(t-\tau)] \quad (18)$$

Знакові кореляційні функції лінійно пов'язані з імовірностями збігу знаків /полярностей/

$$\iota_{XY}(\tau) = 2P_{XY}(\tau) - 1 \quad (19)$$

де  $P_{XY}(\tau) = P[\text{Sgn } \overset{0}{X}(t)\text{Sgn } \overset{0}{Y}(t-\tau)]$ ;  $P$  - символ імовірності.

Виходить, що в деяких випадках апаратурне визначення знакових кореляційних функцій зводиться до визначення імовірностей збігу знаків.

Для квазіоптимального прийому в приймачі доцільно використовувати знаковий цифровий корелятор[5], структура якого зображена на малюнку 6.

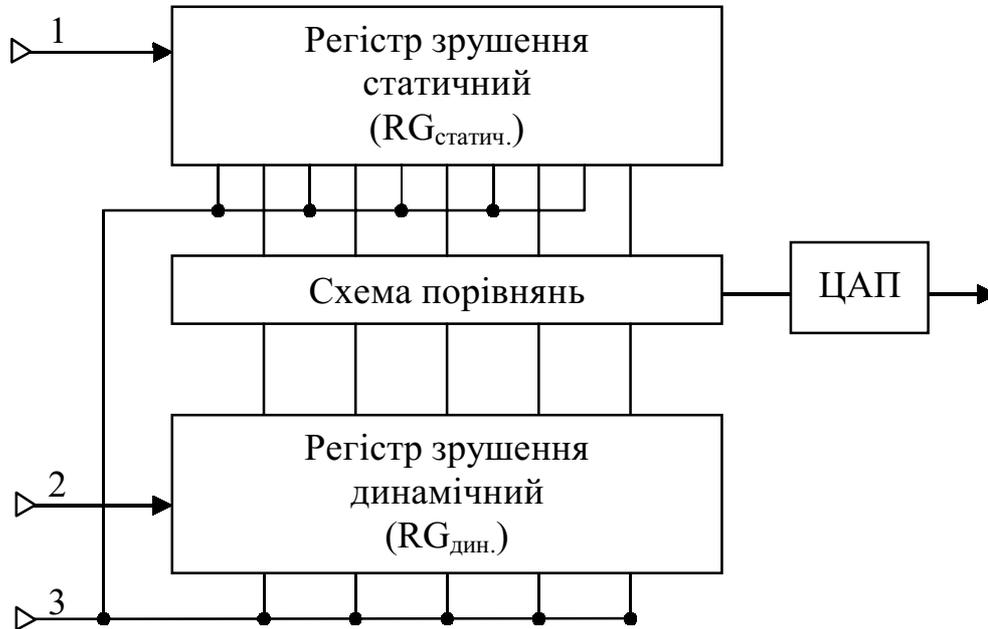


Рис.6 Структурна схема знакового цифрового корелятора

Принцип роботи цифрового корелятора полягає в тому, що на вхід статичного регістру зрушення для запису в пам'ять та в лінію зв'язку подається кодове слово. На вхід динамічного регістру зрушення подається кодове слово, яке вже пройшло лінію зв'язку та пристрій відновлення його структури. Схема порівнянь визначає кількість порозрядних збігів кодових слів з статичного і динамічного регістрів. Таким чином цифровий корелятор визначатиме ступінь відповідності між прийнятим кодовим словом і тим, що знаходиться у пам'яті корелятора. При моделюванні цифрового корелятора за допомогою прикладної програми Electronics Workbench була отримана автокореляційна функція ШКС, та можливо наочно побачити зберігання КСП в статичному регістрі зсуву (малюнки 7 та 8 відповідно).

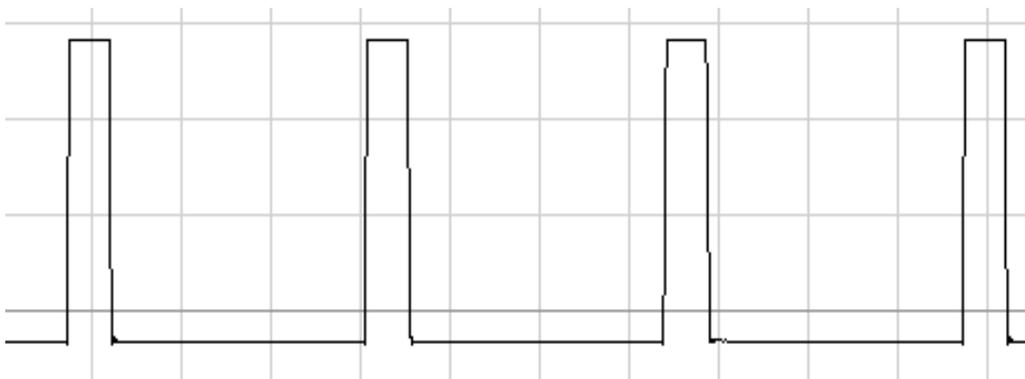


Рис.7 Автокореляційна функція ШКС

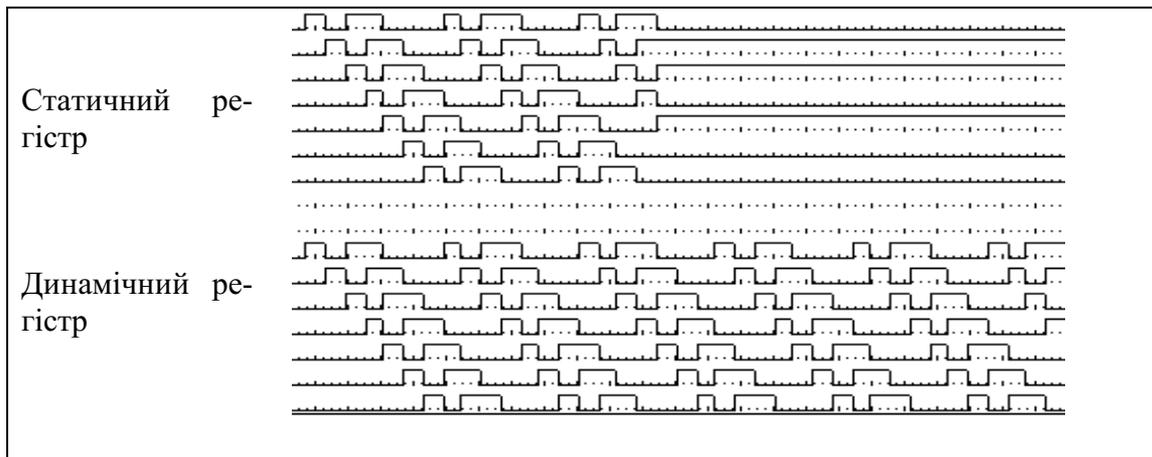


Рис.8 Зберігання КСП в статичному реєстрі зсуву

Таким чином, з огляду математичних характеристик шумоподібно кодованих сигналів, необхідно відмітити переваги використання цих сигналів в інформаційних системах:

- можливість прийому та обробки сигналів при відношенні сигнал/перешода багато менших одиниці;
- висока завадостійкість як по відношенню до широкосмугових, так і до вузькосмугових перешкод;
- існує перспективність шумоподібно кодованих сигналів для створення багатоканальних систем приймання-передачі;
- висока вірогідність інформації, яку приймаємо.

The article applies to the sphere of informative control system. The article deals with the questions of transmission of information in control systems and manufacturing management. Much attention is given to mathematical characteristics of complex signals. Structure models of generation of sound signals and sign digital correlator are proposed. Autocorrelative ability and functions of sound signals are described here. Values and defects of application of sound signals in information systems are considered in this article.

1. Баева Н.Н. Многоканальная электросвязь и РРЛ: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1988. – 312с.: ил.
2. Корниловская Н.В. Применение шумоподобных кодированных сигналов в системах промышленной автоматики. – ААЭКС №1 Херсон – 2001. – С.29-37.
3. Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з дисципліни “Цифрова електроніка та ЕОМ в системах управління” для магістрів спеціальності 8.091.401 “Системи управління і автоматики”. /Корніловський В.П., Корніловська Н.В., Головащенко Н.В.-Херсон, ХДТУ, 2003, - 19 с.,Укр.мовою.
4. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи: Учебник для вузов/ В.И. Нефедов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 510 с.: ил.
5. Головащенко Н.В., Боярчук В.П. Аппаратурный состав для улучшения свойств трактов приёма-передачи информации в системах промышленной автоматики. – ААЭКС № 1 (11) Херсон – 2003. – С.58-61

# ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ

УДК 681.3

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Маломуж Т.В.

Постановка задачи оптимального управления включает в себя ряд факторов: математическую модель управляемого процесса, цель управления (именуемую иногда критерием качества), различного рода ограничения на траекторию системы, управляющее воздействие, длительность процесса управления, класс допустимых управлений и т.д.

Адаптивная система управления строится для объектов, информация о которых или о воздействиях на которые недоступна в начале функционирования системы. Чаще всего, свойство адаптации достигается посредством формирования в явном или неявном виде математической модели объекта или входного воздействия. Этим отличается как поисковое адаптивное управление, в основе которого поиск и удержание экстремума показателя качества управления, так и беспойсковое, в основе которого компенсация отклонения фактических изменений управляемых координат от желаемых изменений, соответствующих требуемому уровню показателя качества. Далее по уточненной модели происходит подстройка адаптивного регулятора.

Таким образом, основная особенность адаптивных систем управления - возможность получения информации в процессе функционирования и использования этой информации для управления. Более того, в адаптивных системах всегда используется априорная информация о неопределенности в системе.

Общий вид адаптивной системы управления представлен на рис. 1. Здесь :  $A$  - блок адаптации,  $P_a$  - адаптивный регулятор,  $O$  - объект управления,  $r$  - входной сигнал,  $u$  - входной сигнал объекта управления,  $d$  - внешнее возмущение,  $y$  - регистрируемый выходной сигнал объекта управления.

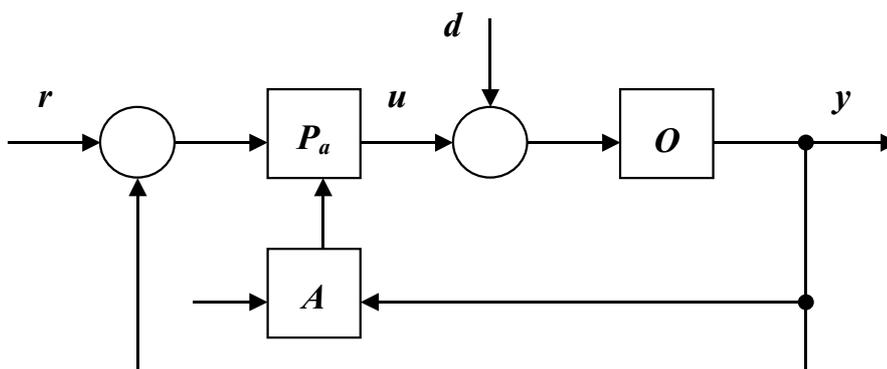


Рис. 1 Структурная схема адаптивной системы управления

Для управления бюджетными процессами в регионе, и особенно при постановке задачи оптимального управления, вследствие ряда особенностей не представляется возможным напрямую использовать существующие наработки в области адаптивного управления техническими системами, однако общие теоретические положения их проектирования и создания вполне могут быть применены, при условии реализации интеллектуальной системы.

С этой точки зрения бюджет может быть рассмотрен как некоторый “черный ящик” (рис. 2), на вход которого поступает вектор параметров “управляющих воздействий”  $\bar{C}$ . Лицо, принимающее решение ожидает получить в результате рационального распределения расходов по бюджетным статьям некоторый результат – вектор состояний  $\bar{Y}$ . Задача оптимального управления сводится к определению с помощью разработанной математической модели бюджета и интеллектуальной системы такого регулирующего воздействия  $\bar{D}$ , характеризующего его расходную часть, чтобы максимально приблизиться к желаемому результату (вектор  $\bar{Y}$ ).

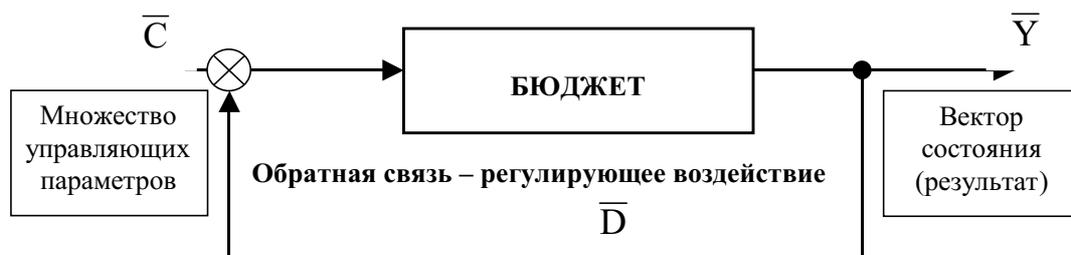


Рисунок 2. Представление регионального бюджета в виде “черного ящика”

Оценка возможных состояний и выбор наиболее рационального регулирующего воздействия осуществляется с помощью интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР), использующей принципы программно-целевого управления (ПЦУ). Однако, в настоящее время отсутствуют работы, представляющие реализацию программно-целевого управления с использованием технологий и методов искусственного интеллекта.

Таким образом, актуальным является вопрос создания теоретических основ для комбинирования интеллектуальных систем управления с существующими разработками в области оптимального управления системами.

Настоящая статья имеет целью создание теоретического базиса построения интеллектуальной системы оптимального управления для управления бюджетом региона.

В соответствии с [1] интеллектуальные системы (ИС) определены как объединённые единым информационным процессом системы, вырабатывающие на основе сведений и знаний при наличии мотивации (цели) решение о действии и реализующие его рациональным способом.

Формально всякая ИС описывается следующей шестеркой:

$$T \times X \times S \xrightarrow{\alpha_1} M \times T \quad (1)$$

$$T \times M \times S \xrightarrow{\alpha_2} C \times T \quad (2)$$

$$C \times T \times X \times S \xrightarrow{\alpha_3} R \times T \quad (3)$$

$$T \times \dot{X} = \{\bar{A} \times T\} X \times T + \{\bar{B} \times T\} U \times T \quad (4)$$

$$T \times Y = \{\bar{D} \times T\} X \times T \quad (5)$$

$$T \times R \times Y \xrightarrow{\alpha_4} C \times T \quad (6)$$

где:  $T$  - множество моментов времени;

$X, S, M, C, R$  и  $Y$  - множества состояний системы, окружающей среды, мотивации, цели, прогнозируемого и реального результата, соответственно;

$\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  и  $\bar{D}$  матрицы параметров;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  - интеллектуальные операторы преобразования, использующие знания.

В этом описании могут сочетаться представления объектов системы в виде множества значений, либо множества высказываний, либо каких-то других форм. Динамические свойства ИС описываются в пространстве состояний с помощью матриц параметров. Интеллектуальные операторы, реализующие восприятие, представление, формирование понятия, суждения и умозаключения в процессе познания, являются формальным средством обработки сведений и знаний, а также процесса принятия решения.

Согласно [2, 3] структура ИС должна содержать следующие модули (рис. 3):

- динамическая экспертная система (ДЭС), включающая базу знаний (БЗ), модуль экспертной оценки (МЭО) и модуль оценки состояния (МОС);
- модуль принятия решения (МПР);
- модуль выработки управляющих воздействий (МВУВ);
- модуль формирования цели;
- модуль, характеризующий воздействие окружающей среды на ИС.

Процесс взаимодействия ИС с окружающей средой можно представить так, как это показано на рис. 3, этот процесс включает следующие входные и выходные параметры:

$\bar{\omega}$  -  $r \times 1$  вектор возмущения;

$\bar{z}$  - сигнал модели объекта;

$\bar{\varphi}$  - сигнал цели;

$\bar{u}$  - сигнал управления;

$\bar{Y}$  - вектор выходных воздействий на объект.

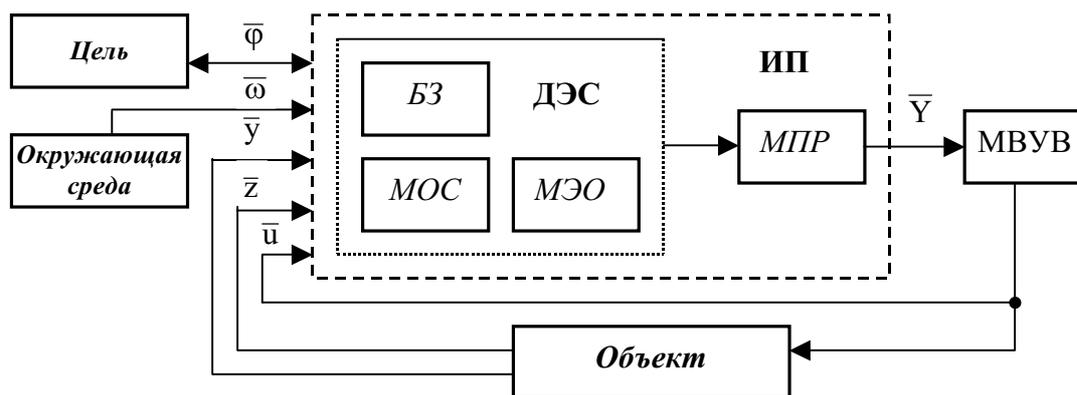


Рис. 3 Структура ИС

ДЭС есть некоторое комплексное образование, способное оценивать состояние системы и среды, сопоставлять параметры желаемого и реального результатов действия, принимать решение и выработать управление, способствующее достижению цели. Для этого ДЭС должна обладать запасом знаний и располагать методами решения задач. ДЭС в совокупности с МПР образуют интеллектуальный преобразователь (ИП). В общем случае под ИП понимается некоторый программный модуль, который на основе информации о входных сигналах  $\bar{\varphi}, \bar{\omega}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{u}$ , формирует сигнал  $\bar{Y}$ , определяющий вид синтезируемого МВУВ закона управления объектом и при этом несущий информацию, позволяющую формировать законы управления. Сигнал модели объекта  $\bar{z}$  содержит информацию о текущем изменении структуры и параметров объекта. Сигнал цели  $\bar{\varphi}$  содержит информацию о текущем состоянии достижения цели (целевой траектории).

В достаточно общем случае можно считать, что объект описывается уравнениями вида:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{\omega}, \bar{z}, t), \\ \bar{y} &= \bar{C}(\bar{x}), \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0, t \geq t_0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где:

$\bar{x}$  -  $n \times 1$  вектор состояния;

$\bar{u}$  -  $m \times 1$  вектор управления;

$\bar{y}$  -  $1 \times 1$  вектор выхода (измерения);

$\bar{C}(\cdot)$  -  $1 \times 1$  заданная вектор-функция;

$\bar{f}(\cdot)$  -  $n \times 1$  вектор-функция, обеспечивающая существование и единственность решения задачи Коши;

$\bar{z}$  - вектор параметров объекта.

Причем  $\bar{z} = \bar{z}^0 + \bar{z}$ , где  $\bar{z}^0$  контролируемая (заданная) составляющая вектора параметров объекта. В общем случае  $\bar{z}^0 = \bar{z}^0(t)$ , а  $\bar{z}$  - соответственно неконтролируемая (неизвестная) составляющая, информация о которой определяется на основе тех или иных методов идентификации и позволяет формировать сигнал модели  $\bar{z}$ . Если неопределённость модели объекта может быть сведена к параметрической неопределённости, то в модели объекта используется вектор  $\bar{z} = \bar{z}^0 + \bar{z}$ , где вектор  $\bar{z}$  характеризует неопределённость по параметрам и структуре.

В общем случае ИП представляет собой некоторое логико-динамическое устройство, обрабатывающее поступающую на него текущую информацию и формирующую сигнал  $\bar{Y}$  в соответствии с протекающими процессами. В ИП реализуется соотношение:

$$\bar{Y} = F(\bar{x}, \bar{u}, \bar{\omega}, \bar{\varphi}, \bar{z}) \quad (8)$$

где  $F(\cdot)$  - некоторый оператор интеллектуального преобразования, действующий из пространства  $R$  в некоторое  $p$  - мерное пространство ( $Y \in R^p$ ), характеризующее структуру и алгоритм работы ИП, и в соответствии с которым формируется  $p \times 1$  вектор  $\bar{Y}$ , определяющий, в зависимости от заданной цели, окружающей среды, состояния системы, действия над объектом управления, направленные на достижение данной цели. ИП в каждый момент времени формирует текущую цель управления перед объектом, в соответствии с которой ставится конкретная текущая задача по управлению последним, а МВУВ формирует требуемый алгоритм управления, обеспечивающий достижение текущей цели и являющийся решением рассматриваемой текущей задачи. Таким образом, в каждый момент времени  $t \geq t_0$  вектор состояния преобразователя  $\bar{Y}$  содержит информацию, позволяющую поставить и решить задачу по текущему управлению объектом.

О возмущении  $\bar{\omega}$  известно, что оно является элементом некоторого заданного в  $R^r$  множества  $W(t)$ , т.е.:

$$w \in W(t), \quad t \geq t_0 \quad (9)$$

Неконтролируемые составляющие  $\bar{z}$ , управление  $\bar{u}$  также удовлетворяют аналогичному соотношению, т.е.:

$$\bar{z} \in L(t), \quad t \geq t_0, \quad \bar{u} \in U(t), \quad t \geq t_0 \quad (10)$$

где  $L(t)$ ,  $U(t)$  некоторые заданные множества соответственно в  $R^n$ ,  $R^m$ .

Цель управления объектом в общем случае может быть формализована и представлена в виде следующих ограничений на вектор состояния  $\bar{x}$ :

$$\bar{\Psi}(\bar{x}, t) \in Q_\varepsilon(t), \quad t \geq t_0 \quad (11)$$

где:  $\bar{\Psi}(\cdot)$  -  $n_1 \times 1$  заданная вектор-функция, непрерывно дифференцируемая по всем переменным (возможен и общий случай, когда  $\bar{\Psi}(\cdot)$  - оператор, действующий из  $R^n$  в  $R_1$ ), т.е.  $\bar{\Psi} : R^n \rightarrow R_1$ ,  $R_1$  - некоторое линейное нормированное пространство;  $Q_\varepsilon(t)$  -  $\varepsilon$  окрестность некоторого множества  $Q = Q(t)$ , заданного в пространстве  $R^{n_1}$  (соответственно в  $R_1$ ).

$\varepsilon$  - окрестностью множества  $Q$  в пространстве  $R^{n_1}$  назовем такое множество  $Q_\varepsilon$  - элементов  $\bar{\beta} \in R^n$ , что каждый элемент  $R^p$  удален от множества  $Q$  не более, чем на величину  $\varepsilon$  в смысле некоторой меры близости  $\rho(\cdot)$ , определенной в  $R^{n_1}$ .

Мерой близости  $\rho(\cdot)$  произвольных элементов  $\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2 \in R^{n_1}$  будем считать некоторый положительно определенный в  $R^{n_1}$  и не ограниченный сверху функционал (скалярная функция). В частном случае:

$$\rho(\bar{\beta}^1, \bar{\beta}^2) = \|\bar{\beta}^1 - \bar{\beta}^2\| \quad (12)$$

где  $\|\cdot\|$  - норма в пространстве  $R^{n_1}$ , или:

$$\rho(\bar{\beta}^1, \bar{\beta}^2) = \Theta \|\bar{\beta}^1 - \bar{\beta}^2\| \quad (13)$$

где:  $\Theta(\cdot)$  - скалярная функция, положительная при положительных значениях аргумента.

С учетом введенных обозначений определим величину удаления произвольного элемента  $\beta \in R^{n_1}$  от множества в соответствии с мерой близости  $\rho(\cdot)$ .

Под величиной удаления  $\rho(\bar{\beta}, Q)$  элемента  $\beta \in R^{n_1}$  от множества  $Q$  в смысле меры близости  $\rho(\cdot)$  понимается величина, вычисляемая согласно выражению:

$$\rho(\bar{\beta}, Q) = \min_{\bar{\beta} \in Q} \rho(\bar{\beta}, \bar{\beta}) \quad (14)$$

С учетом введенных определений соотношение для цели управления может быть представлено следующим образом:

$$\tilde{\rho}(\bar{\Psi}(\bar{x}, t), Q) \leq \varepsilon, \quad t \geq t_0 \quad (15)$$

Тогда цель управления в общем случае можно сформулировать следующим образом: для объекта управления, начальное состояние которого  $\bar{x}_0 = \bar{x}(t_0)$  может быть произвольным элементом из множества  $Q$ , т.е.  $\bar{x}_0 \in Q$ , требуется обеспечить выполнение соотношения (15) для каждого  $t > t_0$  при наличии ограничений (9)-(10).

МВУВ с учетом поставленной перед ним задачи реализует соотношение:

$$\bar{u} = \bar{K}(\bar{Y}) \quad (16)$$

где  $\bar{K}$  - некоторый оператор выработки управления с областью определения в пространстве  $R^p$  и областью значений в  $R^m$ . При этом информация, содержащаяся в векторе  $\bar{Y}$ , должна быть достаточной для синтеза в БВУ требуемого управления в соответствии с текущей целью, формируемой ИП.

Модель ИС можно считать построенной в том случае, если определены классы операторов, на которых следует выбирать оператор  $F$  интеллектуального преобразователя и оператор  $\bar{K}$  выработки управления.

Тогда, с учетом используемого структурного представления ИС на рис. 3, задачу построения модели ИС можно сформулировать следующим образом: требуется для ИС, сформированной для объекта, для обеспечения цели при наличии ограничений, определить возможный вид операторов  $F$  ИП, формирующего текущую (локальную) цель перед объектом, и  $\bar{K}$  - МВУВ, синтезирующего (вырабатывающего) требуемый закон управления [4].

Возможный вид оператора  $F$  определяется в соответствии с возможностью достижения цели управления, поставленной перед объектом, исходя из условия, что текущая цель формируется для достижения глобальной цели. Поэтому аналогично (11) текущая цель будет соответствовать условию:

$$\bar{\Psi}(\bar{x}, t) \in Q_{\varepsilon^t}^t(t), \quad t \geq t_0 \quad (17)$$

где:  $n_1 \times 1$  вектор-функция  $\bar{\Psi}^t(\bar{x}, t)$  и множество  $Q_{\varepsilon^t}^t(t)$  определяется также, как функция  $\bar{\Psi}^t(\bar{x}, t)$  и множество  $Q_{\varepsilon}(t)$ . Выражение (11) может быть преобразовано к виду:

$$\tilde{p}(\bar{\Psi}^t(\bar{x}, t), Q^t) \leq \varepsilon^t, \quad t \geq t_0 \quad (18)$$

Здесь вектор-функция  $\bar{\Psi}^t(\bar{x}, t)$ , множество  $Q^t$  и скалярная неотрицательная величина  $\varepsilon^t$  выбираются такими, чтобы из выполнения неравенства (18) следовало выполнение неравенства (15). Поскольку вектор  $\bar{Y}$  определяет информацию о соотношениях (17) и (18), то можно считать, что часть его компонент несёт информацию непосредственно о текущем состоянии объекта  $x$ , а другие компоненты характеризуют вид соотношений (17) и (18) и формируются в результате собственных (внутренних) динамических процессов, протекающих в ИП как в некоторой динамической системе. Исходя из этого, представим  $\bar{Y}$  в виде:

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} \bar{Y}^1 \\ \bar{Y}^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Здесь  $\bar{Y}^1, \bar{Y}^2$  -  $n \times 1$ ,  $(p - n) \times 1$  векторы, характеризующие вектор  $\bar{x}$  и вид соотношений (17), (18). При этом:

$$\bar{Y}^1 = \bar{F}_1(\bar{x}) \quad (20)$$

где  $\bar{F}_1(\cdot)$  - некоторая  $n \times 1$  вектор-функция, взаимно однозначная в  $R^n$ .

Относительно вектора  $\bar{Y}^2$  можно ограничиться предположением, что характер его формирования определяется обыкновенным дифференциальным уравнением, приводимым к виду [5]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{Y}}^2 &= \bar{F}_2(\bar{Y}^2, \bar{x}, \bar{y}, \bar{u}, \bar{\omega}, \bar{\varphi}, \bar{z}, t) \\ \bar{Y}^2(t_0) &= \bar{Y}_0^2, \quad t \geq t_0 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где  $\bar{F}_2(\cdot)$  - некоторая  $(p-n) \times 1$  вектор-функция, выражение которой заранее не определено и может находиться в результате синтеза алгоритма управления объектом.

Возможный вид оператора выработки управления  $\bar{K}$  определяется следующим образом. Пусть  $C^t$  - обозначает текущую цель перед объектом вида (17) или (18). Тогда, поскольку вид  $C^t$  определяется текущими значениями вектора  $\bar{Y}^2$ , можно записать:

$$C^t = C^t(\bar{Y}^2) \quad (22)$$

Здесь  $C^t(\cdot)$  определяет зависимость функциональных выражений (17) или (18) от текущего значения  $\bar{Y}^2$ .

Поскольку МВУВ должен формировать управление с учетом текущей цели и информации о текущем состоянии объекта, характеризуемой вектором  $\bar{Y}^1$ , то можно считать, что требуемый закон управления имеет вид:

$$\bar{u} = \tilde{K}(C^t, \bar{Y}^1) = \tilde{K}(C^t(\bar{Y}^2), \bar{F}_1(\bar{x})) = K(\bar{Y}^2, \bar{x}) \quad (23)$$

где  $\tilde{K}(\cdot)$  - оператор, определяющий выбор требуемого  $\bar{u}$  по заданным  $C^t$  и  $\bar{x}$  на вид которого в общем случае никаких ограничений не накладывается. Операторы  $\bar{K}$  и  $K$  связаны зависимостью:

$$\bar{K}(\bar{Y}) = \bar{K}(\bar{Y}^1, \bar{Y}^2) = \bar{K}(\bar{F}_1(\bar{x}), \bar{Y}^2) = K(\bar{Y}^2, \bar{x}) \quad (24)$$

Таким образом, закон управления объектом будет определяться соотношением (23) и может иметь достаточно произвольный вид [6]. Выбор конкретного значения оператора  $K$  производится непосредственно в результате процедуры синтеза управления на основе концепции функционально-множественной принадлежности, применяемой ко всей ИС в целом.

**Выводы.** Разработанные теоретические основы создания интеллектуальных систем оптимального управления могут быть использованы для решения ряда практических задач, в частности для управления бюджетными процессами в регионе. Таким образом, комбинирование интеллектуальных систем управления с существующими наработками в области оптимального и программно-целевого управления системами позволяет строить эффективные интеллектуальные системы.

Formalization and a method of the decision of intelligent support problem for optimum control are submitted in this article. Pressing question of creation of theoretical bases for a com-

bination интеллектуальных control systems with existing operating time is considered in the field of optimum control. Article has for an object creation of theoretical basis of construction of intelligent system of optimum control by the budget of region.

1. Пупков К.А. Интеллектуальные системы: проблемы теории и практики // Известия вузов. – Приборостроение. – 1994. – №9-10. – с. 5-7.
2. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит. – 2000. – 352 с.
3. Пупков К.А. Динамические экспертные системы в управлении // Известия вузов. – Приборостроение. – 1996. – №8-9. – с. 36-42.
4. Фрадков А.В. Адаптивное управление сложными системами. – М.: Наука. – 1990.
5. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука. – 1968.
6. Воронов Е.М., Армоник О.Н., Сергеев В.В., Леманович А.Г. Стабильно-эффективные целевые компромиссы при взаимодействии интеллектуальной системы с окружающей средой // Труды Второго международного симпозиума по интеллектуальным системам. – М.: Изд-во ПАИМС. – 1996. – с. 227-234.

## РОЗРОБКА БАГАТОВИМІРНИХ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ОДНОГО КЛАСУ

Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Лобок О.П.

В технологічних комплексах неперервного типу функціонують складні технологічні об'єкти, які характеризуються багатьма зв'язаними між собою регульованими координатами. Часто кілька регульованих координат, кількість яких  $n \geq 4$  мають одну фізичну природу, а контури регулювання будуються за однією структурою. Це відноситься, наприклад, до багатокорпусних випарних установок, в яких регулюється рівень в кожному з корпусів ( $n = 4, 5$ ) та збірниках перед і після випарної установки, а також до дифузійних установок нахилоного типу, в яких регулюються  $n \geq 4$  температур в різних зонах. Таким чином, можна виділити один клас об'єктів з кількома взаємозв'язаними координатами однієї фізичної природи.

В традиційних системах автоматизації для регулювання кожної з координат використовується окремий автоматичний регулятор, що приводить до небажаних впливів одного контуру на інші і, як наслідок, погіршення якості перехідних процесів та збільшення енерговитрат.

Розглядається можливість створення одного багатовимірного регулятора для технологічних об'єктів виділеного класу, в якому виконуються умови оптимальності щодо якості перехідних процесів та зменшення витрат енергоносіїв, а також автономності окремих контурів.

Одним з підходів до поставленої задачі є використання алгоритмів багатовимірних оптимальних регуляторів, а саме аналітичне конструювання оптимальних регуляторів [1, 2].

Як відомо, постановка задачі аналітичного конструювання оптимальних регуляторів полягає в наступному: розглядається об'єкт, що описується наступними лінійними стохастичними рівняннями

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Fw, \\ y = Cx + Du + Hw + v; \quad 0 \leq t \leq \infty, \\ x(0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $x$  – вектор стану,  $u$  – вектор управління,  $w, v$  – вектори збурень по каналам управління та вимірювання,  $A, B, F, C, D, H$  – матриці математичної моделі об'єкта.

Шукається оптимальне управління в класі лінійних регуляторів, що мінімізує інтегрально-квадратичний критерій виду

$$I = E\left(\int_0^{\infty} (y^T Q_1 y + u^T R_1 u) dt\right), \quad (2)$$

де  $Q_1 = Q_1^T \geq 0$ ,  $R_1 = R_1^T > 0$  – вагові матриці відповідних розмірностей.

Згідно з алгоритмом [3] лінійний квадратичний гаусівський регулятор (LQG) має вигляд

$$\begin{aligned} u(t) &= -K\hat{x}(t), \\ \dot{\hat{x}}(t) &= (A - BK - LC)\hat{x}(t) + Ly(t), \\ K &= R_1 B^T P_1, \\ L &= P_2 C^T R_2^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$



$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3155.69 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7351.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5858.90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3948.25 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 0.3717 & -0.2334 & 0.1299 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1198 & 0.0342 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0339 & 0.0254 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0754 & -0.7293 & 0.2766 & 0.1760 & 0.7712 & 0.7712 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$x = [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_{п1}, \Delta\theta_{п2}, \Delta\theta_{п3}, \Delta\theta_{п4}]^T$  - вектор параметрів стану,

$u = [\Delta G_{п1}, \Delta G_{п2}, \Delta G_{п3}, \Delta G_{п4}]^T$  - вектор управління,

$w = [\Delta\theta_c, \Delta G_c, \Delta G_{дc}, \Delta\theta_5, \Delta\theta_ж, \Delta G_5, \Delta G_ж]^T$  - вектор збурень,

$y = [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4]^T$  - вектор спостережень,

$w, v$  – шуми по каналах управління та вимірювання відповідно, передбачаються як білі гаусівські незалежні процеси з нульовими середніми значеннями та відомими коваріаційними матрицями ( $E(w)=E(v)=0, E(ww^T)=Q_2, E(vv^T)=R_2, E(wv^T)=0$ , причому  $Q_2=Q_2^T \geq 0, R_2=R_2^T > 0$ ).

В середовищі Matlab проведена серія експериментів на даній системі з П, ПІ та оптимальним (LQG) регулятором при детермінованих ступінчатих та стохастичних збуреннях.

На рис.1 показані перехідні процеси при сумуючій дії всіх стохастичних збурень. Як видно з графіків, найкращі перехідні процеси забезпечує оптимальний LQG регулятор.

Розглядаючи детерміновані збурення прийшли до висновку, що основними збуреннями температури в першій  $\Delta\theta_1$  та другій зонах  $\Delta\theta_2$  є початкова температура стружки  $\Delta\theta_c$ , витрати стружки  $\Delta G_c$  та дифузійного соку  $\Delta G_{дc}$ . Графіки перехідних процесів при дії детермінованих ступінчатих збурень та різних регуляторів приведені на рис.2. Аналогічні графіки отримані для температур в інших зонах.

Як видно з рис.2, при дії детермінованих збурень не завжди перехідні процеси задовольняють бажаним. Також при використанні оптимального регулятора завжди існує статична похибка. Але для процесу функціонування технологічних об'єктів саме випадкові збурення є основними, тому LQG-регулятор забезпечить найкращу якість функціонування.

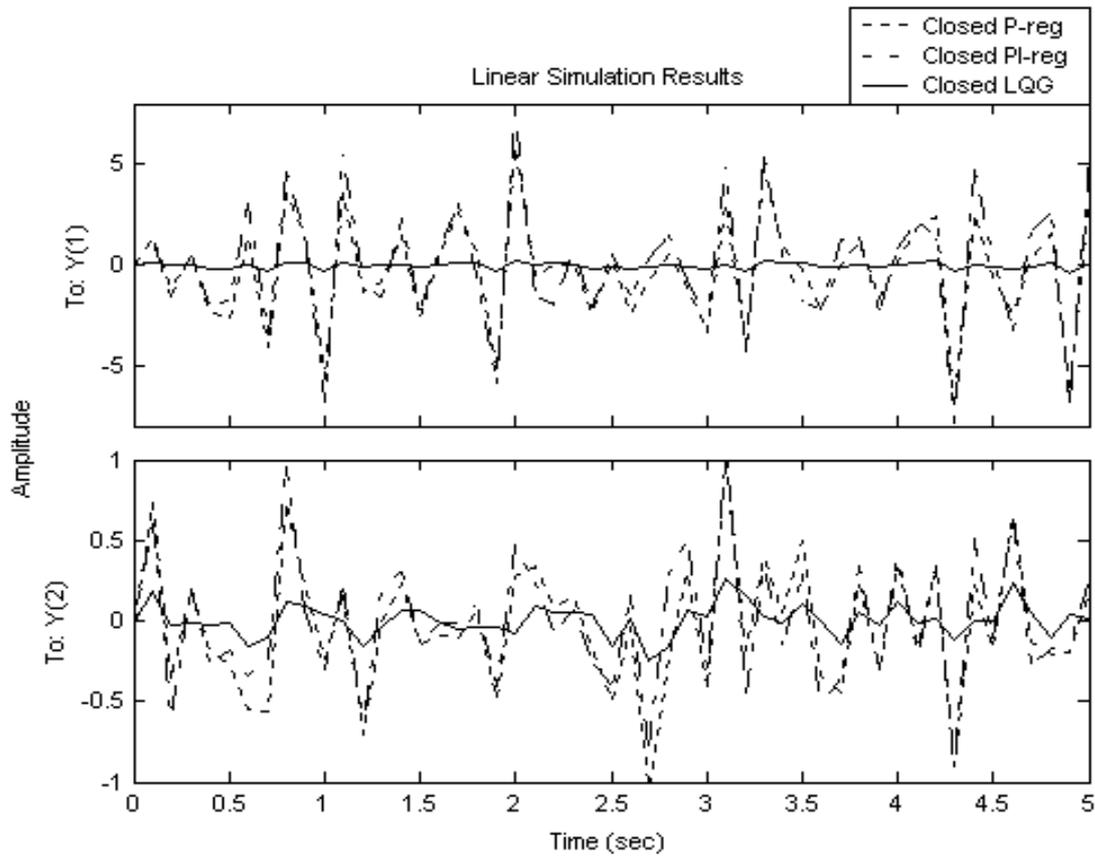


Рис.1 Перехідні процеси при дії сумарних стохастичних збурень.

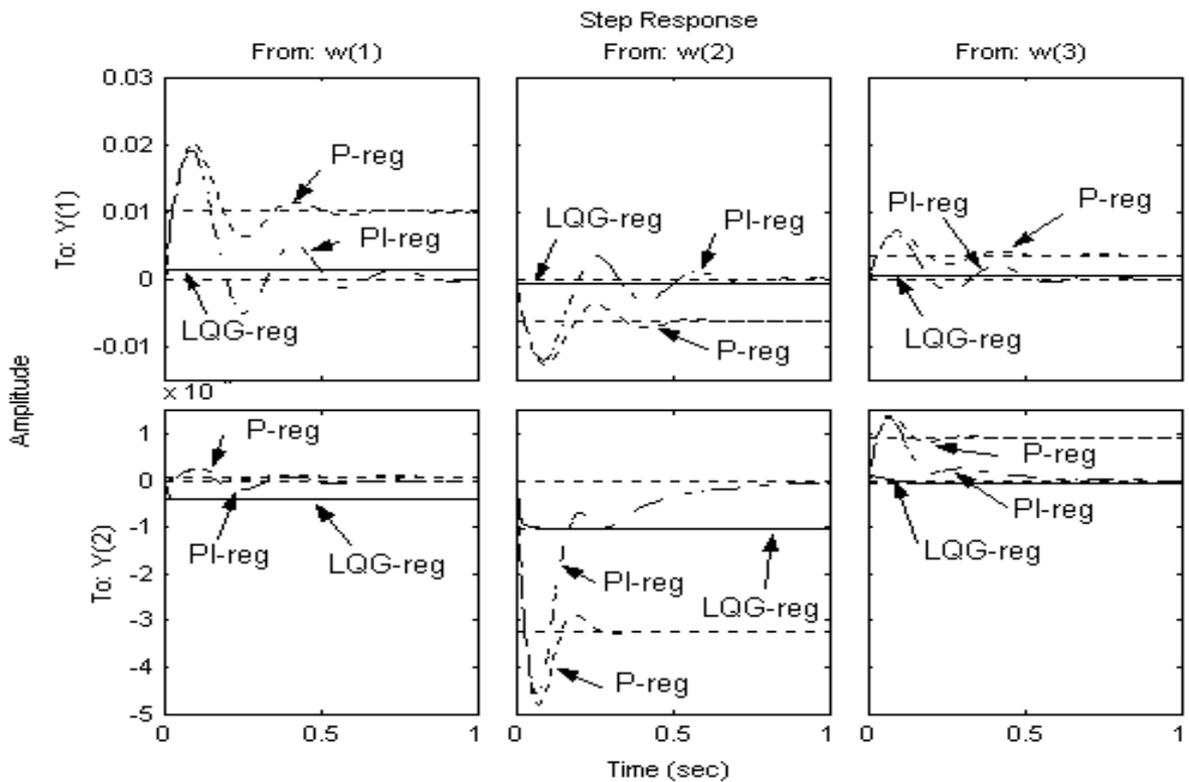


Рис.2 Перехідні процеси при дії ступінчатих збурень.

Для підвищення якості процесів регулювання необхідно також враховувати додаткові внутрішні зв'язки між регульованими координатами, що буде виконано в подальшому. Необхідно також виконати технічне забезпечення систем з оптимальним LQG-регулятором на базі мікропроцесорних засобів та персональних комп'ютерів.

The opportunity of creation of one multivariate regulator for technological objects of the allocated class in which a condition of an optimality concerning quality of transients and reduction of expenses of energy carriers are satisfied, and also autonomies of separate contours is considered.

1. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Автоматика и управление в техн. системах». М.: Высш. шк., 1989. – 263с.: ил.
2. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368с., ил.
3. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С., 111. Оптимальное управление системами: Пер. с англ./ Под. ред. Б.Р. Левина. – М.: Радио и связь, 1982. – 392с., ил. – (Второе изд.: США, 1977).

## МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.2

### СПОСОБ АДАПТИВНОЙ АЛГОРИТМИЗАЦИИ ЗАДАЧ РАСЧЕТА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ

Балтовский А.А.

#### **Введение**

Основой экономического расчета промышленных предприятий является планирование. К числу наиболее актуальных задач в области планирования относятся задачи расчета производственных программ, дающие оптимальные или близкие к оптимальным (по выбранным критериям) технико-экономические и оперативные планы, многие из которых являются целочисленными задачами с булевыми переменными.

Как правило, для решения задач такого типа применяются методы отыскания точного решения или приближенные методы целочисленного программирования, связанные с различными схемами упорядоченного перебора, которые оговариваются заранее т.е. составляются согласно некоторым жестким программам перебора.

Работа выполнялась нами согласно постановления Верховного Совета Украины от 16.10. 1992 г. «О приоритетных направлениях развития науки и техники».

#### **Анализ последних исследований**

Как следует из анализа литературных источников [1-3] для решения задач такого типа чаще всего применяется метод ветвей и границ. Однако эффективность работы алгоритма, основанного на данном методе, существенно зависит от того насколько выбор конкретного метода отражает специфику задачи.

Согласно [4,5] в настоящее время накоплен опыт применения вероятностных методов для решения задач планирования. Вероятностный подход к решению (нелокальных) задач позволяет многие алгоритмы интерпретировать в рамках обычной локальной схемы (типа градиентной), правда уже для некоторой приближенной (усредненной) задаче. Этот факт дает возможность указать некоторый вариационный подход для формирования вероятностных итерационных алгоритмов решения дискретных задач.

*Объектом исследования* является методология решения численных задач планирования с булевыми переменными.

*Предметом исследований* – модели, методы и алгоритмы решения задач планирования с булевыми переменными.

*Научная задача* состоит в разработке гибкой схемы перебора, позволяющей перестраивать её в процессе поиска решения на основе текущей информации.

*Цель исследования* – выявления условий искусственного привлечения случайности позволяющей формализовать желаемую схему перебора при котором происходит своего рода обучение перебора, приспособленного к специфике данной задачи.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- перехода к усредненной задаче оптимизации с булевыми переменными на основе рандомизации переменных;
- задание итеративного движения в множестве случайных векторов.

Исследования проводились с использованием методов статистики и математического моделирования, теории оптимального управления.

*Научная новизна* состоит в адаптивной алгоритмизации задач с булевыми переменными.

*Практическое значение* полученных результатов состоит в повышении эффективности процесса планирования.

Основная часть

Переход к осредненной задаче с булевыми переменными:

$$\psi(x) \rightarrow \max_x, x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), 0 \leq x_j \leq 1; x - \text{целое},$$

на основе рандомизации переменных позволяет получить некоторый аналог метода ветвей и границ.

Итак, рассмотрим задачу

$$M\psi(x) \rightarrow \max_x,$$

где  $x$  – случайный вектор с плотностью распределения  $P_x(t)$ , реализации которого удовлетворяют требованию

$$0 \leq x_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n.$$

Зададим итеративное движения во множестве случайных векторов в виде

$$x^N = x^{N-1} + \alpha^N \omega^N, \tag{1}$$

где  $\omega^N$  - случайный вектор, определяющий направление движения;

$\alpha^N$  - величина шага в направлении  $\omega^N$ .

Определяя далее направление движения с помощью правила локального улучшения

$$M_x^N \Phi(x, \lambda) - M_x^{N-1} \Phi(x, \lambda) > 0,$$

где  $\Phi(x, \lambda)$ - функция Лагранжа, получаем запись правила локального улучшения в виде, позволяющем иметь различные записи алгоритма (1) в соответствующих вероятностных характеристиках. Так получают алгоритмы, работающие только с реализациями случайных векторов, или алгоритмы, предусматривающие изменение параметров генераторов случайных векторов.

Применим описанную выше схему вероятностных алгоритмов к задаче линейного программирования с булевыми переменными

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_j} c_j^k x_{jk} \rightarrow \min_x,$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_j} a_{ij} x_{jk} \geq b_i, i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{k=1}^{r_j} x_{jk} = 1, j = 1, 2, \dots, n,$$

$$0 \leq x_{jk} \leq 1; x - \text{целое}, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, r_j.$$

Свяжем с данной задачей соответствующую функцию Лагранжа и перейдем к вероятностной постановке задачи:

$$\Phi(x, \lambda) = \sum_j \sum_k c_j^k x_{jk} + \sum_i \lambda_i \left( b_i - \sum_j \sum_k a_{ij}^k x_{jk} \right) \rightarrow \min,$$

где  $x = [x^1, x^2, \dots, x^n]$  - блочное представление вектора, причем

$$x^j = (x_{j1} x_{j2}, \dots, x_{jn, r_j}), \quad 0 \leq x_{jk} \leq 1; \quad x - \text{целое}, \quad k = 1, 2, \dots, r_j, \quad (2)$$

$$\sum_k x_{jk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

т.е. к задаче вида  $M_x \Phi(x, \lambda) \rightarrow \min$ , где  $x$  - случайный вектор, реализации которого удовлетворяют требованиям (2), (3), и который имеет некоторую плотность распределения  $P_x(\tau)$ .

Будем задавать движение в пространстве случайных векторов итеративной формулой

$$x^N = \bar{U}^N x^{N-1} + U^n y^N,$$

где  $y^N$  - случайный вектор, определяющий направление движения, такой что его реализации удовлетворяют требованиям (2), (3), т.е.

$$y = [y^1, y^2, \dots, y^n], \quad y^j = (y_{j1} y_{j2} y_{j3}, \dots, y_{jn, r_j}),$$

$$0 \leq y_{jk} \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, r_j, \quad \sum_k y_{jk} = 1,$$

с плотностью распределения  $P_y(S)$ .  $U$  - булева случайная величина, такая что  $P(U=1) = P_u$ ,  $P(U=0) = q_u$ .

Будем как и раньше, определять направление движения, выполняя правило локального улучшения в виде

$$M_x^N \Phi(x, \lambda) - M_x^{N-1} \Phi(x, \lambda) < 0.$$

Распишем подробнее  $M_x^N \Phi(x, \lambda)$ :

$$\begin{aligned} M_x^N \Phi(x, \lambda) &= \int \Phi(t, \lambda) \delta(t - \bar{\mu}\tau - \mu s) P_u^N(\mu) P_x^{N-1}(\tau) P_y^N(S) d\mu d\tau ds = \\ &= P_u^N \int \Phi(S, \lambda) P_y^N(S) dS + q_u^N \int \Phi(\tau, \lambda) P_x^{N-1}(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Тогда разность  $M^N \Phi - M^{N-1} \Phi$  запишется следующим образом:

$$M_x^N \Phi(x, \lambda) - M_x^{N-1} \Phi(x, \lambda) = P_u^N \int [\Phi(S, \lambda) - \Phi(\tau, \lambda)] P_y^N(S) P_x^{N-1}(\tau) d\tau ds.$$

$$P_U^N = M^N u, \quad \int \Phi(S, \lambda) P_y^N(S) dS = M_y^N \Phi(y, \lambda),$$

Заметим, что

$$\int \Phi(\tau, \lambda) P_x^{N-1}(\tau) d\tau = M^{N-1} \Phi(x, \lambda),$$

и, следовательно, в силу независимости случайных векторов  $y$  и  $x$

$$M_x^N \Phi - M_x^{N-1} \Phi = M_u^N M_y^N M_x^{N-1} \{u[\Phi(y, \lambda) - \Phi(x, \lambda)]\} < 0.$$

При этом

$$\Phi(y, \lambda) - \Phi(x, \lambda) = \sum_j \sum_k \left( c_j^k - \sum_i \lambda_i a_{ij}^k \right) (y_{jk} - x_{jk}).$$

Таким образом, задача состоит в определении случайного вектора  $y^N$ , такого, что

$$M_u^N M_y^N M_x^{N-1} \left\{ u \sum_j \sum_k \left( c_j^k - \sum_i \lambda_i a_{ij}^k \right) (y_{jk} - x_{jk}) \right\} < 0. \quad (5)$$

Булева случайная величина  $U$  на первом уровне работы алгоритма не меняется, т.е.  $P_u^N = P_u^{N-1}$ ,  $N = 1, 2, \dots$ .

В зависимости от выполнения операции осреднения по случайным переменным неравенства (5) здесь, как и прежде, можно получать разные типы алгоритмов, работающие как с реализациями случайных векторов, так и с их вероятностными характеристиками. Так, не проводя операции осреднения, получим алгоритм, работающий только с реализациями случайных векторов. При этом можно определить  $y^N$  так, чтобы максимально гарантировать выполнение неравенства (5). С этой целью предположим, что

$$y_{js}^N = 1, \text{ если } c_j^s - \sum_i \lambda_i a_{ij}^s = \min_k \left[ c_j^k - \sum_i \lambda_i a_{ij}^k \right],$$

$$y_{ji}^N = 0, \text{ для всех } i = 1, 2, \dots, r_j, i \neq s.$$

Движение (4) понимается в этом случае как действие над реализациями случайных векторов.

Выполняя операцию осреднения в неравенстве (5) по булевой случайной величине  $U$ , а также по случайному вектору  $y$ , получим запись условия локального улучшения в виде

$$M_x^{N-1} \left\{ P_U^N \sum_j \sum_k \left( c_j^k - \sum_i \lambda_i a_{ij}^k \right) (\Pi_{jk}^N - x_{jk}) \right\} < 0,$$

где  $\Pi_{jk} = P(y_{jk} = 1)$ .

Определим переменные  $P_u^N$  и  $\Pi_{jk}^N$  следующим образом:

$$P_u^N = P_u^{N-1}, N = 1, 2, \dots,$$

$$\Pi_{js}^N = 1, \text{ если } c_j^s - \sum_i \lambda_i a_{ij}^s = \min_k \left[ c_j^k - \sum_i \lambda_i a_{ij}^k \right],$$

$$\Pi_{ji}^N = 0, \text{ для всех } i \neq S.$$

Движение (4) будем осуществлять в этом случае в вероятностных характеристиках. Обозначим через  $P_{jk}$  вероятность того, что случайная величина  $x_{jk}$  принимает значение равное единице:  $P_{ik} = P(x_{jk} = 1)$ . Тогда запишем движение (4) запишем в виде

$$P_{ik}^N = q_u^N P_{ik}^{N-1} + P_u^N \Pi_{ik}^N, k = 1, 2, \dots, r_j. \quad (6)$$

В нашем случае

$$P_{iS}^N = q_u^N P_{iS}^{N-1} + P_u^N, P_{ji}^N = q_u^N P_{ik}^{N-1}, i \neq S.$$

После проведения осреднения по всем случайным переменным, присутствующим в неравенстве (5) имеем

$$P_u^N \sum_j \sum_k \left( c_j^k - \sum_i a_{ij}^k \lambda_i \right) (\Pi_{jk}^N - P_{ik}^{N-1}) < 0$$

Полагая  $P_u^N = P_u^{N-1}$ ,  $N=1, 2, \dots$  можно определить  $\Pi_{jk}^N$  из следующих условий:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{r_j} \Pi_{jk}^N &= 1, j = 1, 2, \dots, n \\ P_{jS}^{N-1} < \Pi_{iS}^N \quad \forall S : c_j^S - \sum_{i=1}^m a_{ij}^S \lambda_i &< 0, \\ P_{jS}^{N-1} > \Pi_{i\ell}^N \quad \forall \ell : c_j^\ell - \sum_{i=1}^m a_{ij}^\ell \lambda_i &> 0, \end{aligned}$$

При этом движение осуществляется по (6).

### Выводы

Искусственное привлечение случайности, позволяет формализовать желаемую схему перебора. При этом происходит своего рода обучение перебора, приспособленного к специфике данной задачи.

The method of forming of credible iteration algorithms of decision of task of calculation of the production program with boole variables is represented in the article.

1. Живоглядов В.П. Автоматизированный синтез алгоритмов активно-адаптивного управления // Изд. АН Кирг.ССР. Физ.-техн. и матем.науки.-1987.-№2.- С.33-40.

2. Сельвестров А.Н., Папченко О.М. Многократно адаптивные системы идентификации. – К.: Техника,1983.-111 с.

3. Математическое моделирование и методы оптимизации: Межвуз.сб.научн.ст. /Горьков. государств. ун-т им Н.И.Лобачевского; под ред. А.В.Сергиевского. - Горький: Б.ч., 1989. – 160 с.

4. Батурин А.Н., Тихомиров А.А. Моделирование экономических систем (целевой подход). – М.: Изд-во Московского ун-та, 1987.— 86с.

5. Оптимизация: модели, методы, решения. Сб.научн.тр. /Рос.АН СО. Сибир. энерг. ин-т. Отв.ред.В.П.Булатов. – Новосибирск: наука, 1992.- 357 с.

**ЦИФРОВЫЕ И ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

УДК 621.372.54.001.5

**АНАЛИЗ ПУТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ С ФИКСИРОВАННОЙ ТОЧКОЙ**

Ситников В.С.

Системы управления реального времени требуют использования микропроцессорной техники высокого быстродействия. Это обуславливает необходимость применения устройств с фиксированной точкой и ограниченной разрядной сеткой при ограниченных материальных затратах [1]. В таких условиях возникают специфические погрешности – погрешность на шаге и погрешности квантования [2, 3].

Квантования усложняет характер протекания динамических процессов и в первом приближении цифровые системы, рассматриваются как импульсные с последующим учетом влияния квантования по уровню в виде дополнительных шумов квантования [4].

Основным источником погрешности на шаге является использование численных методов. Источниками погрешностей квантования являются квантование входного сигнала в устройстве преобразования из аналогового вида в цифровой; квантования коэффициентов процедуры фильтрации и обработки сигналов; квантования арифметических операций.

Для определения путей уменьшения погрешностей цифровых устройств необходимо рассмотреть классификацию погрешностей. К классификации этих погрешностей имеется ряд подходов, которые с методических позиций объясняют разные категории погрешностей, места и условия их появления, трансформацию первичных погрешностей на выходе устройства [5, 6].

Следует отметить, что при рассмотрении цифровых устройств ряд авторов относят те или иные погрешности к разным категориям. В последнее время понятие “методическая погрешность” применяют к погрешности, которая вызвана методом, положенным в основу создания самого устройства. Погрешность квантования, которая является неминуемой и обусловленная методом цифрового представления информации, также именуется “методической”. При этом подчеркивается, что ее размер не зависит от усилий разработчика устройства [5].

Обычно определение длины разрядной сетки, то есть количества двоичных разрядов для представления чисел, выполняют в предположении, что при обработке сигналов в цифровых устройствах не вносится дополнительная погрешность. Такое предположение не соответствует действительности, если обработка идет при конечной разрядной сетке. Однако это предположение может быть достоверным, если причины и законы формирования всех погрешностей известны, что дает возможность учесть их влияние при определении рациональной длины разрядной сетки.

Погрешность результата обработки в основном зависит:

- от методической погрешности из-за использования приближенных зависимостей;
- от погрешностей входных данных: это и первичные погрешности измерителя и преобразователя сигналов, это погрешности квантования сигналов и т.п.;
- от погрешностей самого цифрового устройства, которые он вносит во время обработки сигналов с конечной разрядной сеткой.

Можно отметить и некоторые пути уменьшения погрешности за счет:

- использования зависимостей, которые наиболее полно и точно отображают взаимосвязи между реальными физическими переменными. При этом ограничения может

быть связано с недостаточно глубокими знаниями характера процесса, который отображается;

- повышения точности измерений и представления входных сигналов. Это обуславливает использования точных, а следовательно, и дорогих датчиков и преобразователей сигналов;
- рационального повышения точности работы цифрового устройства или цифровой системы в целом. Это может быть достигнуто повышением длины разрядной сетки в границах заданной точности или выбора оптимальной структурной организации алгоритма вычислений или вычислительной системы в целом.

Основные причины возникновения погрешности на шаге и погрешностей квантования это не идеальность характеристик цифрового устройства и конечная длина разрядной сетки. Следует отметить, что эти погрешности имеют тенденцию к накоплению при увеличении количества операций обработки сигналов. Погрешность, которая возникает на выходе цифрового устройства и связанная с округлением арифметических операций и трансформацией через алгоритм и устройство обработки, будем называть вычислительной. Эта погрешность зависит от точности воспроизведения идеальной характеристики обработки, количества операций в процедуре обработки сигналов, структурной организации цифрового устройства, длины разрядной сетки, формы представления чисел и способа округления результатов операций.

Для уменьшения исходной погрешности цифрового устройства необходим комплексный подход для уменьшения этих факторов, а это означает, что при проектировании следует согласовывать характеристики точности всех элементов цифрового устройства и системы в целом: датчиков и преобразователей сигналов, методов и алгоритмов обработки, структурную организацию цифрового устройства и системы в целом.

Рассмотрим погрешности цифрового устройства обработки сигналов, при этом исключим вопрос точности входного сигнала. Тогда вычислительную погрешность цифрового устройства будем классифицировать на этапах разработки и реализации такими составляющими как методическая, трансформированная (наследственная) и инструментальная (машинная) [6].

*Методическая погрешность.* На этапе проектирования цифрового устройства определяют математическое описание физического объекта или процесса. Для реализации на основе численных методов формируют модель этого процесса. Такое представление является приближенным, что приводит к появлению методической погрешности.

Для анализа точности работы цифровых устройств вводится понятия погрешности на шаге [3]

$$\delta_T f[n] = \nabla(f_i[n] - f_p[n]) = \nabla f_i[n] - \nabla f_p[n],$$

где  $\nabla f[n] = f[n] - f[n-1]$  - обратная разность первого порядка;  $f_i[n]$  - выходной сигнал идеального устройства после дискретизации;  $f_p[n]$  - выходной сигнал реального устройства после дискретизации и оцифровки;  $T$  - период дискретизации сигнала.

Применение  $Z$ -преобразования к погрешности на шаге  $\delta_T f[n]$  позволяет получить изображение этой погрешности

$$Z\{\delta_T f[n]\} = \frac{z-1}{z} [F_i(z) - F_p(z)], \quad (1)$$

где  $z$  - комплексная переменная  $Z$ -преобразования;  $F_i(z) = Z\{f_i[n]\}$  - изображение сигнала идеального устройства после дискретизации;  $F_p(z) = Z\{f_p[n]\}$  - изображение сигнала реального устройства после дискретизации и оцифровки.

Изображение выходного сигнала выразим через изображение входного сигнала  $X(z) = Z\{x[n]\}$  и передаточные функции идеального  $H_{и}(z)$  и реального  $H_{р}(z)$  устройств

$$\begin{aligned} F_{и}(z) &= H_{и}(z)X(z), \\ F_{р}(z) &= H_{р}(z)X(z), \end{aligned} \quad (2)$$

После подстановки этих соотношений в (1) получим

$$Z\{\delta_T f[n]\} = \frac{z-1}{z} [H_{и}(z) - H_{р}(z)]X(z).$$

Преобразуя изображение погрешности на шаге с учетом (2) запишем

$$Z\{\delta_T f[n]\} = \frac{z-1}{z} \left[ 1 - \frac{H_{р}(z)}{H_{и}(z)} \right] H_{и}(z)X(z) = \frac{z-1}{z} \Gamma(z)F(z). \quad (3)$$

Из уравнение (3) следует, что погрешность на шаге зависит от относительной погрешности  $\Gamma(z)$  реального устройства по отношению к идеальному

$$\Gamma(z) = 1 - \frac{H_{р}(z)}{H_{и}(z)}. \quad (4)$$

Тогда для получения квазиидеального выходного сигнала на выходе устройства необходимо минимизировать относительную погрешность  $\Gamma(z)$ .

К частотным характеристикам перейдем, подставив в (4)

$$z = e^{j\bar{\omega}},$$

где  $\bar{\omega} = \omega T$  - относительная цифровая частота,  $\bar{\omega} \in [0, \pi]$ ;  $\omega$  - текущая угловая частота входного сигнала, тогда

$$\gamma(j\bar{\omega}) = 1 - \frac{H_{р}(j\bar{\omega})}{H_{и}(j\bar{\omega})} = 1 - \frac{H_{р}(\bar{\omega})}{H_{и}(\bar{\omega})} e^{j(\varphi_{р}(\bar{\omega}) - \varphi_{и}(\bar{\omega}))},$$

где  $H_{р}(\bar{\omega})$  и  $\varphi_{р}(\bar{\omega})$  - соответственно амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики реального устройства;  $H_{и}(\bar{\omega})$  и  $\varphi_{и}(\bar{\omega})$  - соответственно амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики идеального устройства.

Найдем модуль  $\gamma(\bar{\omega})$  и фазу  $\varphi_{\gamma}(\bar{\omega})$  относительной погрешности

$$\gamma(\bar{\omega}) = \sqrt{1 - 2 \left( \frac{H_{р}(\bar{\omega})}{H_{и}(\bar{\omega})} \right) \cos \Delta\varphi(\bar{\omega}) + \left( \frac{H_{р}(\bar{\omega})}{H_{и}(\bar{\omega})} \right)^2}; \quad (5)$$

$$\varphi_{\gamma}(\bar{\omega}) = \arctg \frac{1}{\text{ctg}(\Delta\varphi(\bar{\omega})) - \frac{1}{\frac{H_{р}(\bar{\omega})}{H_{и}(\bar{\omega})} \sin(\Delta\varphi(\bar{\omega}))}}, \quad (6)$$

где  $\Delta\varphi(\bar{\omega}) = \varphi_p(\bar{\omega}) - \varphi_n(\bar{\omega})$ .

При  $\Delta\varphi(\bar{\omega}) \rightarrow 0$  модуль относительной погрешности стремится к  $\gamma(\bar{\omega}) \rightarrow \left| 1 - \frac{H_p(\bar{\omega})}{H_n(\bar{\omega})} \right|$ , а при  $H_p(\bar{\omega}) \rightarrow H_n(\bar{\omega})$  фаза относительной погрешности к  $\left( -\frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\varphi(\bar{\omega})}{2} \right)$ .

На практике для оценки относительной погрешности вместо формул (5) и (6) используют формулы [7]

$$\tilde{\gamma}(\bar{\omega}) \approx \left| 1 - \frac{H_p(\bar{\omega})}{H_n(\bar{\omega})} \right|, \quad (7)$$

$$\tilde{\varphi}_\gamma(\bar{\omega}) \approx 1 - \frac{\varphi_p(\bar{\omega})}{\varphi_n(\bar{\omega})}. \quad (8)$$

Среднеквадратичные погрешности между формулами (5), (6) и (7), (8) составляют величину менее  $10^{-3}$  и определяются по формулам

$$\varepsilon_\gamma^2(\bar{\omega}) = 4 \frac{H_p(\bar{\omega})}{H_n(\bar{\omega})} \sin^2 \left( \frac{\Delta\varphi(\bar{\omega})}{2} \right),$$

$$\varepsilon_\varphi^2(\bar{\omega}) = \operatorname{arctg}^2 \frac{1}{\operatorname{ctg}(\Delta\varphi(\bar{\omega})) - \frac{1}{\frac{H_p(\bar{\omega})}{H_n(\bar{\omega})} \sin(\Delta\varphi(\bar{\omega}))}} - \left( \frac{\Delta\varphi(\bar{\omega})}{\varphi_n(\bar{\omega})} \right)^2.$$

Это означает, что использование формул (7) и (8) вполне оправдано.

Таким образом, улучшение частотных характеристик позволяет повысить точность устройства, уменьшая погрешность на шаге.

Источником методической погрешности являются погрешности численных методов, поэтому эти погрешности могут быть снижены к желаемым значениям исходя из общей теории приближенных вычислений. Несмотря на теоретические оценки методической погрешности выбор метода приближенных вычислений при разработке алгоритма и устройства с учетом методической погрешности, времени вычислений, быстродействия аппаратных и микропроцессорных средств, а также необходимой емкости памяти является задачей, которую необходимо решать каждый раз. Следует отметить, что выбор метода приближенных вычислений может состоять в выборе метода по формированию наилучших статических и динамических характеристик проектируемого цифрового устройства [8].

Моделирование на ЭВМ реализации выбранных вариантов приближенных вычислений и характеристик проектируемого цифрового устройства позволяет выбрать наилучшее решение по заданным показателям качества.

*Трансформированная (наследственная) погрешность.* При цифровой обработке сигналов на выходную погрешность имеют существенное влияние погрешности входных сигналов, которые возникают из-за неточности измерений и невозможности представления некоторых числовых величин конечным числом значащих цифр (иррациональные числа, некоторые дроби и т.п.), а также погрешности предыдущих этапов обработки.

Так преобразования аналогового сигнала в цифровой выполняется в аналого-цифровом преобразователе. Теоретически установлено, что квантования с линейной шка-

лой приводит к возникновению методической погрешности, которую называют шумом квантования. Максимальное значение этой погрешности равняется  $\pm 0.5$  единиц младшего разряда, а дисперсия  $D_e$  при работе со случайными процессами приблизительно равняется [9]

$$D_e = \sigma_e^2 \approx \frac{\Delta}{12},$$

где  $\Delta$  - шаг квантования;  $\sigma_e$  - среднеквадратичное отклонение.

Однако, этот результат относится к идеальным АЦП, в которых характеристика квантования, это зависимость выходного кода от входного сигнала  $U_{вх}$ , при числе разрядов  $r$  имеет  $2^{r-1}$  ступеней, а шаг квантования  $\Delta$  постоянный по всей характеристике.

Характеристики квантования реальных АЦП отличаются от идеальных из-за наличия неминуемых аппаратных погрешностей, обусловленных несовершенством отдельных элементов преобразователя, отходом параметров в зависимости от времени, температуры, нестабильностью источников питания и т.п. Общее число источников, которые вызывают аппаратные погрешности, всегда большое и зависит от того, насколько маленькую погрешность должен обеспечить АЦП, то есть от класса точности данного АЦП.

Поэтому для анализа погрешностей квантования может быть построенная нелинейная модель квантования конкретного АЦП, которая учитывает нелинейные процессы квантования и влияния дестабилизирующих факторов схемы конкретного АЦП, и линейная модель квантования, которое приближенно, но достоверно описывает процесс квантования [2, 3, 10].

Воспользуемся линейной моделью формирования выходного сигнала АЦП. Она состоит из дискретизатора, который с периодом дискретизации  $T$ , из аналогового сигнала  $x_a(t)$  формирует дискретный сигнал  $\tilde{x}_n$ , и сумматору, который прибавляет погрешность квантования по уровню  $e_n^{АЦП}$  для формирования выходного цифрового сигнала  $x_n$  [11].

Для соединения АЦП с компьютерной системой применяют прямой (CSB) и дополнительный (СТС) двоичные коды: прямой - для униполярных сигналов, а дополнительный - для биполярных сигналов. При разрядности  $r_{АЦП}$  в прямом двоичном коде используются все разряды для кодирования входного сигнала  $b = r_{АЦП}$ , а в дополнительном коде один разряд выделяется для знака и  $b$  разрядов для кодирования величины сигнала, то есть  $b = r_{АЦП} - 1$ .

Анализ погрешностей квантования базируется на предположении, что погрешность равновероятна в пределах шага квантования и ее можно рассматривать как случайную величину с равномерной плотностью распределения [2]. При квантовании могут использоваться два способа ограничения разрядной сетки – округление и усечение. Среднее значение шума квантования  $m_e$  при округлении центрированное  $m_e = 0$ , а при усечении смещенное  $m_e = -0.5\Delta$ , где  $\Delta = 2^{-b}$ . Дисперсия шума квантования  $\sigma_e^2$  для обоих способов равна

$$\sigma_e^2 = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{2^{-2b}}{12}. \quad (9)$$

Для удобства использования дисперсию шума квантования  $\sigma_e^2$  выражают в логарифмическом масштабе [3]

$$\sigma_{\epsilon}^2 (\text{дБ}) = 10 \lg \left( \frac{\Delta^2}{12} \right) = 10 \lg \left( \frac{2^{-2b}}{12} \right) \approx -(6.02b + 10.79) \text{дБ} \quad (10)$$

Таким образом, при обработке сигнала цифровым устройством будет получен результат, который содержит погрешность, связанную с неточностью входного сигнала. Эту погрешность называют трансформированной или наследственной. Для ее определения используют положения теории точности, на основе которых показано, что трансформированная погрешность вообще зависит не только от погрешностей входного сигнала, но и от величины входного сигнала [6].

*Инструментальная (машинная) погрешность.* Возникновения методической и трансформированной погрешностей показывает, что они определяют точность устройства независимо от способа вычислений в устройстве. Поэтому построение цифрового устройства и его структурная реализация определяют третью категорию погрешностей – инструментальную. Поскольку эта погрешность рассматривается для цифровых устройств и вычислительных машин, то ее называют также машинной.

Инструментальная погрешность зависит от

- типа используемых аппаратных средств;
- разрядной сетки, которая ограничивает точность арифметических операций;
- формы представления чисел;
- способа округления результатов вычислений;
- структурной организации алгоритма вычислений и цифрового устройства.

При реализации цифрового фильтра коэффициенты  $a_j$  и  $b_i$  передаточной функции

$$H(z) = \frac{\sum_{j=0}^M a_j z^{-j}}{1 + \sum_{i=0}^N b_i z^{-i}}, \quad N \geq M, a_j \in Z, b_i \in Z,$$

должны быть представлены в двоичном коде. Для этого их нормализуют, чтобы  $|a_j| \leq 1$  и  $|b_i| \leq 1$ , а затем квантуют. При этом возникает погрешность квантования коэффициентов, которая влияет на точность реализации частотных характеристик в виде дополнительной погрешности аппроксимации.

Погрешности квантования арифметических операций возникают в местах суммирования и умножения чисел. Если разрядность сетки устройства выбрана верно и при суммировании переполнения нет, то источниками шума можно считать операции умножения. Однако при анализе промежуточных результатов сложных алгоритмов обработки, которые имеют большое количество операций, возникает переполнение и при операции суммирования [12]. Поэтому для сложных алгоритмов обработки источниками погрешности квантования следует рассматривать и операции суммирования и операции умножения.

Если к  $i$ -му узлу подключено  $k_i$  источников шума и каждый из них создает белый шум с дисперсией (9), то в соответствии с моделью Джексона дисперсия исходного шума  $(\sigma_{\text{ВЫХ}}^{\text{АРОП}})^2$  будет определяться как [2]

$$(\sigma_{\text{ВЫХ}}^{\text{АРОП}})^2 = \sigma_{\epsilon}^2 \sum_{i=1}^L k_i |H_i(j\bar{\omega})|^2, \quad (11)$$

где  $L$  - количество узлов в устройстве,  $k_i$  - количество источников шума в  $i$ -м узле,  $H_i(j\bar{\omega})$  - комплексный коэффициент передачи от  $i$ -го узла к выходу устройства.

Коэффициент  $b$ , который входит в формулу (9), в данном случае соответствует разрядности дробной части коэффициента.

Таким образом, на основе проведенного анализа и классификации выходной погрешности цифрового устройства можно распределить погрешности по таким категориям:

- методическая: – погрешность на шаге;
- трансформированная – погрешность квантования входного сигнала;
- инструментальная:
  - погрешность квантования коэффициентов в процедуре обработки;
  - погрешность квантования результатов арифметических операций.

Анализ этих категорий с учетом причин возникновения этих погрешностей позволяет сделать следующие выводы:

1. При проектировании цифрового устройства разработчик может влиять на методическую и инструментальную погрешности, учитывая трансформированную, как заданную и обусловленную при проектировании системы в целом.

2. Уменьшение влияния методической погрешности возможно за счет выбора такого метода приближенных вычислений, когда характеристики проектируемого цифрового устройства наилучшим образом соответствуют желаемой характеристике при заданном критерии качества.

3. Увеличения разрядности позволяет также уменьшить влияние методической погрешности, за счет уменьшения погрешности аппроксимации характеристик устройства, и трансформированной, за счет уменьшения погрешности квантования входного сигнала преобразователем. Но повышение разрядности ведет к повышению общего времени обработки операндов большой длины. А это требует использования быстродействующих микропроцессорных устройств с расширенной арифметикой и разрядной сеткой, что обуславливает применение больших материальных затрат.

4. Поскольку, как показано выше, инструментальная погрешность зависит от количества двоичных разрядов, то их увеличения уменьшает вклад инструментальной погрешности на выходе устройства, но усложняет и удлиняет процесс обработки сигналов. Поэтому следует обратить внимание на структурную организацию процесса обработки

сигналов, т.к. в выражении (11) второй множитель  $\sum_{i=1}^L k_i |H_i(j\bar{\omega})|^2$  определяется особенно-

стями структурной организации процесса обработки. Тогда можно подобрать такую организацию процесса обработки, решая задачу оптимизации, чтобы этот множитель стремил-

ся к минимуму  $\sum_{i=1}^L k_i |H_i(j\bar{\omega})|^2 \rightarrow \min$ .

Errors of a output signal of the digital device are analyzed. The basic categories of errors are determined. Classification and the analysis of errors of digital devices is carried out. Sources of these errors and are shown a way their decrease.

1. Ситников В.С., Кисель А.Г. Аппаратное и программное обеспечение натурального эксперимента при проведении гидрофизических исследований // Акустика и ультразвуковая техника: Сб. научн. тр. – К.: Техніка, 1992. – Вып. 27. – С. 46-50.

2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

3. Бесекерский В.А., Изранцев В.В. Системы автоматического управления с микро-ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

4. Системы цифрового управления самолетом. / А.Д. Александров, В.П. Андреев, В.М. Кейн и др.; Под ред В.Д. Александрова, С.М. Федотова. – М.: Машиностроение, 1983. – 223 с.

5. Таланчук П.М., Скрипник Ю.О., Дібровний В.О. засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах. – К.: Райдуга, 1994. – 672 с.
6. Соренко Э.И., Телига А.И., Шаталов А.С. точность вычислительных устройств и алгоритмов. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
7. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
8. Грановский В.А. Динамические измерения: основы методологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
9. Бахтиаров Г.Д., Малинин В.В., Школин В.П. Аналого-цифровое преобразование. – М.: Сов. радио, 1980. – 280 с.
10. Бойко Н.П., Стеклов В.К. Системы автоматического управления на базе микро-ЭВМ. – К.: Техніка, 1989. – 182 с.
11. Куприянов М.С., Матюшкин Б.Д. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – СПб.: Политехника, 1999. – 592 с.
12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.178.3

### ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРИВАЛОСТІ АВІАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Бабак В.П., Стадниченко В.Н., Приймаков О.Г., Токарчук В.В

#### Постановка завдання

Втомленість авіаційних матеріалів - один з основних видів їх руйнування в умовах експлуатації авіаційної техніки, причому руйнування від втомленості виникає раптово, і на цей час прогнозується досить важко. Зазвичай для описання кривих втомленості - кривих Велера - використовують степеневе або показникове рівняння:

$$\sigma^m N = C, \text{ або } \lg \sigma = -\frac{1}{m} \lg N + \frac{1}{m} \lg C, \quad (1)$$

де  $m$ ,  $C$  - постійні, що залежать від властивостей матеріалу, температури випробувань та середовища.

Це рівняння використовують при проведенні випробувань на витривалість класичним методом згідно ДСТУ 25.508-94, так як логарифмічні чи напівлогарифмічні координати найбільш зручні для графічного зображення залежностей  $\sigma = f(N)$ . Але розвиток прискорених методів визначення параметрів витривалості (метод Одінга-Вейбулла, Прондешана, Муратова, Іванової та ін.) показав переваги використання кривих втомленості, що описуються рівнянням Одінга-Вейбулла, [1, 2], створеного на основі дислокаційної теорії втомленості:

$$N_k = K(\sigma_i - \sigma_{-1})^{-m}, \text{ або } \lg N_k = \lg K - m \lg(\sigma_i - \sigma_{-1}), \quad (2)$$

де:  $N_k$  -число циклів до руйнування,

$\sigma_i$  -напруження, що викликає руйнування,

$k$ ,  $t$  -коефіцієнти, постійні для даного металу чи сплаву, методика їх визначення подається в [2].

Параметри рівняння Одінга-Вейбулла змінюються в вузьких межах, а зв'язок між ними можна виразити лінійними функціями. При цьому досягається прийнятна точність оцінки витривалості; значно зменшується кількість деталей для випробувань, а в деяких виключних випадках можна обмежитись випробуванням навіть однієї деталі, [3, 4]. При дослідженні закономірностей зміни параметрів рівняння Одінга-Вейбулла необхідно установити зв'язок цих параметрів з параметрами степеневого або показникового рівнянь витривалості (1). Цей зв'язок конче необхідний для подальшого вдосконалення прискорених випробувань втомленості авіаційних матеріалів та для розрахунку довговічності деталей авіаційної техніки по відомих границях витривалості.

Отже, метою даної наукової статті є встановлення взаємозв'язку між параметрами кривих втомленості для класичного степенево-показникового рівняння та для рівняння Одінга-Вейбулла.

#### Результати дослідження

Розглянемо можливість перерахунку параметрів показникового рівняння (1) в параметри рівняння Одінга-Вейбулла (2), що допоможе спростити побудову кривої Велера

для будь-якого авіаційного матеріалу. Запишемо класичне показникове рівняння похилої ділянки кривої втомленості кольорових та жаростійких металів та сплавів:

$$10^{\sigma/K} N = 10^{\sigma_R/R} N_G = 10^{G^1}, \quad (3)$$

де  $\sigma$  та  $N$  - текучі напруження та число циклів навантажень, що визначає довговічність;

$K$  та  $N_G$  - параметри (тангенс кута нахилу до осі  $\lg N$  в напівлогарифмічній системі координат  $\lg N - \sigma$  та абсциса точки перелому кривої втомленості в тій же системі координат);

$\sigma_R$  - межа витривалості довільного циклу навантажень,  $C'$  - початкова абсциса похилої ділянки.

Рівняння Одінга-Вейбулла (2) для області багатоциклової втомленості запишемо у вигляді:

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_{\bar{w}}} N = 10^{C_{\bar{w}}}, \quad (4)$$

де  $m_{\bar{w}}$  та  $C_{\bar{w}}$  - параметри, відповідні параметрам  $K$  та  $C'$  в класичному рівнянні (3).

Порівняння рівнянь (3) та (4) показує, що для побудови похилої ділянки кривої і втомленості по залежності (3) досить знати параметри  $K$  та  $C'$ . Крива втомленості в напівлогарифмічних координатах представляє собою полігональну криву з горизонтальною ділянкою  $\sigma = \sigma_R$  та абсцисою точки перелому  $\lg N_G$ . Для побудови полігону потрібні три параметри:  $K$ ,  $N_G$ ,  $\sigma_R$ , або  $K$ ,  $C'$ ,  $\sigma_R$ , або  $K$ ,  $C'$ ,  $N_G$ . Рівняння (4) є єдиним трьохпараметричним рівнянням кривої втомленості, котра в логарифмічних координатах  $\lg N - \lg(\sigma - \sigma_R)$

зображається прямою лінією, котангенс кута нахилу котрої до осі  $\lg N$  дорівнює  $m_{\bar{w}}$ , а

початкова абсциса -  $C_{\bar{w}}$ . Початкова абсциса  $C'$  рівняння (3) відповідає  $\sigma = 0$ , а початкова

абсциса  $C_{\bar{w}}$ , рівняння (4) - різниці  $\sigma - \sigma_R = 1$ .

Для встановлення однозначного зв'язку між параметрами рівнянь (3) та (4) використаємо інтегральний метод, згідно якого приймається рівність площ, обмежених кривими та їх лінійними апроксимаціями і осями координат в двох системах. При цьому в напівлогарифмічній системі координат по осі ординат замість напружень  $\sigma$  будемо відкладати різницю напружень  $\sigma - \sigma_R$ . Тоді рівняння (3) матиме вигляд:

$$10^{(\sigma - \sigma_R)/K} N = N_G, \quad (5)$$

Зверху криві втомленості обмежимо значеннями  $(\sigma - \sigma_R)_{гр}$  та  $\lg(\sigma - \sigma_R)_{гр}$ , відповідними межами витривалості з малоцикловою областю при граничному числі циклів  $N_{гр}$  порядку  $10^5$  знизу — різницями  $\sigma - \sigma_R = 1$  та  $\lg(\sigma - \sigma_R) = 0$ , тим самим рівняння (4) та (5) стають рівнозначними.

В напівлогарифмічних координатах рівняння (5) матиме вигляд прямої, а рівняння (4) - кривої, як показано на рис. 1.

В логарифмічних координатах згідно рівняння (5) отримуємо криву, а згідно рівняння (4) - пряму, як це показано на рис.2.

На рівні граничних напружень довговічності прийняті співпадаючими згідно рівнянь (4) та (5).

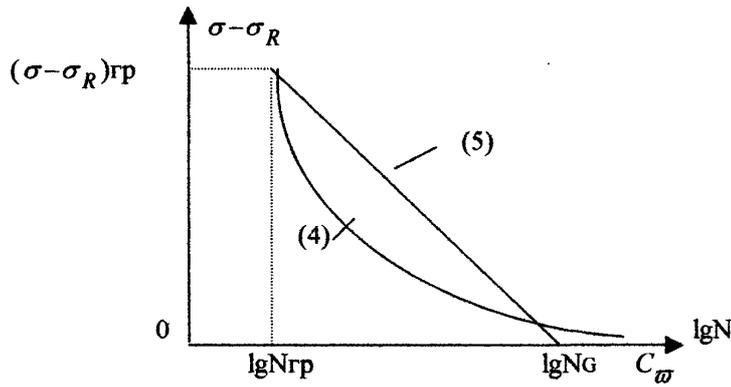


Рис.1 Замкнута лінеаризація рівнянь (4), (5) в напівлогарифмічній системі координат  $(\sigma - \sigma_R) - \lg N$

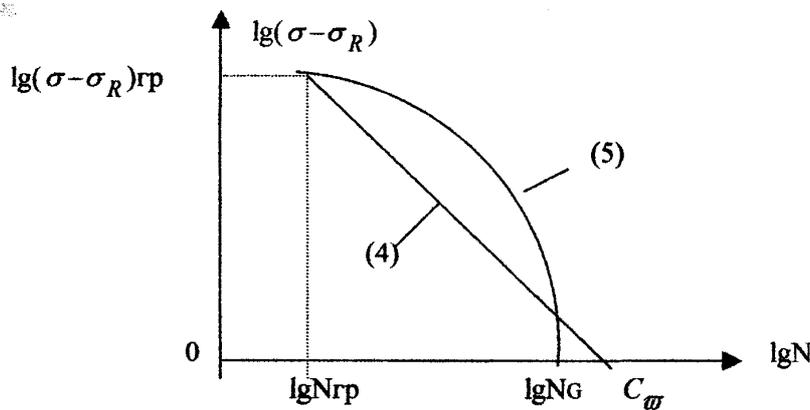


Рис. 2 Замкнута лінеаризація рівнянь (4), (5) в логарифмічній системі координат  $\lg(\sigma - \sigma_R) - \lg N$

У відповідності з інтегральним методом для логарифмічної системи координат:

$$\int_0^{\lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР}} [\lg N_G - (\sigma - \sigma_R)/K] d[\lg(\sigma - \sigma_R)] = \quad (6)$$

$$= 0,5m_w \lg^2(\sigma - \sigma_R)_{ГР} + \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР};$$

$$\lg N_G \lg(\sigma - \sigma_R) \Big|_0^{\lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР}} - 10^{\lg(\sigma - \sigma_R)} / K \ln 10 \Big|_0^{\lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР}} = \quad (7)$$

$$= 0,5m_w \lg^2(\sigma - \sigma_R)_{ГР} + \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР};$$

$$\lg N_G \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - [(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - 1] / K \ln 10 = \quad (8)$$

$$= 0,5m_w \lg^2(\sigma - \sigma_R)_{ГР} + \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР};$$

З рівностей (6)-(8) маємо:

$$m_w = 2 \frac{\lg N_G \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - [(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - 1] / (K \ln 10) - \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР}}{\lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР}}; \quad (9)$$

В напівлогарифмічній системі координат аналогічна умова має вигляд:

$$\int_1^{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}} C_w - \lg(\sigma - \sigma_R) d(\sigma - \sigma_R) = (\sigma - \sigma_R)_{ГР}^2 / 2K + (\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР}; \quad (10)$$

$$\int_1^{(\sigma-\sigma_R)_{ГР}} C_{\bar{w}} d(\sigma-\sigma_R) - m_{\bar{w}} \int_1^{(\sigma-\sigma_R)_{ГР}} [(\ln \sigma - \sigma_R) / \ln 10] d(\sigma - \sigma_R) =$$

$$= (\sigma - \sigma_R)^2 / 2K + (\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР}; \quad (11)$$

$$C_{\bar{w}}(\sigma - \sigma_R) \Big|_1^{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}} - m_{\bar{w}} [(\sigma - \sigma_R) \ln(\sigma - \sigma_R) - (\sigma - \sigma_R)] / \ln 10 \Big|_1^{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}} =$$

$$= (\sigma - \sigma_R)_{ГР}^2 / 2K + (\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР}; \quad (12)$$

$$C_{\bar{w}}[(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - 1] - m_{\bar{w}} [(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - (\sigma - \sigma_R)_{ГР} + 1] / \ln 10 =$$

$$= (\sigma - \sigma_R)_{ГР}^2 / 2K + (\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР}; \quad (13)$$

З виразу (13) отримаємо:

$$C_{\bar{w}} = \frac{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}^2 / 2K + (\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР}}{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}^{-1}} +$$

$$+ \frac{m_{\bar{w}} [(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - (\sigma - \sigma_R)_{ГР} + 1] / \ln 10}{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}^{-1}}; \quad (14)$$

Формули (9) та (14) дозволяють однозначно перейти від параметрів класичного показникового рівняння (1) до параметрів рівняння Одінга-Вейбулла (2) кривої втомленості авіаційних матеріалів, що забезпечить взаємозамінність результатів дослідження витривалості цих матеріалів.

Особливо важливі формули (9) та (14) для розв'язання задач, пов'язаних з розрахунковим та прискореним експериментальним визначенням характеристик опору втомленості.

Для того, щоб перейти від рівняння Одінга-Вейбулла до класичного показникового рівняння необхідно вираз (14) розв'язати відносно параметру  $K$ , а по отриманому значенню  $K$  із виразу (9) знайти параметр  $N_G$ .

Тобто:

$$K = \frac{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}}{2C_{\bar{w}}[(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - 1] - 2m_{\bar{w}}[(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \ln(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - (\sigma - \sigma_R)_{ГР} + 1] / \ln 10} -$$

$$- \frac{(\sigma - \sigma_R)_{ГР}}{2(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР}}; \quad (15)$$

$$\lg N_G = \frac{2 \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР} \lg N_{ГР} + \lg^2(\sigma - \sigma_R)_{ГР} m_{\bar{w}} + 2 [(\sigma - \sigma_R)_{ГР} - 1] / K \ln 10}{2 \lg(\sigma - \sigma_R)_{ГР}}; \quad (16)$$

Крім того, формули (9), (14), (15), (16) істотно полегшують обробку результатів випробувань витривалості в традиційній постановці. Спочатку їх можна відобразити побудовою кривої Велера в напівлогарифмічних координатах, а потім знайти параметри  $m_w$  та  $C_w$ .

### Висновки

Таким чином, авторам вдалося пов'язати параметри рівнянь витривалості в класичній постановці Велера та в системі Одінга-Вейбулла, Зазначений зв'язок дозволить прогнозувати витривалість несучих елементів авіаційних конструкцій на стадії їх проектування. Переваги системи Одінга-Вейбулла порівняно з іншими для оцінки витривалості

на стадії проектування чи впровадження дослідних зразків нової техніки показані в роботі [5].

The interchangeability between parameters of Veller's curves for prognostication of longevity of friction units of aviation techniques.

1. Биргер В.А.. Расчёт на прочность деталей машин. - М.: Машиностроение, 1979. - 702 с.
2. Кагаев В.П. Расчёт на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. – 231 с.
3. Одинг И.А.. Допустимые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М.: Машиностроение, 1962. – 260с.
4. Роботников Ю.Н.. Механика деформируемого твёрдого тела. - М.: Наука, 1988. - 712с.
5. Демаков И.П., Балагезян Ю.Г. Оптимизация испытаний на надёжность и обработка их испытаний - М.: Машиностроение, 1995. - 56 с.

УДК 621.891.031

## ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ, ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ВИТРИВАЛОСТІ АВІАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Бабак В.П., В.Н. Стадніченко, О.Г. Приймаков

В сучасній механіці існує десять критеріїв працездатності, що, в залежності від функціонального призначення та умов експлуатації, визначають кількісно-якісний склад проектувальних та перевірочних розрахунків. Такий підхід існує і при розрахунку та конструюванні деталей авіаційної техніки (ат), а також при виборі авіаційних матеріалів.

В складних умовах експлуатації авіаційних матеріалів: нестаціонарне навантаження, багатократні перевантаження, вібрації варіативність аеродинамічної міцності, складний температурний режим і т.і., дуже важко відібрати основні критерії працездатності, їх вибір носить суб'єктивний характер і багато в чому залежить від емпіричного та практичного досвіду розробників – проєктантів. Розрахунки по кількох критеріях працездатності часто призводять до взаємовиключних або протирічних результатів, що збільшує суб'єктивність розрахунків, зменшує наукову обґрунтованість створюваних одиниць ат. На стадії експлуатації така багатокритеріальність не дозволяє об'єктивно визначити залишковий ресурс роботи, експлуатаційну межу витривалості та загальну надійність ат.

Отже, постає нагальна потреба у створенні науково обґрунтованого інтегрального критерію працездатності авіаційних матеріалів, зокрема, високолегованих жаростійких сталей по ДСТУ 4543-94 та кольорових сплавів на основі алюмінію по ДСТУ 1131-94. Введення такого інтегрального показника дозволить розрахунок та проєктування деталей та складальних одиниць літальних апаратів (ла) раціоналізувати, а, по можливості, і оптимізувати, позбутися розрахункових протиріч, зекономити матеріали, енерговитрати, час науковців та інженерів – авіаторів.

На сьогоднішній день встановлено, [1, 2], характер напруженого стану в поверхневому шарі пружного матеріалу у випадку першопочаткового контакту з індентором при одночасній дії нормальних та тангенційних навантажень. Головні напруження в межах плями контакту:

$$\begin{cases} \sigma_1 = p_{\max} [f(1 + \cos \beta) - \sin \beta], \\ \sigma_2 = 2\mu p_{\max} [f \cos \beta - \sin \beta], \\ \sigma_3 = -p_{\max} [f(1 - \cos \beta) + \sin \beta] \end{cases} \quad (1)$$

де  $p_{\max}$  - максимальний тиск в центрі плями контакту;  $f$  - коефіцієнт тертя в зоні контакту (молекулярна складова);  $\mu$  - коефіцієнт Пуасона авіаційного матеріалу;  $\beta$  - координата зони контакту.

Знаючи компоненти головних напружень, можна знайти еквівалентне напруження  $\sigma_{\text{екв}}$  по IV гіпотезі міцності (енергії формозміни) С.П. Тимошенка, як найбільш об'єктивній, [3]:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma_{\text{мфх}}^2 + 3\tau_{\text{макс}}^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{\text{макс}}$ ,  $\tau_{\text{макс}}$  - діючі максимальні значення та дотичних напружень в небезпечному перерізі деталі ат.

Наприклад, при  $\beta = 0$ :

$$\sigma_{\text{екв}} = 2f_{\text{р max}} \sqrt{1 + \mu^2} - \mu = 3\tau \sqrt{1 + \mu^2} - \mu. \quad (3)$$

При  $\mu = 0,5\sigma_{\text{екв}} = 2,25\tau$ .

Відомо, що, [2, 3], величина  $\sigma_{\text{екв}}$  незалежно від прийнятої гіпотези міцності пропорційна питомій силі тертя. Коефіцієнт пропорційності між цими величинами  $K$  є функцією коефіцієнта Пуасона  $\nu$ , на думку авторів, має визначитись так:

$$K = 3\sqrt{1 + \mu^2} - \mu. \quad (4)$$

Гіпотеза лінійного сумування пошкоджень допускає, що величина пошкодження не залежить від стану матеріалу в даний момент часу та передісторії руйнування, а визначається лише рівнем напружень, що діють в даний момент. Тобто розглядає процес руйнування як випадковий марківський процес.

Згідно цієї гіпотези руйнування настає при умові:

$$\int_0^{n_c} \frac{dn_i}{n(\sigma_i)} = 1, \quad (5)$$

де  $n(\sigma_i)$  - число циклів до руйнування при стаціонарному навантаженні з амплітудою напружень  $\sigma_i$ ;  $n_c$  - число циклів до руйнування при нестаціонарному навантаженні.

Характеристикою нестаціонарного навантаження вибрано функцію розподілу напружень:

$$\Phi(\sigma_i) = P\{\sigma_x < \sigma_i\} = \frac{n_i}{n_c}, \quad (6)$$

де  $n_i$  - число циклів навантаження вибраного перерізу з напруженням  $\sigma_x$ , що перевищує  $\sigma_i$ .

Тоді число циклів з амплітудним значенням напруження, що лежить в межах  $\sigma_i$  та  $\sigma_i + d\sigma_i$ , буде:

$$dn_i = n_c \Phi'(\sigma_i) d\sigma_i, \quad (7)$$

а умови руйнування прийме вигляд:

$$n_c \int_{\sigma_{\text{min}}}^{\sigma_{\text{max}}} \frac{\Phi'(\sigma_i) d\sigma_i}{(\sigma_b / \sigma_i)} = 1, \quad (8)$$

де  $\sigma_b$  - межа міцності авіаційного матеріалу;  $t$  - параметр контактнo-фрикційної втомленості, автори рекомендують приймати: для кольорових сплавів на основі алюмінію  $t = 2$ , для високолегованих жаростійких сталей  $t = 1,3$ .

Число циклів навантажень  $n_c$  можна визначити і із умови мінімізації коефіцієнта тертя, тобто при  $f \rightarrow \min$  :

$$n_c = \left( \frac{\sigma_B}{Kf_{\min} p_{\max}} \right)^t. \quad (9)$$

Визначення  $f_{\min}$  дається в роботі [2].

Визначити імовірність неруйнування при відомих максимальних напруженнях в небезпечному перерізі, тобто оцінити надійність конструкції ат, можна на основі статистичної теорії міцності “найбільш слабкої ланки”.

$$P(\sigma_{\max}) = \begin{cases} 1 - \exp \left[ - \int_F \left( \frac{\sigma_{\max} - \sigma_i}{\sigma_B} \right)^m dF \right] & \text{при } \sigma_{\max} \geq \sigma_i, \\ 0 & \text{при } \sigma_{\max} < \sigma_i \end{cases} \quad (10)$$

де  $m$  - параметр степеневого рівняння втомленості Велера, [4];  $F$  - площа небезпечного перерізу.

Знаючи екстремальні напруження та, визначивши ефективні коефіцієнти концентрації напружень, за допомогою [4] легко перейти до визначення межі витривалості  $\sigma_R$ , циклічної довговічності  $N_c$  та залишкового ресурсу  $N_3$ .

В даний час триботехнічні властивості авіаційних матеріалів досліджені досить повно, [1-4], тому прогнозуючи інтенсивність зносу  $J_h$ , як найбільш об'єктивного триботехнічного показника, можна прогнозувати і міцність, надійність, довговічність та витривалість ат.

Розглянемо модель прогнозування імовірності руйнування при довільних законах розподілу напружень та меж міцності. Нехай в елементі ат діє змінне напруження  $\sigma_a = \xi$ . Імовірність того, що межа витривалості  $\sigma_R = \eta$  стане менше відомого значення  $\xi$ , тобто відбудеться руйнування, дорівнює:

$$P(\eta < \xi) = F_\eta(\xi), \quad (11)$$

де  $F_\eta(\xi)$  - функція розподілу випадкової величини  $\eta$ , що дорівнює:

$$F_\eta(\xi) = \int_{-\infty}^{\xi} f_\eta(\eta) d\eta. \quad (12)$$

Для знаходження імовірності руйнування  $P_p$  слід враховувати всі можливі значення  $\xi$ , тобто всі несумісні шляхи реалізації події, і, по формулі повної імовірності:

$$P_p = \int_{-\infty}^{\infty} f_\xi(\xi) F_\eta(\xi) d\xi. \quad (13)$$

Подібним чином знаходимо рівнозначну умову:

$$P_p = \int_{-\infty}^{\infty} f_\eta(\eta) (1 - F_\xi(\eta)) d\eta = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_\eta(\eta) F_\xi(\eta) d\eta. \quad (14)$$

Знаходження імовірності руйнування, тобто прогнозування надійності зводиться до обчислення інтегралів (13) або (14).

Для тривалої міцності  $\sigma_{\text{tp}}$  при нестационарному режимі навантаження функція неруйнування залежить від загального часу роботи  $t$ .

$$v(t) = \sigma_{\text{tp}}(t) - \sigma_{\text{екв}}(t). \quad (15)$$

Для втомної міцності справедливий степеневий закон зв'язку  $\sigma_{\text{tp}}$  та часу (числа циклів) до руйнування:

$$\sigma_{\text{tp}}^m(t)t = C, \quad (16)$$

де  $m$  та  $C$  - постійні авіаційного матеріалу, що залежать, в основному, від температури.

Нехай діючі напруження в момент часу  $t^*$ :

$$\sigma(t^*) = \sigma_0 f(t^*), \quad (17)$$

де  $\sigma_0$  - випадкова величина,  $f(t^*)$  - детермінована функція часу, [3].

Тоді, на основі лінійного закону сумування пошкоджень:

$$\sigma_{\text{екв}}(t) = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{t} \int_0^t f^m(t^*) dt^* \right\}^{\frac{1}{m}} = \sigma_0 \psi(t). \quad (18)$$

Для втомної міцності при нестационарному навантаженні функція неруйнування залежить від загального числа циклів навантажень:

$$v(N) = \sigma_{\text{RN}} - \sigma_{\text{екв}}(N), \quad (19)$$

В кожний момент навантаження діючі напруження:

$$\sigma(N) = \sigma_0 f(N), \quad (20)$$

та:

$$\sigma_{\text{RN}}^m N = C. \quad (21)$$

Враховуючи (21), на основі лінійного закону сумування пошкоджень отримаємо:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{N_{\Sigma}} \int_0^{N_{\Sigma}} f^m(N) dN \right\}^{\frac{1}{m}} = \sigma_0 \psi(N_{\Sigma}). \quad (22)$$

Рівності (18) та (22) справедливі при постійній температурі.

Таким чином, закладено методологію розробки інтегрального критерію працездатності авіаційних матеріалів, проте, для його впровадження слід виконати досить великий об'єм експериментальних досліджень, над чим і працюють зараз автори.

The methodology of prognostication of longevity, strength, reliability of aviation materials at the process designing and exploitation is worked out. The base for working out of the integral index of efficiency is made.

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 329 с.
2. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
3. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Приймаков О.Г., Масыгін В.І. Втомленість авіаційних конструкцій та засоби її попередження. – Харків: Інтегровані технології та енергозбереження, №1, 2002. – с. 99 – 105.

УДК621.01

## СИНТЕЗ СТРОФОЇДОГРАФІВ ЗА МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧНИХ СІМЕЙ

Бергер Е.Г., Дмитрієв Д.О., Бергер Є.Е., Діневич Г.Ю.

Механізми для відтворення заданої кривої знаходять широке розповсюдження в пристроях для обробки криволінійних поверхонь, вузлах машин-автоматів, маніпуляторах промислових роботів тощо [1, 2]. Їх синтез базується на принципі механічної реалізації графічних побудов даної траєкторії: схема побудов розглядається як геометричний аналог кінематичної схеми механізму. Для знаходження способу (схеми) побудов скористаємось методом [3], за яким крива F, задана рівнянням

$$F(x, y) = 0, \quad (1)$$

визначається як геометричне місце точок перетину відповідних<sup>1</sup> кривих  $\alpha$  і  $\beta$ , що належать однопараметричним сім'ям кривих

$$\alpha(x, y, t) = 0 \dots (\alpha); \beta(x, y, t) = 0 \dots (\beta), \quad (2)$$

при умові, що виключення параметра  $t$  з  $(\alpha)$  і  $(\beta)$  призводить до (1).

Як особливий випадок можна навести широко відомий в математиці приклад представлення кривої F параметричними рівняннями

$$x = \alpha(t) \dots (\alpha); y = \beta(t) \dots (\beta), \quad (3)$$

де  $(\alpha)$  і  $(\beta)$  – однопараметричні сім'ї прямих ліній, паралельних осям координат.

Точки перетину відповідних ліній сімей (2) або (3), побудованих при конкретному значенні  $t = t_i$ , належать до кривої F. Змінюючи  $t$ , одержуємо множину точок кривої F.

Розглянемо застосування цього методу на прикладах синтезу механізмів для відтворення кривої 3-го порядку F

$$y^2 = x^2 \frac{a+x}{a-x}, \quad (4)$$

відомою під назвою строфоїда.

Перше рівняння  $(\alpha)$  вибираємо довільно в вигляді  $y = (a+x)t$ ; підставивши це в (4), одержуємо

$$y = (a+x)t \dots (\alpha_1); x = a \frac{t}{\sqrt{1+t^2}} \dots (\beta_1). \quad (5)$$

При цьому очевидно, що виключення параметру  $t$  з  $(\alpha_1)$  і  $(\beta_1)$  призводить до рівняння (4).

Прийнявши за параметр  $t$  зміну величину  $t = \operatorname{tg} \varphi$ , маємо

$$y = \operatorname{tg} \varphi (a+x) \dots (\alpha_1'); x = a \cdot \sin \varphi \dots (\beta_1'). \quad (5')$$

<sup>1</sup> Побудованих при однаковому значенні параметра  $t$ .

При змінному параметрі  $\varphi$  рівняння  $(\alpha_1')$  виражає пучок прямих  $CM_i$  (рис.1а) з вершиною  $C(-a,0)$ ;  $\operatorname{tg}\varphi$  – змінний кутовий коефіцієнт цих прямих, а рівняння  $(\beta_1')$  – сім'ю прямих  $A_iM_i \parallel Oy$ , які проводяться на відстані  $ON_i = a \cdot \sin\varphi_i$ . Звідси випливають наступні способи побудов заданої кривої  $F$  (довільних її точок  $M_i$ ):

**1) Рис.1а.** З точки  $C(-a,0)$  проводимо довільний промінь  $CM_i$  пучка  $(\alpha_1')$  і перпендикулярно до нього пряму  $OBA_i$ . Якщо відкласти  $OA_i = a$ , то пряма  $A_iM_i \parallel Oy$  буде належати до сім'ї  $(\beta_1')$ . Дійсно, легко бачити, що  $ON_i = a \cdot \sin\varphi_i$ , значить точка  $M_i$  перетину  $CM_i$  і  $A_iM_i$  належить строфоїді (4); змінюючи  $\varphi$ , будемо одержувати множину її точок.

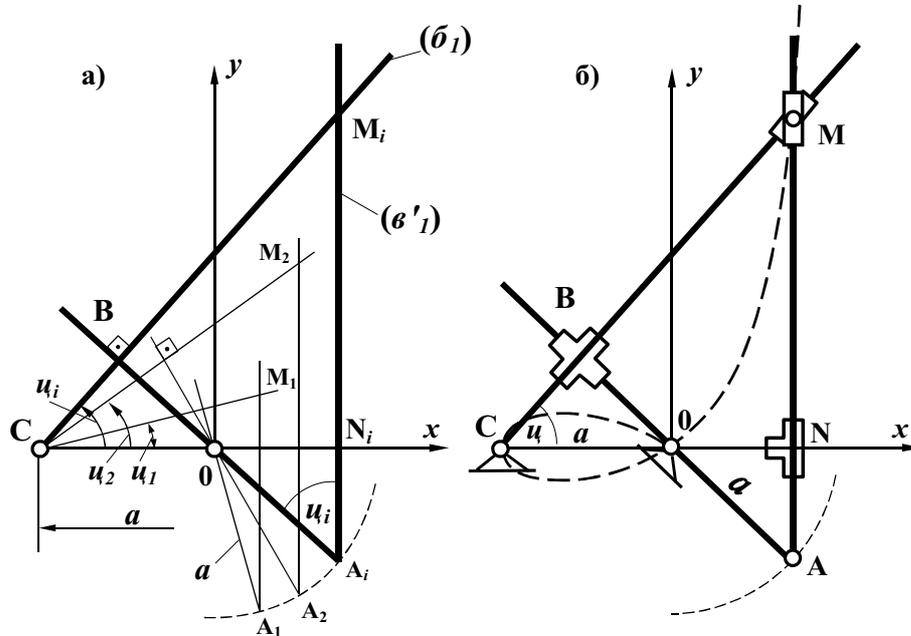


Рис.1

Механічна реалізація цих побудов – заміна геометричних елементів їх механічними представниками (точки  $C, O, A$  – шарніри,  $B, N$  – повзуни,  $M$  – шарнірно зв'язані повзуни, прямі  $OBA, AM$  і  $CM$  – кривошип, лінійка і куліса відповідно) дає кінематичну схему строфоїдографа за рис.1б.

**2) Рис.2а.** Під довільним кутом  $\varphi$  проводимо промінь  $CM$  пучка  $(\alpha_1')$  і паралельно йому на відстані  $a$  – пряму  $l-l$ , яка перетинає  $Oy$  в точці  $A$ . Перпендикуляр з  $A$  на  $CM$  – визначає точку  $M$ , яка є точкою строфоїди. Дійсно, з рис.2а маємо  $KM = a \cdot \sin\varphi_i$ , тобто пряма  $NM \parallel Oy$  належить до сім'ї  $(\beta_1')$ . Реалізація цих побудов виконується строфоїдографом, що подано на рис.2а. Модифікацією цього механізму (повзун  $M$  перенесено до шарніру  $C$ ) є відомий механізм Неуберга-Лебо [1] – рис.2б.

Приймаємо далі рівняння першої сім'ї в вигляді  $y=t \cdot x \dots (\alpha_2)$ ; з сумісного вирішення  $(\alpha_2)$  і (4) рівняння другої сім'ї може бути подане в різних формах, наприклад:

$$y=t \cdot x \dots (\alpha_2); \quad (y - a \cdot t) = -\frac{1}{t}(x + a) \dots (\beta_{2.1}),$$

$$y=t \cdot x \dots (\alpha_2); \quad x^2 + (y - a \cdot t)^2 = a^2 \dots (\beta_{2.2}), \quad (6)$$

$$y=t \cdot x \dots (\alpha_2); \quad x = a \frac{1-t^2}{1+t^2} \dots (\beta_{2.3}).$$

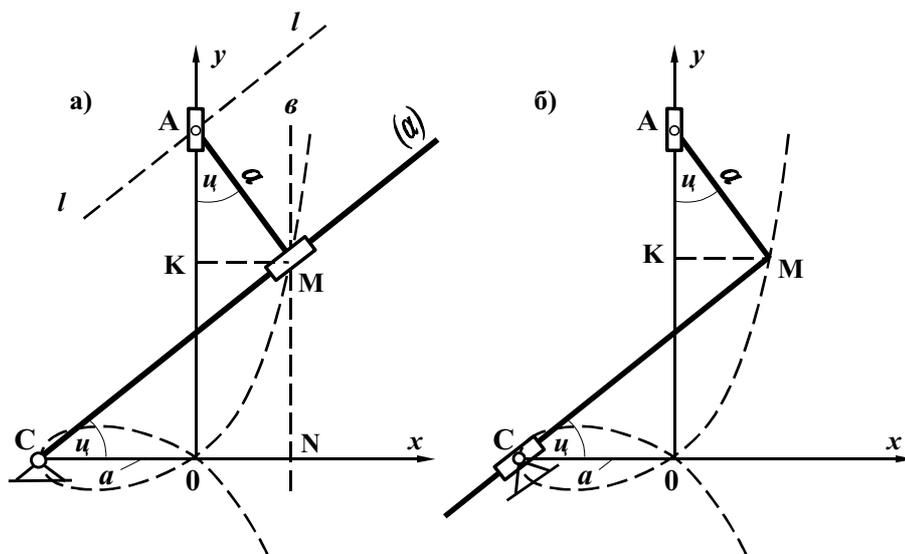


Рис.2

При  $t = \operatorname{tg} \varphi$  рівняння  $(\alpha_2)$  виражає пучок прямих з вершиною  $O$  (на рис. 3, 4 показано один промінь  $OA$  цього пучка з довільним кутом  $\varphi$ ; промінь  $OA$  має змінний кутовий коефіцієнт  $t = \operatorname{tg} \varphi$ ), а кожне з рівнянь  $(\beta_{2.1})$  відповідно подає:

-  $(\beta_{2.1})$  – сім'я прямих, які проходять через змінну точку  $N$  з координатами  $N(-a, a \cdot \operatorname{tg} \varphi)$  перпендикулярно до променя  $OA$  (кутовий коефіцієнт дорівнює  $-1/\operatorname{tg} \varphi$ ) – рис.3.

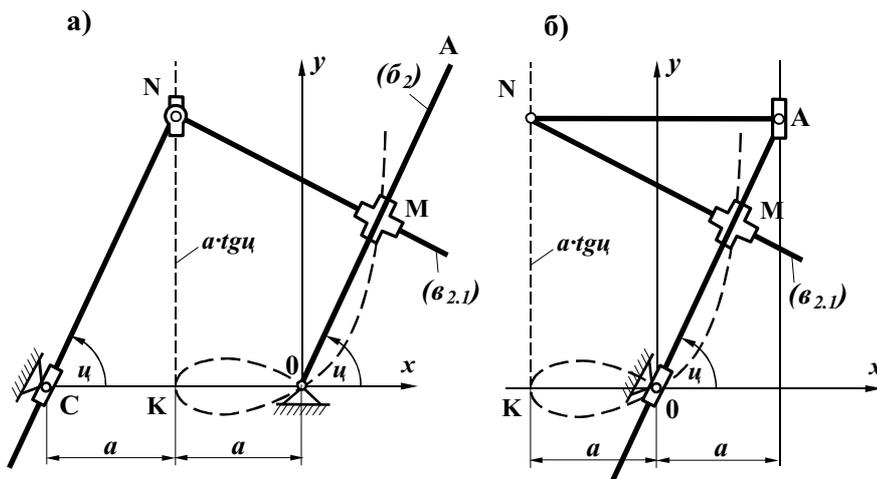


Рис.3

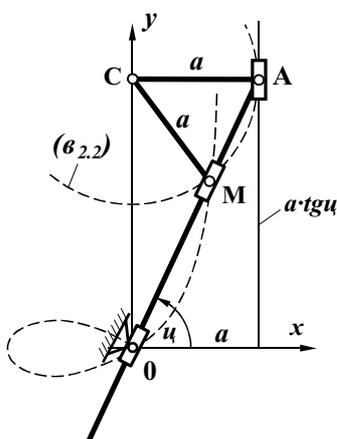


Рис.4

Перетин прямої  $NM$  з променем  $OA$  визначає точку  $M$ , яка належить строфоїді (рівняння 4). На рис.3а,б показано два способи побудов (відрізняються способом визначення точки  $N$ , тобто відкладання відрізка  $KN=a \cdot \operatorname{tg} \varphi$ ), реалізація яких виконується строфоїдографами Артоболевського [1].

— ( $\beta_{2.2}$ ) – сім'я кіл постійного радіусу  $r=a$  із змінним центром  $C(O, a \cdot \operatorname{tg} \varphi)$  – рис.4. Точка перетину кола з променем  $OA$  належить строфоїді (Бергер Е.Г. Авт.св.№190591, 1965 р.)

— ( $\beta_{2.3}$ ) – сім'я прямих  $DM$ , що проводяться паралельно  $Oy$  на змінній відстані  $ON$ , яка при довільному  $\varphi$  визначається за формулою  $ON=x(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) : (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) = a \cdot \cos 2\varphi$ ; Таким чином, побудова потребує відкладення подвійного кута  $2\varphi$ , значить до складу механізму повинен входити пристрій для подвоєння кута, наприклад, редуктор - рис.5 (Бергер Е.Г. Авт. св. №193735, 1967 р.).

Подвоєння кута можна виконувати також за допомогою ромбоїда  $OCBD$  (рис.6а); використання ромбоїда (замість редуктора) призводить до відповідної конструкції строфоїдографа за рис.6а (Бергер Е.Г., Табацков В.П., Діневич Г.Ю. Авт. св. №772898, 1980 р.).

Зауважимо, що в даному строфоїдографі фігура  $BCMD$  зберігає симетричність відносно діагоналі  $BM$  (значить і прямокутність кутів  $D$  і  $C$ ) при будь-якому положенні механізму.

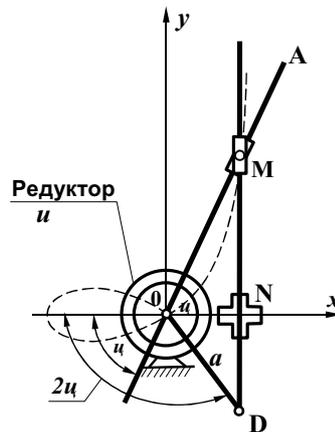


Рис.5

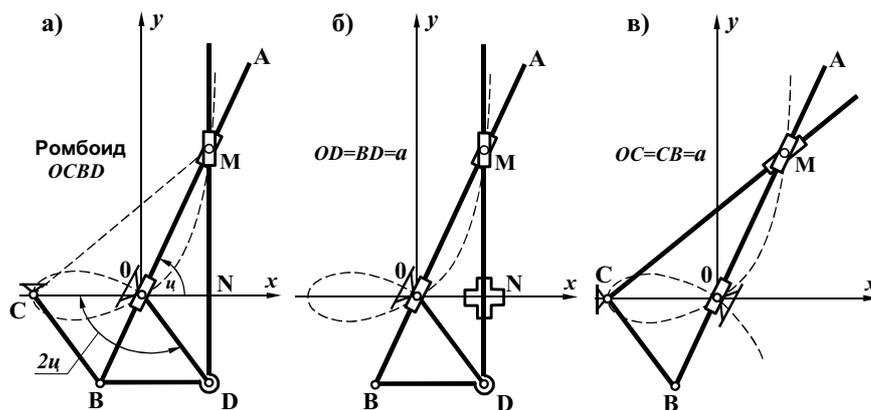


Рис.6

Звідси випливають дві модифікації цієї конструкції, наведені на рис.6 б,в. Першу одержано зміною ланки  $CB$  на хрестовий повзун  $N$ , який забезпечує плоскопаралельне переміщення важеля  $BMD$  (Бергер Е.Г. та ін. Авт. св. №628007, 1978 р.) – рис.6б. Другу схему одержано введенням замість важеля  $BDM$  прямокутного важеля  $BCM$  шарнірно встановленого у вершині  $C$  – рис.6в.

Як показують наведені приклади, розглянутий метод є досить ефективним засобом визначення схеми графічних побудов заданої кривої. такі задачі широко застосовуються в математиці (графіки функцій), в механіці (траєкторії руху тіл) і в теорії машин і механізмів (синтез напрямних механізмів).

В поєднанні з принципом механічної реалізації графічних побудов метод дає можливість одержувати різні кінематичні схеми напрямних механізмів, що дозволяє вибирати оптимальну за даними умовами роботи конструкцію.

При використанні високопродуктивних програм MATLAB, Maple та ін. геометрична модель метода, яка наведена в [3], дозволяє виконувати обчислення, візуалізацію та програмування в зручному середовищі для проектувальника [4].

Таким чином, метод відкриває додаткові перспективи в проектуванні напрямних механізмів як засобів автоматизації виробничих процесів.

It is presented the method of one-parametrical families and on this basis the synthesis of directing mechanisms (strophoid's graphs) is carry out.

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов для воспроизведения плоских кривых.-М.АН СССР, 1959.-255с.
2. Бергер Э.Г., Табацков В.П., Бергер Е.Э. Геометрия формообразования криволинейных профилей. //Вестник ХГТУ, №3(9), Херсон, 2000.-С.224-226.
3. БергерЭ.Г., Литвиненко Е.Н., Гучек П.Н. Геометрическая модель обобщенного метода образования кривых. // Сб. Математическое моделирование в образовании, науке и промышленности. С.-Пб., 2000. –с.31-34.
4. Потемкин В.В. Matlab 5.x Система инженерных и научных расчетов. М. Диалог, МИФИ. 1999.- 670с.

УДК 62-52:621.9.06

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ШВИДКОСТЯМИ РОБОЧИХ РУХІВ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХОНЬ

Водічев В.А.

Підвищення продуктивності металообробних верстатів при зменшенні їх питомого енергоспоживання є однією з актуальних проблем машинобудування. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є застосування на верстатах автоматизованих систем керування робочими рухами, які в умовах дії збурень забезпечують автоматичну зміну швидкостей цих рухів.

Системи стабілізації швидкості різання застосовуються на токарних і карусельних верстатах, а також плоскошліфувальних верстатах з круглим столом, і забезпечують поліпшення якості обробленої поверхні і підвищення продуктивності обробки [1]. Для таких систем розроблені структури, методи розрахунку параметрів регуляторів і схеми окремих елементів [1, 2]. Проте, системи стабілізації швидкості різання забезпечують компенсацію впливу на процес металообробки тільки одного збурення, яким є зміна діаметру обробки, застосування таких систем доцільно під час чистової обробки. При чорновій обробці торцевих поверхонь заготовок на показники ефективності процесу обробки впливає також інше збурення, яким є зміна глибини обробки. Дія цього збурення змушує зменшувати швидкість різання чи подачу так, щоб при максимальному значенні глибини обробки не було перевищено номінальне значення потужності приводу головного руху. В такому разі на ділянках заготовки з меншою глибиною різання у системі стабілізації швидкості різання зберігаються невикористані резерви підвищення продуктивності верстата.

Метою статті є розробка системи керування приводами головного руху і подачі токарного верстата, яка забезпечує компенсацію впливу на показники ефективності процесу обробки як зміни діаметру, так і зміни глибини обробки, дослідження динамічних характеристик системи і оцінка ефективності її застосування у порівнянні з обробкою на верстаті без системи керування швидкостями робочих рухів і з системою стабілізації швидкості різання і подачі.

Проведені розрахунки показали, що підвищення ефективності чорнової обробки торцевих поверхонь можна досягти, якщо при зміні діаметру обробки забезпечувати стабілізацію швидкості різання шляхом зміни частоти обертання заготовки, а при зміні глибини обробки стабілізувати потужність різання шляхом зміни величини подачі.

Для оцінки ефективності металообробки використано показники продуктивності і енергетичної ефективності [3]

$$J_{\text{п}} = \frac{QT}{T + t_{\text{зм}}},$$

$$J_{\text{е}} = \frac{Q}{P_z},$$

де  $Q$  – швидкість знімання металу,  $\text{мм}^3/\text{хв}$ .  $T$  – миттєва оцінка періоду стійкості інструменту,  $\text{хв}$ ;  $t_{\text{зм}}$  – тривалість зміни інструменту,  $\text{хв}$ ;  $P_z$  – потужність обробки,  $\text{кВт}$ .

Складові показників  $J_{\text{п}}$ ,  $J_{\text{е}}$  визначаються за формулами [1, 4]

$$Q = \pi D n S_o t_p = \pi D S t_p,$$

$$T = \left( \frac{C_v K_v}{V t_p^x S_o^y} \right)^{\frac{1}{m}},$$

$$P_z = \frac{C_p t_p^x S_o^y V^{(1+q)} K_p}{6 \cdot 10^3}, \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр обробки, мм;  $t_p$  – глибина різання, мм;  $S_o$  – подача, мм/об;  $S$  – швидкість подачі, мм/хв;  $V$  – швидкість різання м/хв,  $C_v, C_p, K_v, K_p, x_T, x, y_T, y, q$  – коефіцієнти і показники степеня, які залежать від виду і умов обробки, оброблюваного матеріалу заготовки і матеріалу робочої частини різця .

Частота обертання заготовки при стабілізації заданого значення швидкості різання  $V_3$  знаходиться із співвідношення

$$n = \frac{V_3 10^3}{\pi D},$$

Для стабілізації заданого значення потужності різання  $P_{z3}$  подача змінюється при зміні глибини обробки відповідно до формули

$$S_o = \left( \frac{P_{z3} \cdot 6 \cdot 10^3}{C_p t_p^x V_3^{1+q}} \right)^{\frac{1}{y}}. \quad (2)$$

Обмеження подачі відбувається максимально припустимим за умовою міцності інструменту значенням  $S_{o\max}$ .

Швидкість подачі

$$S = S_o n. \quad (3)$$

Для ілюстрації ефективності керування швидкостями робочих рухів при стабілізації швидкості і потужності різання розглянуто обробку на токарному верстаті торцевої поверхні заготовки з конструкційної сталі діаметром 400 мм різцем з твердосплавною пластинною Т15К6 товщиною 6 мм при зміні глибини обробки вздовж поверхні оброблюваної заготовки від 2 мм при діаметрі обробки 400 мм до 4 мм при діаметрі 40 мм. На розрахованих графіках (рис. 1) безперервні лінії відповідають обробці при стабілізації швидкості різання  $V_3=94$  м/хв, яка забезпечує величину періоду стійкості інструменту  $T=46$  хв при мінімальній глибині обробки  $t_p=2$  мм, максимальній подачі  $S_{o\max}=2,5$  мм/об і стабілізації потужності різання на рівні  $P_{z3}=10$  кВт. Штрихові лінії відповідають обробці при стабілізації максимальної подачі  $S_{o\max}$  і швидкості різання  $V_3=45,5$  м/хв, за якої забезпечується потужність різання  $P_{z3}=10$  кВт при максимальній глибині обробки  $t_p=4$  мм. Штрихпунктирні лінії відповідають обробці з незмінними значеннями максимальної подачі  $S_{o\max}$  і частоти обертання заготовки, яку обрано за умови отримання швидкості різання 45,5 м/хв при максимальному діаметрі обробки. При застосуванні системи стабілізації швидкості і потужності різання більша частина поверхні заготовки обробляється з більшою швидкістю подачі, що забезпечує зростання показника продуктивності обробки при максимальному діаметрі обробки майже в два рази у порівнянні з обробкою з постійними швидкостями робочих рухів і з системою стабілізації швидкості різання і подачі. Значення показника енергетичної ефективності при цьому зростає на 11%, хоча його значення при мінімальному діаметрі обробки є на 9 % нижчими, ніж при стабілізації швидкості різання і подачі.

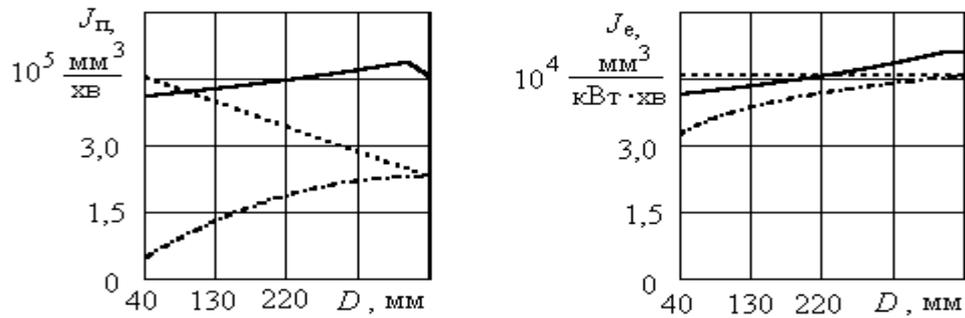


Рис. 1 Залежності показників ефективності від діаметру при чорновій обробці торцевої поверхні на токарному верстаті

Система (рис. 2), яка реалізує викладений вище принцип керування, містить два кола керування: стабілізації швидкості різання  $V$  і стабілізації потужності різання  $P_z$ . Перше з них містить блок ділення БД1 з обмежувачем вихідного сигналу, електропривод головного руху ЕПГ і датчик ДД діаметру обробки  $D$ . Принцип налаштування цього кола керування викладено у [2].

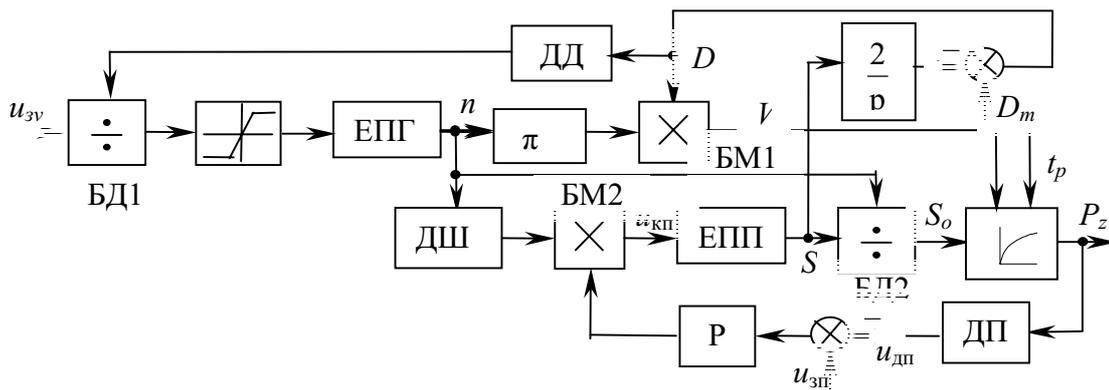


Рис. 2 Функціональна схема системи керування

Якщо система стабілізує подачу на оберт заготовки при зміні частоти її обертання, то сигнал задання  $u_{кп}$  швидкості електропривода подачі має бути пропорційним цій частоті, тому у системі керування він формується з сигналу датчика ДШ частоти обертання заготовки, а величина коефіцієнту передачі ДШ встановлюється згідно зі співвідношенням

$$K_{ш} = \frac{S_{o \max}}{K_{епп}},$$

де  $K_{епп}$  – коефіцієнт передачі електропривода подачі разом з передаточним механізмом.

Для стабілізації потужності обробки в умовах зміни її глибини зміна величини подачі може забезпечуватись шляхом відповідної зміни коефіцієнта передачі ланцюга задання швидкості подачі, для чого у цей ланцюг увімкнено блок множення БМ2. На другий вхід блока множення надходить сигнал налаштування, сформований інтегральним регулятором  $P$ , на вхід якого надходить різниця сигналів задання потужності різання  $u_{зп}$  і зво-

ротного зв'язку  $u_{дп}$  від датчика потужності ДП. Вихідний сигнал регулятора обмежується на одиничному рівні, що забезпечує обмеження подачі максимальним значенням  $S_{оmax}$  і її зменшення при перевищенні потужністю різання заданого значення. Блок БД2 і нелінійна ланка на схемі системи (рис.2) відтворюють залежності (1) і (3). Початку обробки відповідає максимальне значення діаметру  $D_m$ , яке зменшується в процесі обробки, що враховано у схемі за допомогою інтегратора, на вхід якого надходить сигнал швидкості подачі.

На структурній схемі (рис. 3) подано коло стабілізації потужності різання розглянутої системи керування. Електропривод подачі інструменту на схемі подано коливальною ланкою другого порядку зі сталою часу  $T_{еп}$  і коефіцієнтом демпфірування  $\xi$ , процес обробки і датчик потужності – аперіодичними ланками з коефіцієнтами передачі  $K_{п}$ ,  $K_{дп}$  і сталими часу  $T_{п}$  і  $T_{дп}$ . Для забезпечення стійкості системи на виході інтегратора зі сталою часу  $T_i$  увімкнено фільтр зі сталими часу  $T_1$  і  $T_2$ . У цій схемі два коефіцієнти передачі ланок є змінними. Зміна в процесі обробки коефіцієнта  $K_1=K_{ш}$  обумовлена дією системи стабілізації швидкості різання при зміні діаметру обробки. Зміна коефіцієнта передачі  $K_{п}$  відбувається під впливом зміни глибини обробки. Максимального значення змінна частина коефіцієнту передачі розімкнутої системи набуває при максимальній глибині обробки.

Питанням синтезу системи є визначення за умовою стійкості системи величини сталої часу  $T_i$ . Її попереднє визначення можна виконати спростивши структурну схему (рис. 3), приблизно вважаючи  $(T_1p+1) \approx (T_{пp}+1)(T_{дпp}+1)(T_2p+1)$ .

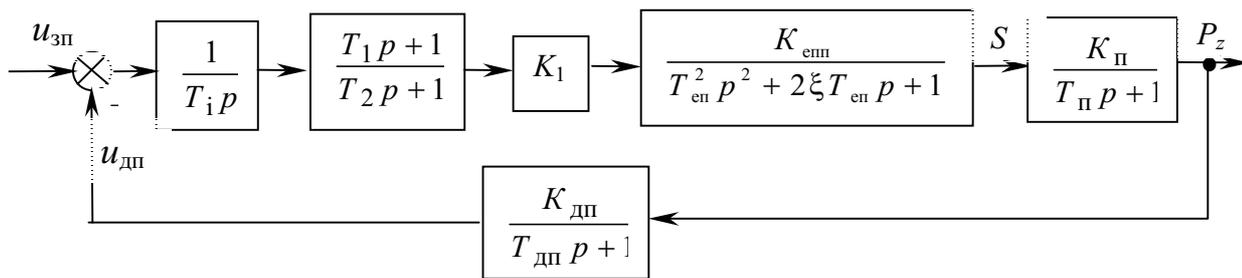


Рис. 3 Структурна схема кола стабілізації потужності різання

В такому разі умовою стійкості системи буде

$$T_i \geq K_{\Sigma} T_{еп} \quad (4)$$

де  $K_{\Sigma} = K_{епп} K_{дп} K_{ш} K_{пn}$  – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи.

За (4) сталою часу  $T_i$  необхідно визначити для максимального значення коефіцієнту  $K_{\Sigma}$ , яке відповідає максимальному значенню його змінної складової

$$K_{пn} = \frac{P_{z3}}{S_{оmin}}$$

де подача  $S_{оmin}$  має бути визначена за формулою (2) для максимально можливого значення глибини різання.

Для надання системі необхідного запасу стійкості доцільно зменшити значення сталої часу  $T_i$  відносно визначеного за (4). Для цього достатньо у середовищі Simulink набрати структурну схему системи (рис.3) і за допомогою програми LTI viewer отримати логарифмічні амплітудні і фазові частотні характеристики. Зменшуючи в структурній схемі значення  $T_i$ , одержати необхідні запаси стійкості за фазою і амплітудою. Ілюстрацією цьо-

го є отримані таким шляхом логарифмічні частотні характеристики системи стабілізації потужності різання (рис. 4), що відповідають умовам обробки, для яких виконано розрахунок показників ефективності обробки (рис.1).

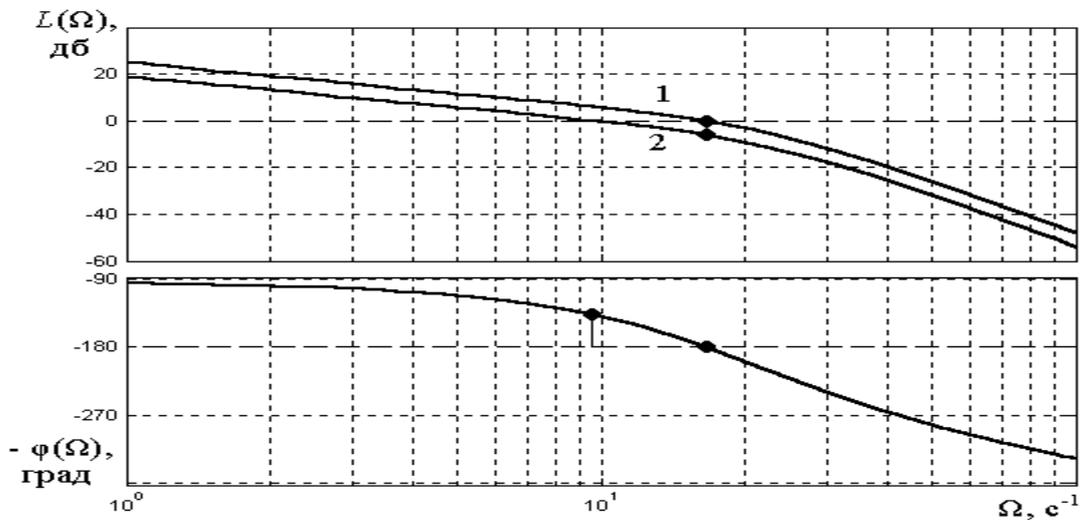


Рис. 4 Логарифмічні частотні характеристики системи стабілізації потужності різання

Амплітудо-частотна характеристика 1 відповідає сталій часу  $T_i = 0,25$  с, яка визначена за умовою (4) і забезпечує знаходження системи на межі стійкості, а характеристика 2 відповідає сталій часу  $T_i = 0,5$  с, за якої буде стійкою а запас по фазі складатиме  $45^\circ$ .

Дослідження системи стабілізації швидкості і потужності різання проведено на математичній моделі за допомогою пакету моделювання динамічних систем Simulink для вказаних вище умов обробки торцевої поверхні сталльної заготовки. Результати дослідження подано у вигляді графіків залежностей швидкості різання  $V$ , частоти обертання заготовки  $n$ , діаметру обробки  $D$ , швидкості подачі  $S$ , подачі  $S_o$ , глибини різання  $t_p$ , потужності різання  $P_z$  від часу  $t$  (рис. 5).

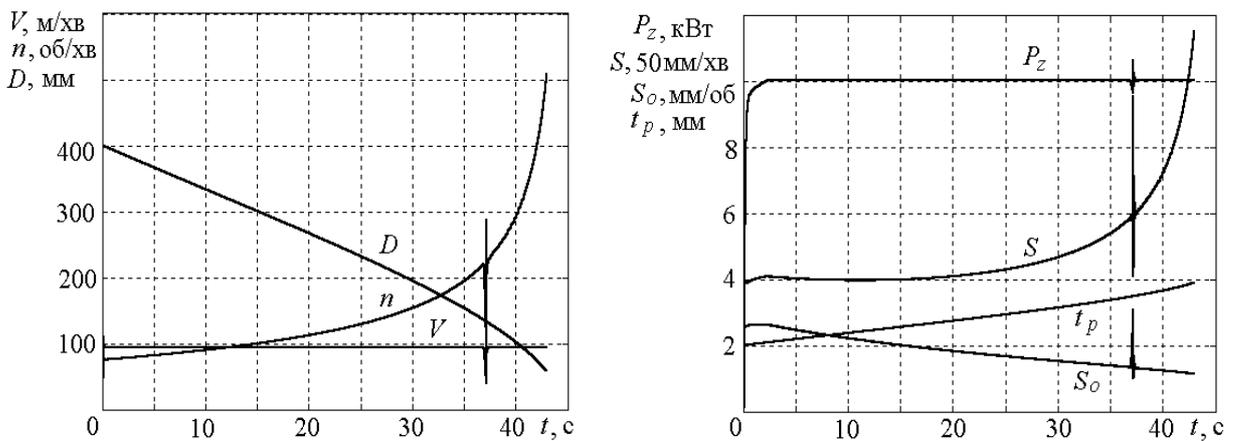


Рис. 5 Графіки процесів у системі при стабілізації швидкості і потужності різання

З графіків видно, що під час обробки в умовах зміни діаметру і глибини різання задані значення швидкості і потужності різання підтримуються без похибки. У момент часу  $t=37$  с здійснюється переключення ступенів коробки швидкостей у приводі головного ру-

ху, що застосовується для збільшення діапазону регулювання швидкості електропривода, у якому припустимим за нагріванням двигуна навантаженням є постійна потужність.

Отже, проведено дослідження розробленої системи стабілізації потужності обробки з взаємозв'язаним керуванням швидкостями електроприводів робочих рухів свідчить про її працездатність і ефективність її застосування на токарних верстатах під час обробки торцевих поверхонь заготовок із змінною величиною припуску. У порівнянні з системою зі стабілізацією швидкості різання і подачі запропонована система забезпечує більш високу продуктивність обробки, а на окремих ділянках заготовки - зменшення питомого енергоспоживання верстата.

The system of automatic control of feed and main motion drives of turning machine-tool, which stabilizes cutting speed and power, is considered. The results of mathematical modeling of the system are presented. The productivity and energetic efficiency of metal cutting process with application of the system are estimated.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Шапарев Н.К. Расчет автоматизированных электроприводов систем управления металлообработкой. – К.: Лыбидь, 1992. – 272 с.
2. Водічев В.А. Порівняльний аналіз систем стабілізації швидкості різання металообробних верстатів// Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2002. – Вып. 2 (18). – С. 136–140.
3. Водічев В.А. Керування швидкістю подачі верстата при багатокритеріальній оптимізації процесу силового шліфування// Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. збірник. – К.: Техніка, 2003. – Вип. 61. – С. 3-10.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2/ Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.

## ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ АСУТП ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Колесникова Е.В., Кострова Г.В.

### **Введение**

Периодический процесс выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) осуществляется в результате последовательного проведения операций: загрузки металлического лома и шлакообразующих компонентов, плавления шихты, окислительного и восстановительного периодов, рафинирования и корректировки состава металла перед выпуском. Принятие решений по управлению технологическим режимом процесса осуществляется, как правило, в условиях неопределенности не только из-за свойств объекта управления, но и ввиду отсутствия прогрессивных информационных технологий, позволяющих повысить эффективность управления ДСП за счет более полного учета доступной информации.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

При автоматизации процесса выделяют три взаимосвязанных режима ДСП: электрический, температурный и технологический [1]. Первый из них определяет изменение во времени потребляемой электрической мощности. Температурный режим характеризует изменение по ходу плавки температуры расплавленного металла, шлака и футеровки. Наибольшее число публикаций по автоматизации ДСП посвящено управлению электрическим и температурным режимами [1, 2]. Технологический режим ДСП определяет изменение состава металла и шлака в результате химических превращений и внесения шлакообразующих, легирующих или раскисляющих материалов. Реализация технологического режима, зависящая во многом от квалификации сталевара, автоматизирована в меньшей степени из-за сложности формализации признаков состояния ДСП и существенной неопределенности объекта управления. Планирование и нормирование затрат на производство продукции, при всей важности этих процессов, носят скорее оценочный характер из-за недостатков средств измерения или даже полного их отсутствия [3]. Как это имеет место в сталеплавильном производстве, где одним из основных инструментов измерения количества загружаемых в печь компонентов является единица массы: «лопата» [2]. А контроль качества ведения плавки осуществляется путем периодического измерения температуры металла в ванне с помощью разовых термопар с погрешностью до 70 °С из-за неоднородности ванны [2] и на основе анализа химического состава отобранных проб расплавленного металла. При этом результаты химического анализа поступают из лаборатории через 15-20 мин после отбора пробы металла.

В реальных условиях производства отсутствие системы учета и объективного контроля движения материальных потоков в процессе приводит к перерасходу и потерям до 20 % расходуемых материалов [4].

Поэтому система интеллектуальной поддержки принятия решений в составе АСУ ДСП должна включать в себя информационную составляющую, состоящую в общем случае из объектов двух классов [5, 6]. К первому классу следует отнести, собственно, информационные объекты — банки данных. Второй класс — включает расчетно-аналитические подсистемы, которые с использованием математических моделей позволяют получить информацию о состоянии объекта после осуществления соответствующих технологических операций [7].

**Целью** данной работы является разработка базы данных АСУТП ДСП, обеспечивающей информационную поддержку принятия решений и формирование паспорта плавки для дуговой сталеплавильной печи.

*Структура базы данных АСУТП дуговой сталеплавильной печи*

Принципиальная структура АСУТП ДСП приведена на рис. 1. В общем случае целевая функция управления процессом может быть определена уравнением

$$Y = Y\{m, X, S, U\} = \sum_{l=1}^r g_l \cdot P_l - \sum_{i=1}^s \left( E \cdot W_i + \sum_{j=1}^{n_s} q_{ij} Z_j \right) \quad (1)$$

с ограничениями по содержанию примесей для изготавливаемой марки стали

$$\Gamma = \left\{ \gamma_{k,\min} \leq \gamma_k \leq \gamma_{k,\max}, k = \overline{1, K} \right\}$$

где  $\gamma_k$  — содержание  $k$ -го элемента в стали;

$\gamma_{k,\min}$  и  $\gamma_{k,\max}$  — нижний и верхний пределы содержания  $k$ -го элемента в стали;

$m$  — масса металлической части шихты;

$X\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  — состав шихты;

$S\{s_1, s_2, \dots, s_t\}$  — множество технологических операций;

$U\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  — совокупность применяемых флюсов и ферросплавов;

$g_l$  — масса годного металла в  $l$ -ых отливках,  $l=1,2, \dots, r$ ;

$P_l$  — цена единицы массы металла в отливках;

$q_{ij}$  — масса  $j$ -го компонента, загруженного в печь на  $i$ -ой операции;

$Z_j$  — цена  $j$ -го компонента;

$W_i$  — расход электроэнергии на  $i$ -ой операции;

$E$  — стоимость электроэнергии.

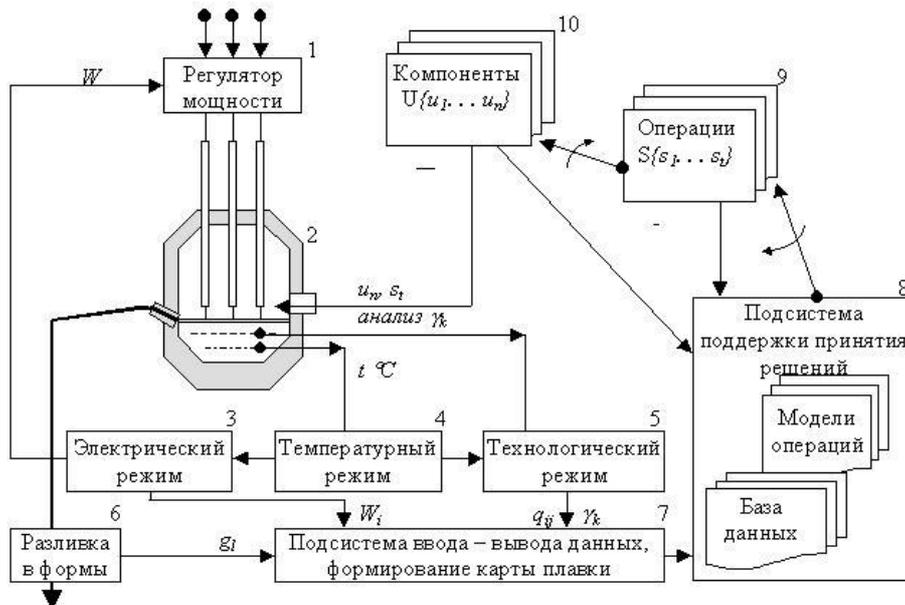


Рис.1 Структура АСУТП ДСП:

1 — регулятор подводимой мощности; 2 — ДСП; 3, 4, 5 — регламентные параметры электрического, температурного и технологического режимов; 6 — разливка металла; 7 — подсистема учета параметров плавки; 8 — программный комплекс поддержки принятия решений; 9, 10 — выбор операций и определение вида и количества флюсов, ферросплавов и шлакообразующих

Составляющие целевой функции (1) могут быть приняты по реальным данным либо определяются на основе математического моделирования (рис. 1). Состав металлического лома, заправочных материалов, флюсов и ферросплавов, а также состояние пода, стен и свода изменяются от плавки к плавке. В такой постановке в качестве управляющих воздействий процесса используются не только множество операций процесса  $S$ , изме-

няющих состояние равновесия системы «металл — шлак», но и качественные параметры  $U$  (наименования, номер партии) веществ, применяемых на отдельных стадиях процесса.

Назначение базы данных АСУТП ДСП состоит в информационной поддержке принятия решений по управлению процессом, регистрации принятых решений и учете расходных материалов и энергетических затрат на проведение процесса. Все параметры процесса, которые входят в целевую функцию (1) отражаются в паспорте плавки, что позволяет контролировать эффективность работы персонала и анализировать причины нарушений технологического режима.

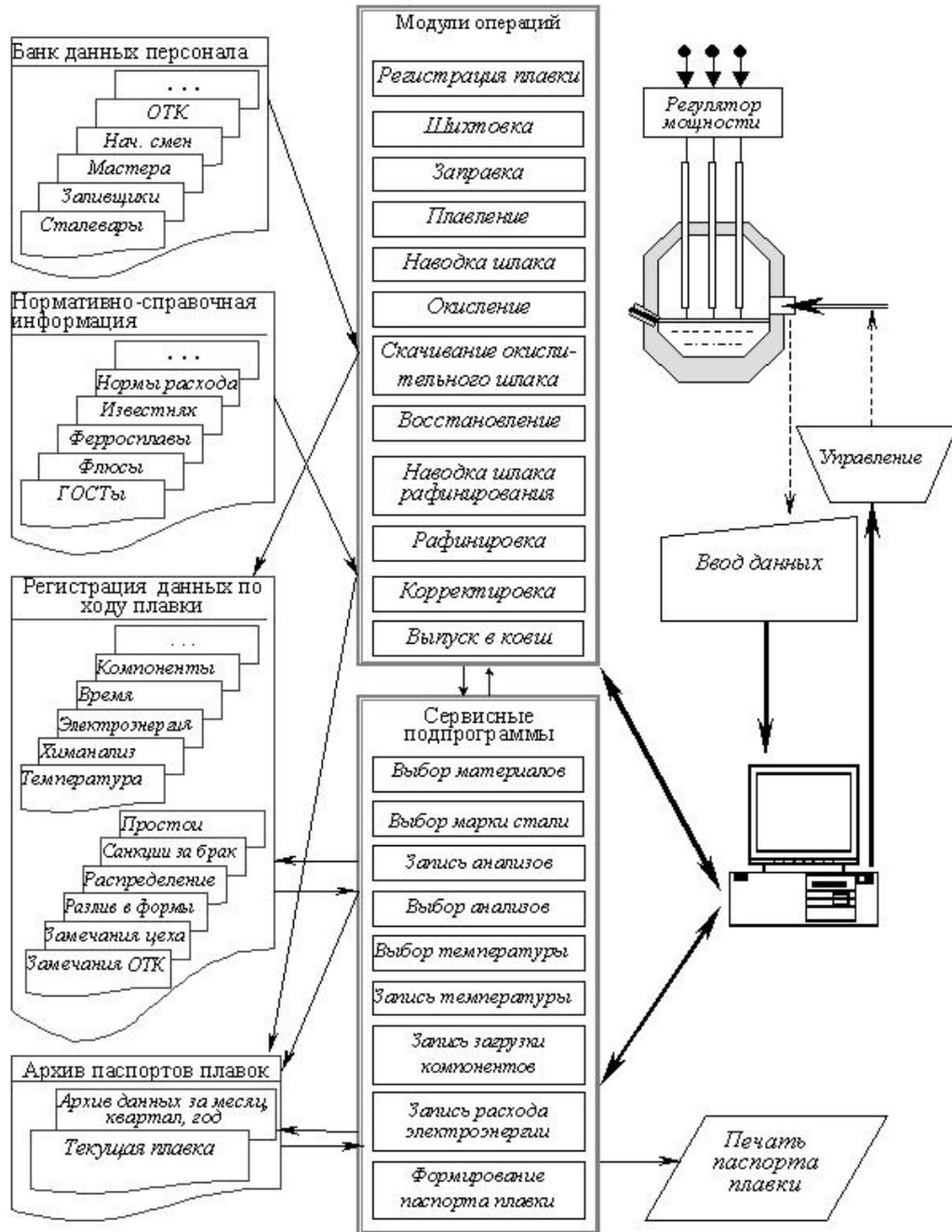


Рис. 2 Структура базы данных АСУТП ДСП

Система информационного и программного обеспечения интеллектуальной поддержки принятия решений в составе АСУТП ДСП приведена на рис. 2. В левой колонке представлены массивы хранимых и формируемых по ходу плавки данных. Программные модули и сервисные программы взаимодействуют с этими массивами данных. Кроме это-

го сервисные программы позволяют осуществить регистрацию реализованных решений и учет расходных материалов и энергетических затрат на проведение процесса.

Приведем краткую характеристику информационных массивов и назначение программной составляющей базы данных.

*Банк данных персонала* включает данные об исполнителях и лицах, ответственных за эффективность хода плавки процесса и конечные результаты работы: начальники смен, старшие мастера печного пролета, мастера смен, сталевары, ответственные за подготовку шихты, мастера заливки, старшие мастера заливочного пролета, заливщики, контролеры отдела технического контроля. Включение фамилий сталеваров, заливщиков, мастеров и др. в состав базы данных упрощает работу с системой поддержки принятия решений, так как это исключает необходимость ручного ввода этих данных с клавиатуры. Фамилии исполнителей и лиц, принимающих решение, выбираются из введенного заранее списка, что позволяет сокращать время общения с системой. Кроме этого, применение индексного подхода, когда вместо текстовой переменной используется, индекс соответствующей записи, позволяет существенно уменьшить объем хранимых данных.

*Нормативно-справочная информация* служит для информационного обеспечения процесса. Эти данные могут быть востребованы персоналом в качестве справочной информации. Предлагаемая функция базы данных является весьма важной в условиях реального производства, так как не всегда результаты входного контроля всех материалов, используемых в технологическом процессе, доводятся до сведения персонала печи. Например, входной контроль состава окатышей железорудных, выполненный химической лабораторией показал, что содержание оксидов железа (II) в них 2 %, оксидов железа (III) — 88 %. В то же время расходные коэффициенты для окатышей железорудных определены исходя из данных ТУ 14-9-385-97, в которых нормировано содержание оксидов железа (II) — не менее 1,9 % и оксидов железа (III) — не менее 86,5 %. Проведение процесса с учетом реальных составов используемых материалов позволит предотвратить их перерасход.

Вторая функция нормативно-справочного блока заключается в обеспечении исходными данными операционных модулей, полученных в результате декомпозиции процесса [7]. Выбор соответствующих материалов и их составов осуществляется сервисной подпрограммой. При этом также применяется индексный подход. В качестве ключевого поля используется уникальный номер или слово, соответствующее номеру партии сырья. Такое построение базы данных позволяет учесть отличие в качестве исходных материалов разных партий поставки, а также материалов, поставляемых разными производителями.

*Регистрация данных по ходу плавки* позволяет осуществить текущий учет характеристик процесса: изменение температуры на каждой стадии процесса, результаты химических анализов о составе металла в ванне; длительности операций процесса; расход электроэнергии; вид, типы и количество шлакообразующих, легирующих и раскисляющих материалов, загружаемых в ДСП; время выполнения всех операций. Кроме указанных данных учету подлежат данные о разливке металла в формы, характеристика брака, а также согласованное с персоналом печи распределение результата между бригадами. Включение последней функции в базу данных обусловлено тем, что завершение процесса выплавки стали не всегда совпадает с окончанием производственной смены. Поэтому имеют место случаи, когда плавку начинает одна производственная смена, а завершает другая. В базе данных выполняется учет простоев с указанием причин остановки процесса. Фиксируются также замечания службы отдела технического контроля (ОТК) и руководства смены, цеха.

Организация массивов данных для текущего учета характеристик процесса основана на реализации реляционных связей типа “один ко многим” разных сущностей. При этом в качестве связующего элемента разных таблиц данных используется поле: “номер плавки”. Такой подход позволяет в дальнейшем сформировать отчет — паспорт плавки, в котором в подчиненных отчетах отражается множество данных о некоторой сущности объекта управления. Такими сущностями являются: температура, данные химических анализов о составе металла по ходу плавки, расход электроэнергии и др.

Эффективность использования блока регистрации данных зависит, прежде всего, от достоверности введенных данных. На первом этапе предполагается ручной ввод данных, что определяет существенное влияние человеческого фактора — ошибки ввода данных, искажение информации, ввод “регламентных” параметров, которые отличаются от реальных. Улучшение компьютерной системы поддержки принятия решений должно идти в направлении автоматизации операций сбора информации, необходимой для управления ДСП. Первоочередной задачей является автоматизация взвешивания шихты и других материалов с передачей результатов в базу данных. Технически реализуема задача автоматического учета активной и реактивной мощности трансформатора ДСП по ходу плавки. При организации компьютерной сети значительно сократится время передачи результатов анализов из химической лаборатории. Более того, при переходе к спектральным методам анализа, возможно сокращение и самого времени анализа. Наиболее сложной задачей является автоматическое измерение температуры в ванне печи.

*Архив паспортов плавки* представляет собой банк данных о проведенных плавках (карт плавки): всего загружено металлической шихты, получено годного металла, угар, разлито в формы, брак, недолив, слив, удельный расход электроэнергии, шлакообразующих, легирующих, раскисляющих материалов и ферросплавов, учет разливки металла по количеству и номенклатуре, отображение хода плавки по параметрам: температура, состав металла, расход электроэнергии по операциям и др. Для ускорения работы базы данных архив паспортов плавки рационально разделить на, собственно, архив и рабочий массив данных по текущей плавке. Данные о текущей плавке автоматически переписываются в архив при регистрации новой плавки.

Сервисная подпрограмма формирования документа (отчета) — паспорта плавки позволяет сформировать электронный документ и вывести его на печать. Паспорт плавки в виде электронной версии становится доступным для пользователей корпоративной сети предприятия.

*Модули операций* представляют собой алгоритмы и модели отдельных стадий процесса [7]. Применение модулей операций составляет основу интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению ДСП, что позволяет получить дополнительную информацию о состоянии объекта после осуществления соответствующих технологических операций. При этом моделируется равновесие в ванне печи с определением распределения компонентов системы между расплавленным металлом и шлаком. Определяется температурный режим процесса, как функция времени проведения операции. На основе расчетов материального баланса отдельных стадий процесса рассчитывается количество и схема подачи ингредиентов в зону плавки для выбранного материала. Расчет количества шлакообразующих, легирующих или раскисляющих компонентов на каждой операции на основе математического описания системы «шлак — металл» и учет фактически загруженных в ванну материалов. Результаты опережающего “прогнозирования” распространяются только на одну операцию, поэтому погрешности моделирования, связанные с неопределенностью параметров объекта мало сказываются на конечных результатах, так как в ходе плавки после каждой технологической операции расчетные концентрации примесей в металле уточняются по реальным данным химического анализа.

*Сервисные подпрограммы* базы данных выполняют операции выбора, пересылки и записи информации в таблицы хранимых данных.

Техническая реализация предложенной базы данных выполнена в среде СУБД ACCESS, которая предполагает возможность использования программных расчетных модулей. Выбор СУБД ACCESS продиктован еще и тем, что она позволяет за счет применения стандартных системных функций организовать передачу в базу данных информации (масса, температура, химический состав металла, показания счетчиков затрат электроэнергии и пр.) от разнообразных внешних устройств.

### Выводы

Функционирование разработанной базы данных в режиме советчика с обеспечением информационных и учетных функций, а также интеллектуальная поддержка в форме предварительной оценки результатов проведения технологических операций позволит сталевару-оператору принимать обоснованные решения при управлении технологическим режимом ДСП. Отличительной особенностью предлагаемой базы данных является интеллектуальная составляющая, включающая применение моделей отдельных операций процесса для получения дополнительной информации о поведении объекта.

The data base of an automatic control system of the technological process melt of steel in arc steelmaking furnaces ensuring information support of a decision makings and forming the passport carried out melting is considered in the work.

1. АСУТП плавильных установок специальной электрометаллургии / В.С. Богушевский, Г.Г. Грабовский, Д.Ф. Чернега и др. – Одесса: Астропринт, 2000. – 192 с.
2. О построении автоматизированных систем управления технологическими процессами в металлургии / А.В. Старосоцкий, С.А. Храпко, В.Г. Скрыбин и др. // Автоматизация в промышленности. – 2003 – № 6. – С. 32 – 35
3. Храпко С.А. Оптимизация режима ведения плавки стали в дуговой сталеплавильной печи по прибыли предприятия // Современная электрометаллургия.– 2003. – № 2 (71). – С. 37 – 40.
4. Лубашев Ю.А., Благий С.В. Методы построения систем учета и управления материально-энергетическими потоками на примере металлургического предприятия // Автоматизация в промышленности. — 2003. – № 6. – С. 36 – 39.
5. Станковский Д.П. Построение эффективных промышленных АСУТП по принципу детского конструктора // Автоматизация в промышленности. – 2003 – № 3. – С. 14 – 16.
6. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // I, II. Известия РАН. М.: Теория и системы управления. – 2001. – № 1 – 2. – С. 5 – 22.
7. Кострова Г.В., Колесникова Е.В. Гогунский Е.Д. Операционная декомпозиция модели выплавки стали в электродуговых печах // Труды Одес. политехн. ун-та. – Вып. 2(20) – 2003. – С. 113 – 116.

## ТРЕХКОНТУРНАЯ АСУ НАНЕСЕНИЕМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Тонконогий В.М.

### **Введение**

В современном машиностроительном производстве возрастание производительности труда реализуется за счет резкого повышения скоростей резания и требований к служебным свойствам применяемого инструмента. Одним из путей повышения характеристик используемых инструментов является нанесение на их рабочие поверхности износостойких покрытий со специальными свойствами [1]. Мировая практика показывает, что для эффективного использования режущего инструмента не менее 80 % его объема должно выпускаться с различными износостойкими покрытиями, которые позволяют резко повысить ресурс инструмента и обеспечить высокое качество изготавливаемых деталей. Одним из наиболее прогрессивных и универсальных методов нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент является метод конденсации вещества в вакууме из плазменной фазы с ионной бомбардировкой – метод КИБ, разработанный в Украине в 1975 году [2].

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Метод КИБ, являясь одним из наиболее эффективных методов повышения работоспособности режущих инструментов, характеризуется и достаточно неэффективным управлением, что приводит к значительному количеству брака при нанесении покрытия. Это обусловлено, в первую очередь, отсутствием достоверных результатов идентификации параметров технологии, выполненной специально для потребностей управления, адекватных математических моделей отдельных технологических процессов, входящих в технологию КИБ, достоверных сведений о глубинных взаимосвязях между отдельными физическими явлениями, определяющими, в конечном итоге, качество готовой продукции [3]. Многофакторность технологии КИБ порождает значительные проблемы при моделировании, а попытки ее декомпозиции на отдельные технологические процессы зачастую создают недопустимую нагрузку на ресурсные и временные параметры системы управления. Проблема усложняется тем, что основные параметры режущего инструмента с ионно-плазменным покрытием невозможно контролировать в процессе нанесения последнего, что делает систему управления такой технологией практически разомкнутой. Такая ситуация приводит к тому, что в реальном производстве в управлении технологией КИБ слишком большую роль играет человеческий фактор со всеми вытекающими отсюда недостатками [4].

Поэтому была поставлена задача повышения качества режущего инструмента и эффективности его производства путем разработки и внедрения автоматизированной системы управления технологией нанесения ионно-плазменных покрытий.

### **Построение АСУ технологией КИБ**

При нанесении покрытий на быстрорежущий инструмент или другие виды изделий, служебные свойства которых ограничивают их нагрев, возможность варьирования технологических параметров синтеза ограничивается необходимостью поддержания узкого диапазона температур нагревания подложки при ионной очистке и осаждении покрытий (500 – 550 °С для быстрорежущей стали). Такое условие обеспечивает, с одной стороны, надежное сцепление покрытия с подложкой, а с другой, – предохраняет ее от термического разупрочнения. Исходя из этого, технологический процесс нанесения износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент рекомендуется осуществлять в условиях, которые предусматривают необходимость поддержания оптимальной температуры на протяжении всего технологического цикла.

Исследованиями влияния температуры подложки при ионной очистке (бомбардировке) и в начале осаждения на среднюю стойкость твердосплавных пластин с покрытием показано, что максимальной стойкости отвечает температура приблизительно  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах наблюдается тенденция к отслаиванию покрытия, а при температуре выше оптимальной ( $1000 - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) существует тенденция к охрупчиванию и разрушению покрытия. Эти эксперименты показывают, что нагрев подложки до температуры приблизительно  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  не приводит к десорбции (повторному испарению) на потенциальных «буграх» рельефа, которые мигрируют по поверхности атомов, на начальном этапе формирования пленки.

Оптимальные температурные условия нанесения покрытий на быстрорежущий инструмент представлены на рис. 1 [5]. На этапе I ионной очистки и термоактивации поверхности подложки важнейшими параметрами процесса являются температура и время достижения этой температуры. Температура ограничена значениями  $540 - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а время очистки и термоактивации принимают в пределах  $5 - 10$  мин, что обусловлено, с одной стороны, необходимостью обеспечения качественной очистки, а с другой, – необходимостью сохранения радиусов округления режущих кромок.

На этапе II – осаждение покрытия – оптимальными являются условия поддержания температуры подложки на уровне  $525 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре обеспечивается формирование покрытия с наилучшей структурой.

На этапе III – охлаждение инструмента с покрытием производят в камере установки «Булат» до температуры  $150 - 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что предотвращает окисление.

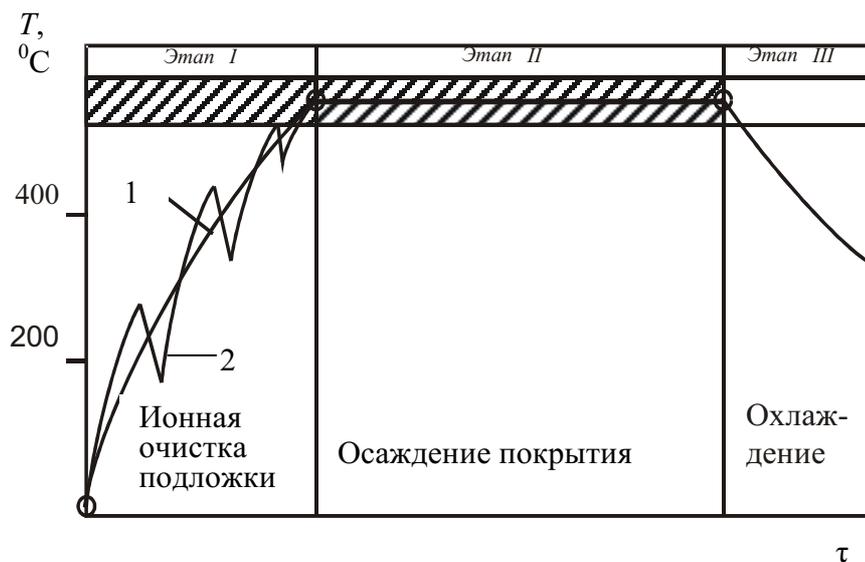


Рис. 1 Оптимальные температурные условия нанесения покрытий на быстрорежущий инструмент методом КИБ: 1 – непрерывный нагрев; 2 – циклический нагрев

Тепловыми условиями осаждения и формирования износостойкого покрытия можно управлять такими способами: изменением величины напряжения на подложке и силы тока в цепи испарителя; кратковременным подключением высокого напряжения или отключением испарителя; подогревом (охлаждением) с помощью дополнительных источников тепла (охлаждения); применением технологической оснастки для крепления инструмента с низкой (высокой) теплоемкостью.

Охлаждение инструмента является завершающим этапом технологического цикла. Оно осуществляется в камере установки до температуры  $150 - 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после чего камера открывается, и инструмент остывает на воздухе.

Наиболее сложноуправляемым фактором, который зависит от большинства режимных параметров технологического цикла, а также массы и габаритных размеров инстру-

ментов, средств их крепления в рабочих приспособлениях и перемещения относительно испарителя, является температура подложки, как на этапе ионной очистки, так и в процессе нанесения покрытия.

Рассмотрим схему взаимодействия основных учитываемых параметров, составляющих главную ветвь жизненного цикла режущего инструмента с покрытием (рис. 2). Эти параметры сгруппированы по функциональному назначению: вектор параметров управления  $U$ , вектор параметров качества инструмента  $K$ , оцениваемых до начала эксплуатации (не связанных с процессом резания), и генеральную целевую функцию жизненного цикла инструмента  $\Pi$ . На рис. 1 также обозначены «прямые» переходные функции жизненного цикла  $K = f_1(U)$  и  $\Pi = f_2(K)$  и «обратные» переходные функции управления, соответственно,  $U = f_1^{-1}(K)$  и  $K = f_2^{-1}(\Pi)$ .

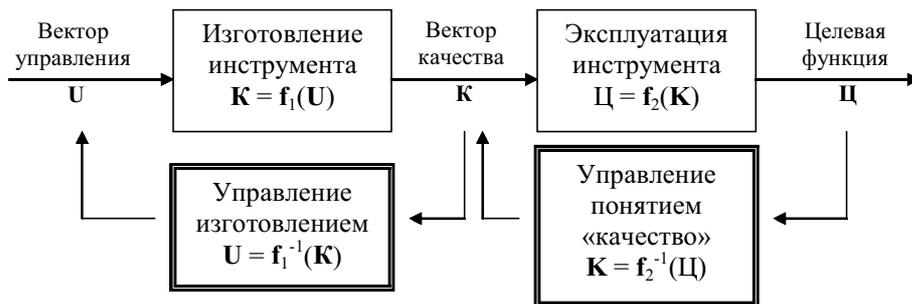


Рис. 2 Схема взаимодействия основных учитываемых параметров, составляющих главную ветвь жизненного цикла режущего инструмента

Как следует из анализа опыта изготовления и эксплуатации режущего инструмента с вакуумным ионно-плазменным покрытием, к вектору управления  $U = \{U_d, U_{под}, M, \tau_n\}$  можно отнести следующие параметры [5]:

$U_d(\tau)$  – напряжение на испарителе;

$U_{под}(\tau)$  – напряжение на подложке;

$M(\tau)$  – массовый расход газа реагента;

$\tau_n$  – продолжительность непосредственно процесса нанесения покрытия;

к вектору качества  $K = \{\delta, H_M, D, \sigma_{сц}\}$  – параметры:

$\delta$  – толщина покрытия;

$H_M$  – твердость покрытия;

$D$  – дефектность покрытия;

$\sigma_{сц}$  – прочность сцепления покрытия с подложкой.

Наконец, генеральная целевая функция жизненного цикла инструмента  $\Pi$  представляет собой показатель его надежности – наработку на отказ.

Стратегия управления, исходящая из реального разбиения жизненного цикла инструмента на два периода: изготовление и эксплуатацию, заключается в том, что попадание параметров вектора  $K$  в некий «параллелограмм качества» в пространстве его состояний должно гарантировать приемлемое значение целевой функции  $\Pi$ .

Для построения АСУ изготовлением инструмента с ионно-плазменным покрытием необходимо было установить зависимости  $K = f_1(U)$ ,  $\Pi = f_2(K)$ ,  $U = f_1^{-1}(K)$  и  $K = f_2^{-1}(\Pi)$ . Однако экспериментальная идентификация этих зависимостей крайне затруднена наличием многих внешних возмущающих процесс факторов, а эффективное замкнутое управление с их помощью невозможно из-за того, что информация о параметрах качества  $K$  становится доступной только после завершения всех процессов нанесения и разгерметизации камеры.

Поэтому к технологии КИБ был применен метод декомпозиции – композиции [6], который позволил, с учетом объединенного технологического процесса (ОТП), содержащегося в технологии, выявить в зависимости  $K = f_1(U)$  дополнительный «внутренний»

вектор параметров процесса  $V = \{T, P\}$ , состоящий из следующих компонентов:

- $T(\tau)$  – температура подложки;
- $P(\tau)$  – давление в вакуумной камере,

а в зависимости  $\Pi = f_2(K)$  – дополнительный «внутренний» вектор параметров процесса  $E = \{D, \Delta I_{я}\}$ , состоящий из следующих компонентов:

- $D$  – дефектность покрытия;
- $\Delta I_{я}$  – изменение тока якоря двигателя привода станка, являющееся косвенной характеристикой износа инструмента.

Важной, решающей отличительной особенностью параметров  $V$  является то, что они доступны измерению и изменению на протяжении всего технологического процесса нанесения покрытия, а параметров  $E$  – измерению на протяжении всего периода эксплуатации инструмента, что позволило, в свою очередь, организовать управление жизненным циклом инструмента с покрытием по схеме, представленной на рис. 3.

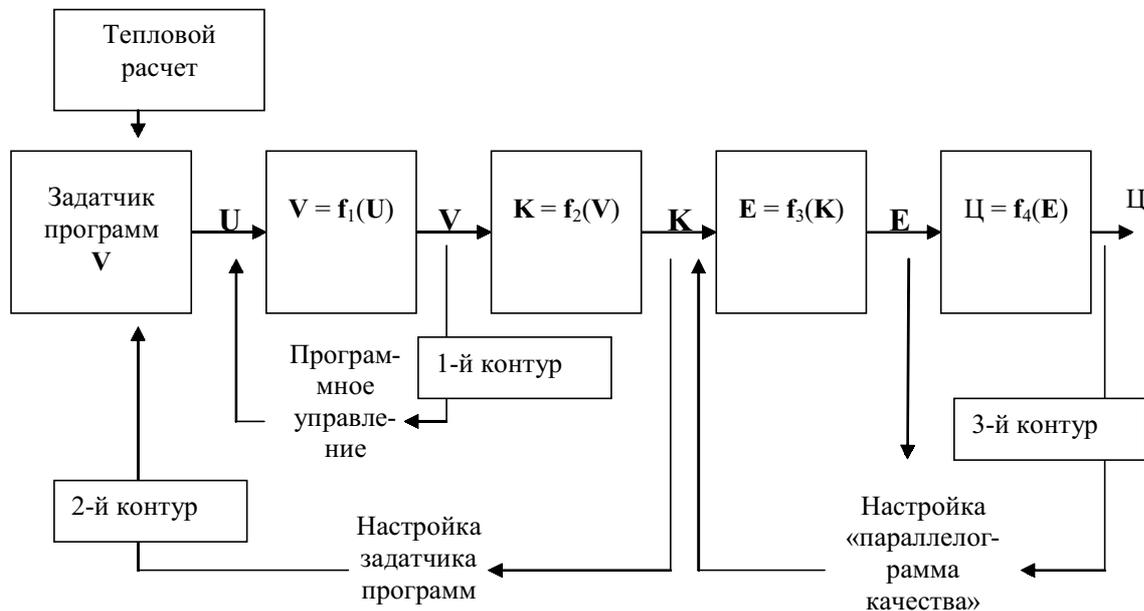


Рис. 3 Схема трехконтурного управления жизненным циклом режущего инструмента с вакуумным ионно-плазменным покрытием

Такая схема позволяет сочетать в себе преимущества оптимального (в смысле конечного результата) [7] и гарантийного (в смысле «попадания» в параллелограмм качества) [8] управлений.

На рисунке показаны три контура управления. Первый из них реализует программное управление параметрами вектора  $V = \{T, P\}$  с помощью параметров вектора  $U = \{U_{д}, U_{под}, M, \tau_{н}\}$ .

Второй осуществляет настройку задатчика программ первого контура таким образом, чтобы вектор качества  $K = \{\delta, H_{м}, D, \sigma_{сц}\}$  оказывался в конце каждого цикла процесса в пределах параллелограмма качества. И, наконец, третий осуществляет коррекцию параллелограмма качества таким образом, чтобы соответствующий ему инструмент проявлял в дальнейшем эксплуатационные свойства, характеризуемые вектором  $E$ , гарантирующие в конкретных условиях эксплуатации заданные параметры надежности  $\Pi$ .

Поскольку в первом контуре осуществляется автоматическое регулирование по отклонению, выполнена идентификация моделей второго контура (идентификация моделей процесса нанесения) и третьего контура (идентификация моделей процессов эксплуатации).

### Выводы

Построенная по описанному принципу трехконтурная система управления процессом нанесения ионно-плазменных износостойких покрытий позволила значительно сократить количество брака, причем наиболее опасный брак по превышению заданной температуры, который приводит к выходу из строя не только покрытия, но и инструмента в целом, удалось свести практически к нулю. Опыт эксплуатации разработанной АСУ в фирме «Викта» (г. Одесса) показал ее эффективность не только при нанесении покрытий на различные виды режущих инструментов, но и при нанесении декоративных покрытий, когда целевой функцией в третьем контуре является не наработка на отказ, а стабильность цветовой гаммы покрытия.

In work the three-circuit ACS by drawing of an ionic - plasma covering on cutting tool which includes the first contour - automatic program management in intermediate parameters of the process, the second contour - management of the program of the first contour, and the third - management of a parallelogram of quality is considered according to process of operation of the tool.

1. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні / А.І. Грабченко, М.В. Везезуб, Ю.М. Внуков та ін. // Житомир: ЖДТУ, 2003. – 451 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 335 с.
3. Тонконогий В.М. Управління процесом нанесення зносостійких тонкоплівкових покриттів на різальний інструмент // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2003. – Вип. 2(26). – Т. 2. – С. 179 – 183.
4. Тонконогий В.М., Савельєва О.С. Автоматизація управління технологією нанесення іонно-плазмових покриттів на різальний інструмент // Збірник наукових праць НТУ «ХП» «Високі технології в машинобудуванні». – 2004. – № 1. – С. 162 – 167.
5. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков, А.А. Марков, Л.В. Лаврова и др. – К.: Техника, 1992. – 143 с.
6. Тонконогий В.М. Управление объединенными технологическими процессами // Труды Одесского политехнического университета. – 2004. – Вып. 1(21). – С. 96 – 101.
7. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
8. Хобін В.А. Системи гарантуючого управління технологічними агрегатами: основи теорії, практика застосування. – Автореферат дис. докт. техн. наук: 05.13.07. – Одеса: ОНПУ, 2003. – 38 с.

УДК 62-52

РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ  
ОБЪЕКТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

Хобин В.А.

В условиях возрастания требований к точности соблюдения режимными переменными объектов управления (ОУ) установленных регламентов и роста потерь при их нарушениях, задача совершенствования алгоритмов регулирования сохраняет свою актуальность и остается в числе традиционных задач теории автоматического управления. Вместе с тем, как показывает практика, когда в качестве объектов управления выступают технологические агрегаты (процессы) (ТА ТП), то разработчики систем автоматического регулирования (САР), в подавляющем большинстве случаев используют простейшие ПИ-, ПИД-алгоритмы регулирования. Это обстоятельство может быть объяснено следующими двумя взаимообусловленными факторами.

Во-первых, ТА как ОУ имеют специфические особенности по сравнению с такими объектами, как манипуляторы, электропривод, усилители, транспортные (мобильные) средства. Основные из них: а) физическая распределенность каналов управления ТА, проявляющаяся в значительных запаздываниях реакции управляемых переменных на управляющие воздействия; б) большое количество факторов весьма существенно влияющих на работу ТА, но практически недоступных для измерения (характеристики сырьевых и энергетических потоков, состояние рабочих органов и активных зон ТА), проявляющихся как неконтролируемые возмущения (координатные, параметрические), и изменяющие значения управляемых переменных, свойства каналов управления, оптимальные режимы работы ТА; в) критерий (функционал) оптимальности управления не включает в себя составляющих, штрафующих скорости изменения управляющих воздействий, т.е. он не имеет вида критерия «обобщенной работы». Эти особенности ОУ технологического типа делают совершенно неоправданными как «копирование» самих алгоритмов регулирования, разработанных для других типов объектов, так и методов разработки этих алгоритмов.

Во-вторых, для ПИД-регуляторов, используемых в САР, для объектов технологического типа имеется инфраструктура инженерной поддержки их применения. Она включает в себя типовые модели динамики каналов регулирования, упрощенные процедуры параметрической идентификации этих типовых моделей, типовые методики расчета настроечных параметров регуляторов или их начальных приближений, типовые аппаратные и программные средства, реализующие эти алгоритмы [1]. Эта инфраструктура сложилась, эволюционируя в ходе практического применения всех ее компонентов. Это гарантирует работоспособность разработанных типовых САР на этапе их внедрения.

ПИД-алгоритм регулирования (регулятор) можно рассматривать как базовый для построения САР объектами технологического типа. То есть такой регулятор, который: а) представляет собой целостный алгоритмический модуль, который может использоваться как регулятор локальной САР технологическим контуром, или в качестве составляющей более сложного алгоритма; б) имеющий фиксированную (закрытую для изменений) структуру, и позволяющий пользователю производить только его параметрическую настройку; в) сопровождаемый инженерными методиками квазиоптимальной настройки; г) имеющий техническую поддержку в форме доступного для применения аппаратного и (или) программного обеспечения, реализующего алгоритм.

Очевидно, что сколько-нибудь широкое применение вместо базового ПИД-алгоритма, новых, более эффективных алгоритмов, возможно только тогда, когда они смогут претендовать на роль базовых.

Сформулируем основные требования, которым должен отвечать регулятор, пре-

тендующий стать альтернативой ПИД-регулятору [2, 3]: а) эффективная (т.е. с высокой динамической точностью и низкой интенсивностью случайных выбросов этой переменной за установленный уровень) стабилизация регулируемых переменных ОУ в окрестности заданного значения; б) быстрый и без значительных перерегулирований перевод регулируемых переменных от значений, которые отвечают режиму холостого хода ОУ, к их значениям, которые отвечают номинальному режиму; в) сохранение перечисленных выше свойств САР при значительных вариациях характеристик ОУ и внешних действий, в том числе при их значительной априорной неопределенности (робастность); г) простота настройки алгоритма для пользователя, в частности его перенастройки при использовании в составе адаптивных САР.

Разработку таких алгоритмов необходимо вести отказавшись от формальных (аналитических) методов синтеза, в частности использующих методы аналитического конструирования регуляторов [4]. Это обусловлено тем, что для нестационарных нелинейных систем с запаздыванием в замкнутом контуре, получить выражение в явном виде аналитического решения системы уравнений, описывающее САР без специальных упрощений, в том числе – статистической линеаризации нелинейности, разложения трансцендентных передаточных функций запаздывания в ряд Паде и т.д., невозможно. Но и с этими упрощениями полученные выражения весьма сложны, что делает их непосредственный анализ практически невозможным.

Конструктивным для объектов технологического типа является эвристический подход, основанный на опыте, накопленном разработчиками САР, углубленных исследованиях уже апробированных на практике алгоритмов, их совершенствования, объединения в целостные альтернативные варианты алгоритмов с последующей их параметрической оптимизацией и сравнительными исследованиями в различных условиях в ходе специально организованных машинных экспериментов. В качестве таких алгоритмов использовались: а) базовый ПИД-алгоритм регулирования; б) алгоритмы коммутации структуры регулятора, в частности коммутации его настроечных параметров; в) алгоритмы прогнозирования свободного движения САР в замкнутом контуре на время запаздывания вперед; г) алгоритмы «безударного» замыкания и размыкания контура регулирования. В соответствии с таким подходом, после предшествующих исследований структура регулятора (алгоритма регулирования), как претендующего на альтернативу ПИД-регулятору, изображена на рис. 1.

Функционально регулятор можно представить состоящим из пяти модулей: задания (МЗД), динамической зоны нечувствительности (МДЗН), основного алгоритмического (МОА), прогнозирования движения ОУ под воздействием управления (МПР), формирования управляющих воздействий (МФУВ) для управления исполнительными механизмами двух принципиально разных типов – ПИМ - пропорциональным исполнительным механизмом и ИИМПС - интегрирующим исполнительным механизмом постоянной скорости (через ШИМ - широтноимпульсный модулятор). Регулятор является регулятором переменной структуры и включает в себя пять ( $\psi$ -ячеек (коммутаторов сигналов).

Отметим, что системы с переменной структурой возникли как средство эффективного управления движением мобильными объектами по заданной траектории [5]. Эффективность обеспечивало специфическое свойство скользящих режимов, при которых достигался высокий уровень инвариантности траектории движения относительно параметров объекта. Попытки использовать это свойство при управлении технологическими объектами, включая разработку и производство специальных регуляторов [6] успеха не имели. Причина этого, как уже отмечалось – принципиальное отличие свойств мобильных и технологических объектов, как ОУ и сред (условий), в которых они функционируют, близость наиболее эффективных режимов работы объекта к предельно-допустимым, нарушения которых приводит к возникновению аварийных ситуаций. Вместе с тем идея коммутации структуры регулятора может быть достаточно плодотворна вне зависимости от реализации скользящих режимов.

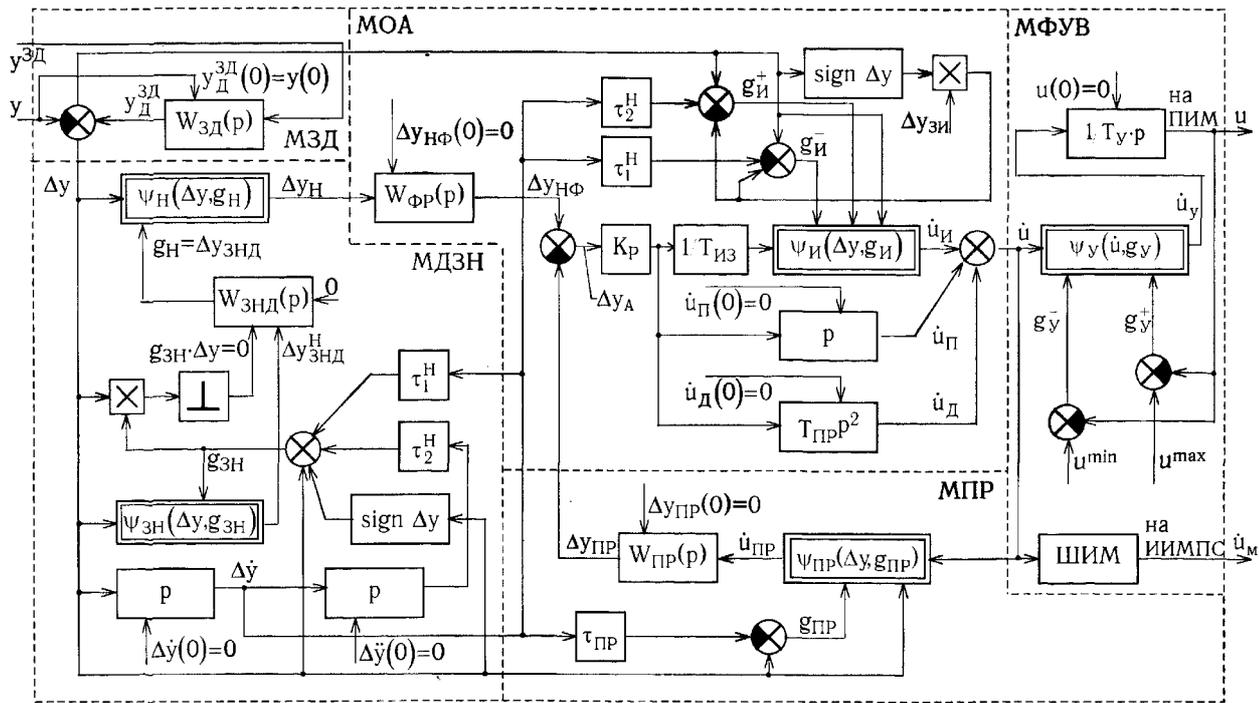


Рис. 1 Структурная схема базового регулятора переменной структуры (РПС)

Модули РПС описываются следующими системами уравнений.

1. Модуль задания (МЗД):

$$\begin{cases} \Delta y(t) = y(t) - y_d^{зд}(t), \\ y_d^{зд}(t) = y^{зд}(t) - T_{зд} \dot{y}_d^{зд}(t) \\ y_d^{зд}(0) = y(0) \end{cases} \quad (1)$$

где  $y(t)$  – регулируемая переменная;

$y^{зд}(t), y_d^{зд}(t)$  – соответственно заданное значение регулируемой переменной и ее

«динамическое значение» с ограниченной скоростью нарастания;

$T_{зд}$  – постоянная времени инерционности задатчика, ограничивающая скорость изменения  $y_d^{зд}(t)$  при изменении  $y^{зд}(t)$ .

2. Модуль динамической зоны нечувствительности (МДЗН):

$$\begin{cases} \Delta y_n(t) = \psi_n(\Delta y, g_n) \Delta y(t), \\ \psi_n(\Delta y, g_n) = \begin{cases} \alpha_n = 1, & \text{if } g_n(\Delta y - g_n \text{sign } \Delta y) \geq 0, \\ \beta_n = 0, & \text{if } g_n(\Delta y - g_n \text{sign } \Delta y) < 0, \end{cases} \\ g_n(t_1) = \Delta y_{знд}(t_1) = -T_{знд} \dot{\Delta y}_{знд}(t_1), \\ t_1 = 0, \text{ if } t = \arg\{g_{зн}(t)\Delta y(t)\}, \\ \Delta y_{знд}(t_1 = 0) = \Delta y_{знд}^H(t), \Delta y_{знд}^H(t) = \psi_{зн}(\Delta y, g_{зн}) \Delta y(t), \\ \psi_{зн}(\Delta y, g_{зн}) = \begin{cases} \alpha_{зн} = 1, & \text{if } g_{зн} \Delta y > 0, \\ \beta_{зн} = 0, & \text{if } g_{зн} \Delta y < 0, \end{cases} \\ g_{зн}(t) = \Delta y(t) + \tau_1^H \dot{\Delta y}(t) + \tau_2^H \ddot{\Delta y}(t) + \Delta y_{зн} \text{sign } \Delta y, \end{cases} \quad (2)$$

где  $g_{зн}(t), g_n(t)$  – функции переключения  $\psi_{зн}$  и  $\psi_n$ ;

$\Delta y_{знд}(t), \Delta y_{знд}^H(t), \Delta y_{зн}, \dot{\Delta y}_{знд}(t)$  – текущее, начальное и минимальные значения зоны

нечувствительности, скорость изменения  $\Delta y_{знд}(t)$ ;

$t_1$  - текущее время, отсчет которого начинается при  $t = 0$  и возобновляется каждый раз, когда  $g_{зн}(t) \cdot \Delta y(t) = 0$ ;

$\tau_1^H, \tau_2^H$  - настроечные параметры  $g_{зн}(t)$ ;

$T_{знд}$  - постоянная времени - настроечный параметр, определяющий скорость уменьшения  $\Delta y_{знд}(t)$ , при  $t_1 \rightarrow \infty$ .

3. Модуль основной алгоритмической (МОА):

$$\begin{cases} \dot{u}(t) = \dot{u}_и(t) + \dot{u}_н(t) + \dot{u}_д(t), \\ \dot{u}_и(t) = (k_p/T_{из.}) \cdot \psi_и(\Delta y, g_и) (\Delta y_{нф}(t) - \Delta y_{пр}(t)), \\ \dot{u}_н(t) = k_p (\Delta \dot{y}_{нф}(t) - \Delta \dot{y}_{пр}(t)), \dot{u}_д(t) = k_p T_{прд} (\Delta \ddot{y}_{нф}(t) - \Delta \ddot{y}_{пр}(t)), \\ \psi_и(\Delta y, g_и) = \begin{cases} \alpha_и = 1, \text{ if } g_и^+ g_и^- \geq 0, \\ \beta_и = 0, \text{ if } g_и^+ g_и^- < 0, \end{cases} \\ g_и^+(t) = u^{\max} - u(t), \quad g_и^-(t) = u^{\min} - u(t), \\ g_и^+(t) = \Delta y(t) + \tau_1^H \Delta \dot{y}(t) - \Delta y_{зи} \text{sign } \Delta y, \\ g_и^-(t) = \Delta y(t) - \tau_2^H \Delta \dot{y}(t) + \Delta y_{зи} \text{sign } \Delta y, \\ y_{нф}(t) = \Delta y(t) - (k_{\phi 1}/k_{\phi 2} \cdot \omega_{\phi}^{cp}) \dot{y}_{нф}(t) - (1/k_{\phi 2} \cdot (\omega_{\phi}^{cp})^2) \ddot{y}_{нф}(t), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\dot{u}_и(t), \dot{u}_н(t), \dot{u}_д(t)$  - скорости изменения соответственно интегрирующей, пропорциональной и дифференцирующей составляющих  $u(t)$ ;

$\Delta y_н(t)$  - выходная переменная МДЗН;

$\Delta y(t), \Delta \dot{y}(t)$  - ошибка регулирования и скорость ее изменения;

$\Delta \dot{y}_{нф}(t), \Delta \ddot{y}_{нф}(t), \Delta \dot{y}_{пр}(t), \Delta \ddot{y}_{пр}(t)$  - соответственно скорость и ускорение изменения переменных  $\Delta y_{нф}(t)$  и  $\Delta y_{пр}(t)$ ;

$g_и^+(t), g_и^-(t)$  - функции переключения  $\psi_и$ ;

$k_p, T_{из.}, T_{прд}$  - настройки основного алгоритма РПС, соответственно коэффициент передачи, время изодрома, время предварения;

$\tau_1^H, \tau_2^H, \Delta y_{зи}$  - настроечные параметры функций  $g_и^+(t), g_и^-(t)$ ;

$\omega_{\phi}^{cp}, k_{\phi p1}, k_{\phi p2}$  - настроечные параметры фильтра низких частот регулятора, соответственно частота среза и коэффициенты, которые определяют тип фильтра (при  $k_{\phi p1} \approx 1,41, k_{\phi p2} \approx 1,00$  ФР будет фильтром Баттеворта, при  $k_{\phi p1} \approx 2,37, k_{\phi p2} \approx 3,31$  – фильтром Чебышева с уровнем максимума пульсаций в полосе заграждения 1,1 %).

4. Модуль прогнозирования движения ОУ под воздействием управления (МПР):

$$\begin{cases} \Delta y_{пр}(t) = k_{пр} \psi(\Delta y, g_{пр}) \dot{u}(t) - (T_{пр1} + T_{пр2}) \Delta \dot{y}_{пр}(t) - T_{пр1} T_{пр2} \Delta \ddot{y}(t), \\ \psi_{пр}(\Delta \dot{y}, g_{пр}) = \begin{cases} \alpha_{пр} = 0, \text{ if } \dot{y} > 0, \begin{cases} g_{пр} < 0, \Delta y > -\Delta y_{зпр}, \\ g_{пр} > 0, \Delta y > \Delta y_{зпр}, \end{cases} \\ \beta_{пр} = 1, \text{ if } \dot{y} < 0, \begin{cases} g_{пр} < 0, \Delta y < \Delta y_{зпр}, \\ g_{пр} > 0, \Delta y < -\Delta y_{зпр}, \end{cases} \end{cases} \\ g_{пр}(t) = \Delta y(t) + \tau^H \Delta \dot{y}(t) + \Delta y_{зпр} \text{sign } \Delta y, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\Delta y_{пр}(t)$  - прогнозируемое значение приращения  $\Delta y(t)$  под действием  $u(t)$  на время запаздывания вперед;

$g_{пр}(t)$  - функция переключения ПР;  
 $k_{пр}, T_{пр1}, T_{пр2}$  - настроечные параметры алгоритма прогнозирования.  
 5. Модуль формирования управляющих воздействий (МФУВ):

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = (1/T_y) \int_0^t \psi_y(u, \dot{u}) \cdot \dot{u}_y(t) dt + u(0), \\ \psi_y(u, \dot{u}) = \begin{cases} \alpha_y = 1, \text{ if } \begin{cases} g_y^+ \cdot g_y^- < 0, \\ g_y^+ \leq 0 \wedge \dot{u} < 0 \vee g_y^- \geq 0 \wedge \dot{u} > 0, \end{cases} \\ \beta_y = 0, \text{ if } g_y^+ \leq 0 \wedge \dot{u} > 0 \vee g_y^- \geq 0 \wedge \dot{u} < 0, \end{cases} \\ g_y^+(t) = u^{\max} - u(t); g_y^-(t) = u^{\min} - u(t), \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $u(t), \dot{u}(t)$  - управляющее воздействие РПС и скорость его изменения;  
 $u^{\max}, u^{\min}$  - ограничения на изменения  $u(t)$ ;  
 $g_y^+(t), g_y^-(t)$  - функции переключения  $\psi_y$ ;  
 $T_y$  - постоянная времени интегратора МФУВ;  
 $t$  - текущее время, отсчет которого начинается в момент замыкания САР.

Характеристики  $\psi$ -ячеек представлено на рис. 2. В том случае, если все  $\psi$ -ячейки реализуют свои  $\alpha$ -структуры, то РПС вырождается в обычный линейный ПИД-регулятор.

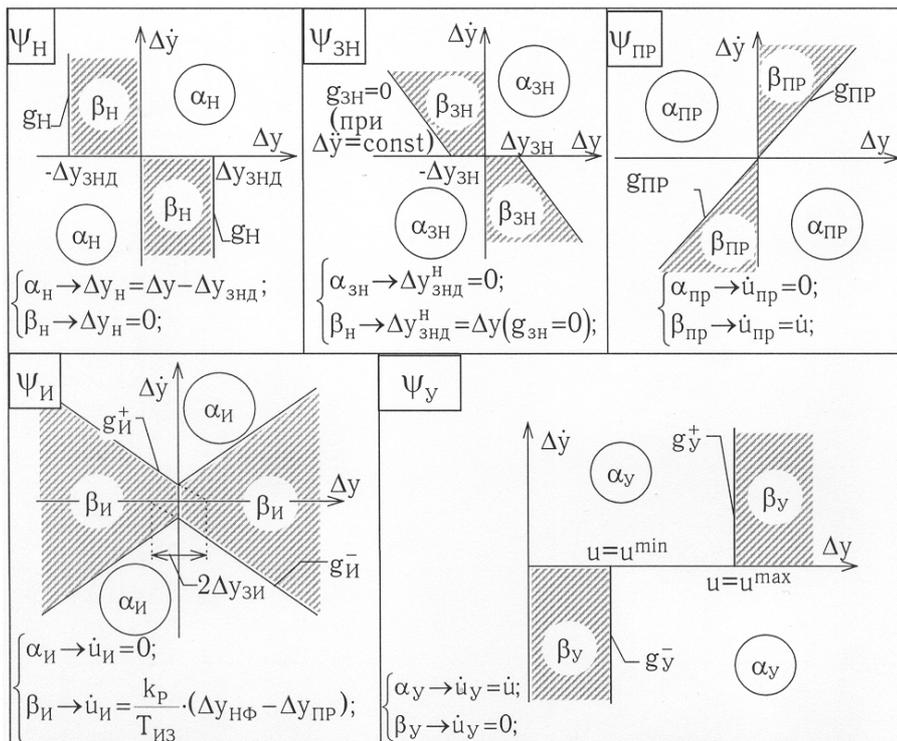


Рис. 2 Характеристики  $\psi$ -ячеек базового РПС

Как и для типовых линейных регуляторов, для рассматриваемого РПС- регулятора, разработаны упрощенные методики настройки параметров САР простейшей структуры, не требующие применения оптимизационных процедур. Для их применения свойства объекта управления по каналу регулирования традиционно представляются в виде модели первого порядка с запаздыванием (параметры  $k_0, \tau_0, T_0$ ). Отличие методики состоит в том,

что она предлагает более обоснованный выбор трех вариантов критериев САР, которым будут соответствовать настройки. Это критерии минимумов интегральных квадратичных ошибок регулирования при воздействиях на систему по каналам возмущения и запаздывания:  $\min j_f$  и  $\min j_y$  (соответственно для вариантов, когда САР преимущественно работает в режимах стабилизации и слежения), и критерий минимума средней интенсивности (частоты) нарушения регулируемой переменной установленного регламентом ограничения:  $\min n_s$ . Настройки, соответствующие последнему критерию ориентированы, прежде всего, на применение РПС в составе систем гарантирующего управления [7]. Номограммы и формулы для расчета параметров приведены на рис. 3.

Реализация РПС предполагает цифровой вариант. Он, с одной стороны, резко упрощает реализацию, по сравнению с аналоговым, но приводит к появлению дополнительной проблемы. Она связана с устойчивостью реализуемой РПС вычислительной процедуры. Прямое программирование алгоритма регулирования по блокам (модулям) структурной схемы регулятора (рис. 1) недопустимо из-за наличия в нем внутреннего контура прогнозирующей обратной связи. Цифровая реализация приведет к появлению в контуре дополнительного запаздывания (опережения) на шаг квантования  $T_{кв}$  относительно прямой цепи. А это при определенных соотношениях настроечных параметров элементов, входящих в этот контур, может привести к его неустойчивости.

Во избежание этого модули алгоритмической, прогнозирования и фильтрации описываются как единый модуль. Его передаточная функция при фиксированных структурах имеет вид:

$$W_{АПФ}(p) = T_d \frac{A b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{k_0 a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} = \frac{\dot{u}(t)}{\Delta y(t)}, \quad (6)$$

где  $a_0 = a'_0$ ;  $a_1 = a'_1 + \frac{k_{ФР1}}{k_{ФР2} \omega_{ФР}^{CP}} a'_0$ ;  $a_2 = a'_2 + \frac{k_{ФР1}}{k_{ФР2} \omega_{ФР}^{CP}} a'_1 + \frac{1}{k_{ФР2} (\omega_{ФР}^{CP})^2} a'_0$ ;

$$a_3 = \frac{k_{ФР1}}{k_{ФР2} \omega_{ФР}^{CP}} a'_2 + \frac{1}{k_{ФР2} (\omega_{ФР}^{CP})^2} a'_1; a_4 = \frac{a'_2}{k_{ФР2} (\omega_{ФР}^{CP})^2}; A = k_p k_0;$$

$$a'_0 = 1 + k_p k_0 T_d \tau_0 / T_{из} T_c; a'_1 = T_0 + 0,5 \tau_0 + k_p k_0 T_d \tau_0 / T_c; a'_2 = 0,5 T_0 \tau_0 + (k_p k_0 T_{пр} T_d \tau_0 / T_c);$$

$$b_0 = 1/T_{из}; b_1 = 1 + (T_0/T_{из}) + 0,5(\tau_0/T_{из}); b_2 = T_{пр} + T_0 + 0,5 \tau_0 (1 + T_0/T_{из});$$

$$b_3 = 0,5 T_0 \tau_0 + T_{прд} T_0 + 0,5 T_0 \tau_0; b_4 = 0,5 T_{прд} T_0 \tau_0;$$

$$k_{пр} = (\tau_0^1 / T_0^1) k_0; T_{пр1} = 0,5 \tau_0^1; T_{пр2} = T_c.$$

Важно, что порядок числителя  $W_{АПФ}(p)$  не превышает порядка знаменателя. После перехода к дискретному времени ( $t \rightarrow nT_{кв}$ ,  $n = 0, \infty$ ), получаем:

$$\begin{aligned} \dot{u}(nT_{кв}) = \frac{1}{a_0^0} \left\{ \frac{1}{k_0} [b_0^0 \Delta y(nT_{кв}) - b_1^0 \Delta y((n-1)T_{кв}) + b_2^0 \Delta y((n-2)T_{кв}) - \right. \\ \left. - b_3^0 \Delta y((n-3)T_{кв}) + b_4^0 \Delta y((n-4)T_{кв})] + a_0^0 \dot{u}((n-1)T_{кв}) - \right. \\ \left. - a_2^0 \dot{u}((n-2)T_{кв}) + a_3^0 \dot{u}((n-3)T_{кв}) - a_4^0 \dot{u}((n-4)T_{кв}) \right\}, \end{aligned}$$

где  $a_0^0 = \frac{a_4}{T_{кв}^4} + \frac{a_3}{T_{кв}^3} + \frac{a_2}{T_{кв}^2} + \frac{a_1}{T_{кв}} + a_0$ ;  $a_1^0 = \frac{4a_4}{T_{кв}^4} + \frac{3a_3}{T_{кв}^3} + \frac{2a_2}{T_{кв}^2} + \frac{a_1}{T_{кв}}$ ;

$$a_2^0 = \frac{6a_4}{T_{кв}^4} + \frac{3a_3}{T_{кв}^3} + \frac{a_2}{T_{кв}^2}; a_3^0 = \frac{4a_4}{T_{кв}^4} + \frac{a_3}{T_{кв}^3}; a_4^0 = \frac{a_4}{T_{кв}^4};$$

$$b_0^0 = T_d A \left( \frac{b_4}{T_{кв}^4} + \frac{b_3}{T_{кв}^3} + \frac{b_2}{T_{кв}^2} + \frac{b_1}{T_{кв}} + b_0 \right); b_1^0 = T_d A \left( \frac{4b_4}{T_{кв}^4} + \frac{3b_3}{T_{кв}^3} + \frac{2b_2}{T_{кв}^2} + \frac{b_1}{T_{кв}} \right);$$

$$b_2^0 = T_d A \left( \frac{6b_4}{T_{KB}^4} + \frac{3b_3}{T_{KB}^3} + \frac{b_2}{T_{KB}^2} \right); \quad b_3^0 = T_d A \left( \frac{4b_4}{T_{KB}^4} + \frac{b_3}{T_{KB}^3} \right); \quad b_4^0 = T_d A \frac{b_4}{T_{KB}^4}.$$

Выражение для расчета ошибки регулирования  $\Delta y$  при инерционном задатчике имеет вид:

$$\Delta y(nT_{KB}) = \left( 1 / \left( 1 + T_{зд} / T_{KB} \right) \right) \left( y_{зд} - y(nT_{KB}) + \left( T_{зд} / T_{KB} \right) \Delta y((n-1)T_{KB}) \right). \quad (8)$$

Для реализации управляющего воздействия, подаваемого на пропорциональный ИМ, необходимо дополнительно выполнить операцию интегрирования:

$$u(nT_{KB}) = u((n-1)T_{KB}) + \left( T_{KB} / T_c \right) \dot{u}(nT_{KB}). \quad (9)$$

Исследования показали, что САР с таким регулятором имеет существенно лучшие показатели эффективности, чем с ПИД-регулятором. Особенно это проявляется для существенно нестационарных объектов управления.

При необходимости рассмотренный алгоритм регулирования может быть расширен, например, за счет реализации второго порядка астатизма.

The regulator of variable structure with forecasting the free movement, oriented on application in systems of automatic control by objects of technological type is considered. The regulator provides essential increase of efficiency SAR, in particular for appreciably non-stationary objects. The questions of its digital realization and quasioptimal adjustments are worked. The regulator is positioned as alternative to typical PID-regulators.

1. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарнов; Под ред. А.С. Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.: ил.

2. Ялышев А.У., Разоренов О.И. Многофункциональные аналоговые регулирующие устройства автоматики. - М.: Машиностроение, 1981. – 399 с.: ил.

3. Хобін В.А., Парамонов О.І. Регулятор змінної структури для побутових ефективних робастних автоматичних систем // В кн.: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. – Одеса, 1997. – Вип. 17. – С. 241 – 248.

4. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

5. Системы с переменной структурой и их применение в задачах автоматизации полета / Под ред. Б.Н. Петрова и С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1968. – 324 с.

6. Системное проектирование средств автоматизации / С.В. Емельянов, Н.Е. Костылева, Б.П. Матич, Н.Н. Миловидов. – М.: Машиностроение, 1978. – 190 с.

7. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления: структуры с расчетом уставок контурам регулирования // Пр. Міжнар. конф. з автомат. управління (Львів. – 11 – 15 вересня 2000). – Т. 1 – Математичні проблеми управління, оптимізації та теорії ігор. – Львів, ДНДІ інформаційної інфраструктури, 2000. – С. 269 – 273.

## РЕФЕРАТЫ

**Минин М.Ю., Бидюк П.И.** Применение аппарата нечеткой логики для анализа психологических типов на основе базиса Юнга при принятии кадровых решений. – С. 5 – 12.

Рассмотрена проблема определения психологического типа личности для использования результатов в задаче профессионального отбора кандидатов с помощью нечетких множеств. Ее решение основано на нечеткой классификации с определением степени принадлежности к каждому кластеру, используя результаты психологического тестирования. В основу метода положена нечеткая классификация в евклидовом пространстве юнговских признаков. Приведен пример практического применения.

**Боскин О.О., Соколова Н.А.** Имитационная модель процесса дистанционного обучения. – С. 13 – 20.

Имитационное моделирование как особая информационная технология используется в случаях, когда алгоритмические методы либо невозможно, либо слишком трудно использовать для описания и исследования сложных экономических процессов.

**Кирюшатова Т.Г., Чёрный С.Г.** Моделирование процессов распределения функций персонала в управлении организацией. – С. 21 – 24.

Статья посвящена вопросам моделирования коллективной деятельности в производственных коллективах. Предлагаются различные пути построения моделей распределения функций персонала, которые могут использоваться при формировании различных производственных коллективов, при подборе персонала для достижения максимальной степени эффективности трудовой деятельности.

**Клименко Д.С.** Моделирование натяжения нити при смотке с конической бобины в процессе партионного снования. – С. 25 – 27.

Разработана модель колебаний натяжения нити при партионном сновании с конических бобин. Конечной целью моделирования является исследование влияния колебательных составляющих натяжения (параметрической и вынужденно) на обрывность при различных динамических режимах процесса снования.

**Марценюк Е.Н.** Осреднение характеристик фильтрационно-емкостных свойств ячеек в модели фильтрационных процессов.. – С. 28 – 32.

В статье представлен метод осреднения фильтрационных характеристик гидрогеологических ячеек для компьютерной модели фильтрационных и миграционных процессов с использованием метода конечных разностей. Используется оценка фильтрационно-емкостных свойств ячеек. В зависимости от качества и точности исходной информации, а также степени детальности создания геологической модели описанные четыре способа оценки могут быть использованы для построения фильтрационной модели как в комплексе, так и по отдельности.

**Орлов В.В.** Обнаружение и распознавание стационарных случайных процессов на решетчатой структуре. – С. 33 – 48.

Рассмотрены возможности экономичной реализации решающих статистик для задач обнаружения и распознавания случайного стационарного сигнала с неизвестной ковариационной матрицей. Показано, что применение решетчатых структур позволяет уменьшить объем вычислений. Проводится анализ влияния числа обучающих выборок на эффективность обнаружения полезного сигнала.

**Крупіца П.О.** Експериментальні та теоретичні дослідження процесу навивання основних ниток. – С. 49 – 52.

В статі приведені результати експериментальних і теоретичних досліджень процесу навивання основних ниток в шліхтувальній машині.

**Рожков С.А., Куцак Р.С., Бражник Д.А.** Исследование процесса деформации ткани на экспериментально-аналитической модели. – С. 53-60.

В статье исследуются вопросы влияния деформации ткани на определение ее плотности для автоматизированных систем контроля качества на экспериментально-аналитической модели ткани с использованием Фурье – представления.

**Бабак В.П., Дегтярьов В.В, Куц Ю.В, Щербак Л.М.** Автоматизована система вимірювань фазових характеристик періодичних сигналів на базі технології LabView. – С. 61 – 68.

Запропонована реалізація фазовимірювальної системи з використанням технології LabVIEW і розглянуті особливості її функціонування. Проведений аналіз нового варіанта фазовимірювальної системи з дискретною ортогональною обробкою сигналів, визначена похибка вимірювання фазових характеристик при обмеженому часі обробки сигналів.

**Бабичева И.Ф., Шарко А.В.** Использование нейросетевого классификатора в системах дефектоскопии механических характеристик металлов. – С. 69 – 77.

В статье рассмотрено решение задачи определения прочностных характеристик металлов с использованием трёхслойной персептронной нейронной сети. Разработана методика обработки многомерных данных с целью получения знаний о механических характеристиках металлов, основанная на комплексном использовании методов математической статистики и нейронной сети многослойный персептрон. Показана практическая ценность предлагаемой методики, основанная на получении более достоверных результатов при меньшей трудоёмкости контроля.

**Фаніна Л.О.** Аналіз тенденцій побудови систем мовного інтерфейсу. – С. 78 – 85.

Стаття присвячена рішенню проблеми розпізнавання мови, що складається в точному й ефективному відтворенні прийнятого мовного сигналу. Розглянуто основні типи систем визнання мови і підходів до їхньої побудови.

**Бараненко Р.В., Козел В.Н., Дроздова Е.А., Плотников А.О.** Оптимизация работы корпоративных компьютерных сетей. – С. 86 – 89.

В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации работы корпоративных компьютерных сетей, сформулированы основные принципы построения таких сетей и предлагается алгоритм оптимизации их работы.

**Кухаренко С.В., Балтовский А.А.** Решение задачи календарного планирования с использованием эвристических алгоритмов. – С. 90 – 96.

В статье представлен один из возможных подходов решения задачи календарного планирования с использованием эвристических алгоритмов.

**Цмоць І.Г.** Алгоритми та матричні НВІС-структури пристроїв ділення для комп'ютерних систем реального часу. – С. 97 – 105.

Удосконалено та орієнтовано алгоритми ділення на побудову матричних пристроїв реального часу з високою ефективністю використання обладнання. Розроблено та проведено оцінку матричних одноканальних і конвеєрних НВІС-пристроїв ділення з лінійними та нелінійними зв'язками.

**Шекета В.І.** Застосування процедури Append при аналізі абстрактних типів даних модифікаційних запитів. – С. 106 – 113.

Запропоновано спосіб застосування класичної процедури Append при виконанні аналізу абстрактних типів даних модифікаційних предикатних запитів для інформаційних інтелектуальних систем на основі баз даних і знань. Відмінними рисами запропонованого підходу є використання представлення інформації в формі логічних заперечень, явне задання поліморфних залежностей між абстрактними типами даних, і побудова абстрактних доменів на формально-логічній основі теорій послідовного уточнення доменів та абстрактної інтерпретації.

**Шерстюк В.Г.** Формальная модель гибридной сценарно-прецедентной СППР. – С. 114 – 122.

В статье на основе комбинации сценарного и прецедентного подходов построена формальная модель нового класса интеллектуальных систем поддержки принятия решений – сценарно-прецедентных СППР. Полученная гибридная модель дает возможность разработки интеллектуальных систем, пригодных для работы в условиях неполноты и неопределенности информации в сложных динамических предметных областях.

**Головащенко Н.В.** Математичні характеристики шумоподібно кодovаних сигналів. – С. 123 – 131.

Стаття стосується галузі інформаційних систем управління. Стаття стосується питань передачі інформації в системах контролю та управління підприємством. Велика увага приділяється математичним характеристикам складних сигналів. Надані структурні моделі генератора шумоподібних сигналів та цифрового знакового корелятора. Також розглянуті автокореляційні властивості і функції шумоподібних сигналів. Розглянуті переваги та недоліки використання шумоподібних сигналів в інформаційних системах.

**Маломуж Т.В.** Оптимальное управление на основе интеллектуальных систем. – С. 132 – 139.

В статье представлены формализация и метод решения задачи интеллектуальной поддержки оптимального управления. Рассмотрен актуальный вопрос создания теоретических основ для комбинирования интеллектуальных систем управления с существующими наработками в области оптимального управления. Статья имеет целью создание теоретического базиса построения интеллектуальной системы оптимального управления бюджетом региона.

**Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Лобок О.П.** Розробка багатовимірних оптимальних регуляторів для об'єктів одного класу. – С. 140 – 144.

Розглядається можливість створення одного багатовимірного регулятора для технологічних об'єктів виділеного класу, в якому виконуються умови оптимальності щодо якості перехідних процесів та зменшення витрат енергоносіїв, а також автономності окремих контурів.

**Балтовский А.А.** Способ адаптивной алгоритмизации задач расчета производственной программы. – С. 145 – 149.

В статье представлен способ формирования вероятных итерационных алгоритмов решения задачи расчета производственной программы с булевыми переменными.

**Ситников В.С.** Анализ путей уменьшения погрешностей цифровых устройств с фиксированной точкой. – С. 150 – 157.

Анализируются погрешности выходного сигнала цифрового устройства. Определены основные категории погрешностей. Проведена классификация и анализ погрешностей цифровых устройств. Показаны источники этих погрешностей и пути их уменьшения.

**Бабак В.П., Стадниченко В.Н., Приймаков О.Г., Токарчук В.В.** Прогнозування витривалості авіаційних матеріалів . – С. 158 – 162.

Встановлено взаємзв'язок між параметрами кривих Велера авіаційних матеріалів для прогнозування витривалості фрикційних вузлів авіаційної техніки на стадії проектування.

**Бабак В.П., В.Н. Стадніченко, О.Г. Приймаков** Прогнозування надійності, довговічності та витривалості авіаційних матеріалів. – С. 163 – 167.

Створено методологію прогнозування міцності, надійності, довговічності та витривалості авіаційних матеріалів на стадії проектування та в процесі експлуатації. Закладено основи створення інтегрального показника працездатності авіаційних матеріалів.

**Бергер Е.Г., Дмитрієв Д.О., Бергер Є.Е., Діневич Г.Ю.** Синтез строфоїдографів за методом параметричних сімей. – С. 168 – 172.

Розглянуто метод, який дозволяє конструювати такі технічні засоби автоматизації технологічних процесів як напрямні механізми, що забезпечують переміщення робочих органів за заданою траєкторією.

**Водічев В.А.** Автоматизована система керування швидкостями робочих рухів токарного верстата для підвищення ефективності обробки торцевих поверхонь. – С. 173 – 178.

Розглянуто систему керування приводами подачі і головного руху токарного верстата, яка стабілізує швидкість і потужність різання Наведені результати дослідження системи керування на математичній моделі. Виконано оцінку продуктивності і енергетичної ефективності процесу металообробки при застосуванні системи.

**Колесникова Е.В., Кострова Г.В.** Формирование базы данных АСУТП дуговой сталеплавильной печи. – С. 179 – 184.

В работе рассматривается база данных автоматизированной системы управления технологическим процессом выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах, обеспечивающая информационную поддержку принятия решений и формирующая паспорт проводимой плавки.

**Тонконогий В.М.** Трехконтурная АСУ нанесением ионно-плазменного покрытия на режущий инструмент. – С. 185 – 189.

В работе рассматривается трехконтурная АСУ нанесением ионно-плазменного покрытия на режущий инструмент, которая включает первый контур – автоматическое программное управление промежуточными параметрами процесса, второй контур – управление программой первого контура, и третий – управление параллелограммом качества по данным процесса эксплуатации инструмента.

**Хобин В.А.** Регулятор переменной структуры для объектов технологического типа. – С. 190 – 196.

Рассматривается регулятор переменной структуры с прогнозированием свободного движения, ориентированный на применение в системах автоматического регулирования объектами технологического типа. Регулятор обеспечивает существенное повышение эффективности САР, в особенности для существенно нестационарных объектов. Проработаны вопросы его цифровой реализации и квазиоптимальной настройки. Регулятор позиционируется как альтернатива типовым ПИД-регуляторам.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Бабак В.П.** – Член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, ректор Национального авиационного университета

**Бабичева И.Ф.** – Аспирант херсонского государственного технического университета, преподаватель математики физико–технического лицея при ХГТУ и ДНУ

**Балтовский А.А.** – Старший преподаватель кафедры электротехники и радиоэлектроники Одесского ордена Ленина института Сухопутных войск, кандидат техн. наук

**Бараненко Р.В.** – Ассистент кафедры Информационных технологий и Дизайна Феодосийского учебно-научного консультационного центра Херсонского государственного технического университета, аспирант кафедры Информационных технологий и Дизайна Херсонского государственного технического университета

**Бергер Е.Э.** – Доцент кафедры "Технология машиностроения" Херсонского государственного технического университета, кандидат техн. наук

**Бергер Э.Г.** – Профессор кафедры "Основы конструирования" Херсонского государственного технического университета, кандидат техн. наук

**Боскин О.О.** – Старший преподаватель кафедры информационных технологий и дизайна Херсонского государственного технического университета

**Бражник Д.А.** – Херсонский государственный технический университет, ассистент кафедры технической кибернетики

**Водичев В.А.** – Доцент кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета, кандидат техн. наук

**Головащенко Н.В.** – Аспирантка кафедры «Технической кибернетики» Херсонского государственного технического университета

**Дегтярёв В.В.** – Доцент кафедры информационно-измерительных систем Национального авиационного университета, кандидат техн. наук

**Диневиц Г.Ю.** – Декан факультета "Машиностроение", доцент кафедры "Технология машиностроения" Херсонского государственного технического университета

**Дмитриев Д.А.** – Ассистент кафедры "Основы конструирования" Херсонского государственного технического университета, кандидат техн. наук

**Дроздова Е.А.** – Старший преподаватель кафедры Информационных технологий и Дизайна Херсонского государственного технического университета

**Кирюшатова Т.Г.** – Старший преподаватель кафедры «Информационных технологий и дизайна», Херсонского государственного технического университета

**Клименко Д.С.** – Аспирант кафедры «Технической кибернетики» Херсонского государственного технического университета

**Козел В.Н.** – Старший преподаватель кафедры Информационных технологий и Дизайна Херсонского государственного технического университета

**Колесникова Е.В.** – Аспирантка, Одесский национальный политехнический университет

**Кострова А.В.** – Заместитель проректора по научной работе Одесского национального политехнического университета

**Крупница П.А.** – Аспирант кафедры «Технической кибернетики» Херсонского государственного технического университета

**Кухаренко С.В.** – Преподаватель кафедры военной кибернетики и информатики Одесского ордена Ленина института Сухопутных войск

**Куц Ю.В.** – Декан факультета информационных технологий Национального авиационного университета, кандидат техн. наук, доцент

**Куцак Р.С.** – Херсонский государственный технический университет, аспирант кафедры технической кибернетики

**Ладанюк А.П.** – Зав. кафедрой автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий Национального университета пищевой промышленности, профессор, доктор техн. наук

**Лобок А.П.** – Доцент каф. Автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий Национального университета пищевой промышленности, кандидат техн. наук

**Луцкая Н.Н.** – Аспирант каф. Автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий Национального университета пищевой промышленности

**Орлов В.В.** – Доцент Кафедры компьютеризованных систем управления Института компьютерных систем, Одесского национального политехнического университета, кандидат техн. наук.

**Плотников А.О.** – Инженер кафедры Информационных технологий и Дизайна Херсонского государственного технического университета, студент кафедры Информационных технологий и Дизайна Херсонского государственного технического университета

**Приймаков О.Г.** – Национальный авиационный университет, кандидат техн. наук

**Рожков С.А.** – Доцент кафедры технической кибернетики Херсонского государственного технического университета, канд. техн. наук

**Ситников В.С.** – Профессор кафедры "Компьютерные системы" Одесского национального политехнического университета, кандидат техн. наук, доцент

**Соколова Н.А.** – Зав. кафедрой экономической кибернетики Херсонского государственного технического университета

**Стадниченко В.Н.** – Национальный авиационный университет, кандидат техн. наук

**Токарчук В.В.** – Национальный авиационный университет

**Тонконогий В.М.** – Декан механико-технологического факультета Одесского национального политехнического университета, кандидат техн. наук, доцент

**Фанина Л.А.** – Аспирантка кафедры «Технической кибернетики» Херсонского государственного технического университета

**Хобин В.А.** – Доцент кафедры автоматизации производственных процессов Одесской национальной академии пищевых технологий, доктор техн. наук

**Цмоць И.Г.** – Старший научный сотрудник, заместитель директора Государственного научно-исследовательского института информационной инфраструктуры, Львов, кандидат техн. наук,

**Чёрный С.Г.** – Студент кафедры «Информационных технологий и дизайна» Херсонского государственного технического университета

**Шарко А.В.** – Профессор кафедры общей и прикладной физики Херсонского государственного технического университета, доктор техн. наук

**Шекета В.И.** – Доцент кафедры прикладной математики Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, кандидат техн. наук

**Шерстюк В.Г.** – Доцент кафедры информационных технологий и дизайна Херсонского государственного технического университета, кандидат техн. наук

**Щербак Л.Н.** – Доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедры компьютеризированных систем защиты информации Национального авиационного университета



# ВНИМАНИЮ АВТОРОВ ЖУРНАЛА!

## ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ СТАТЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА «АВТОМАТИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ»:

1. Тексты статей (до 10 стр.) представляются в электронном и печатном виде. Аннотации - на украинском, русском и английском языках, экспертное заключение о возможности опубликования, рецензия. Сведения об авторах должны включать: Ф.И.О., адрес, телефон (домашний и служебный), место работы, научные степень и звание, должность.

2. Статьи должны отражать (Постановление ВАК Украины № 7-06/1 от 15 января 2003г.): постановку проблемы в общем виде и ее связь с важными научными практическими заданиями; анализ последних исследований и публикаций; выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья; формулировку целей статьи; изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов; выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

3. Материалы, полученные некомплектно, оформленные небрежно и не в соответствии с настоящими правилами, редколлегией не рассматриваются.

4. Авторы представляют в редакцию текст статьи и аннотации в виде файла формата Microsoft Word на дискете 3,5 дюйма.

### *ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТОВОМУ ФАЙЛУ.*

Страницы: размер бумаги - 210 x 297 мм (A4), без нумерации, переносы не допускаются.

Поля: верхнее – 2 см, нижнее – 2 см, правое – 2 см, левое – 2,5 см.

Шрифт – Times New Roman. Интервал – одинарный.

Материалы представляются в следующем порядке:

- УДК. Шрифт – 12 пт., прописные. Абзац – без отступов, выравнивание по левому краю, интервал после – 12 пт.
- Название статьи. Шрифт – 14 пт., прописные. Абзац – без отступов, выравнивание по центру.
- Фамилии и инициалы авторов. Шрифт – 12 пт. Абзац – без отступов, выравнивание по центру, интервал до и после – 12 пт.
- Текст статьи. Шрифт – 12 пт. Абзац – 1,25 см, выравнивание по ширине.
- Литература. Слово «ЛИТЕРАТУРА»: шрифт – 12 пт, прописные; абзац – без отступов, выравнивание по центру, интервал до -12 пт., после – 6 пт. Список источников: нумерованный список, шрифт – 12 пт.; абзац – 1,25 см, выравнивание по ширине. Список источников оформляется в соответствии с требованиями ВАК Украины.
- Рисунки. Формат – Рисунок Microsoft Word, объект Corel Draw (версия не старше 10, текст должен быть преобразован в кривые) или точечный рисунок. Положение рисунка – в тексте. Под рисунком располагается надпись вида: «Рис. 1 Название рисунка». Абзац – без отступов, выравнивание по центру, интервал до и после – 6 пт.
- Формулы. Набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. параметры настройки редактора: обычный – 12 пт., крупный индекс – 7 пт., мелкий индекс – 5 пт., крупный символ – 18 пт., мелкий символ – 12 пт. Абзац – без отступов, выравнивание по центру. Справа от формулы в скобках указывается её порядковый номер.
- Таблицы. Формат – Microsoft Word или Excel. Над таблицей справа указывается номер таблицы вида: «Таблица 1». Ниже, по центру, размещается её название. Интервал до и после – 6 пт.
- Аннотации. Абзац – 1,25 см, выравнивание по ширине, интервал до и после – 6 пт. Аннотации представляются на украинском, русском и английском языках. Шаблон документа для оформления материалов можно взять в редакции.

Научно-технический журнал для публикации принимает работы по следующим научным направлениям:

- моделирование объектов и систем управления
- информационно-измерительные системы
- информационно-управляющие комплексы и системы
- оптимальное управление объектами и системами
- методы построения адаптивных систем управления
- цифровые и дискретные системы управления
- современные технические средства, комплексы и системы
- энергетический менеджмент
- экономика научно-технического прогресса

*Научно-технический журнал "Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы" приглашает к сотрудничеству организации на взаимовыгодных условиях. Журнал имеет общегосударственную сферу распространения.*

*Обращаться по адресу:*

73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24  
ХГТУ, Редакция журнала ААЭКС  
Бражнику Александру Михайловичу  
т.: (0552) 552968, 326937  
E-mail: [app@kstu.edu.ua](mailto:app@kstu.edu.ua)

---

Рефераты научно-технического журнала аннотируются по сети INTERNET

---

Работы следует направлять в редакцию журнала по адресу:

73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24, ХГТУ, Редакция журнала ААЭКС  
E-mail: [app@kstu.edu.ua](mailto:app@kstu.edu.ua)

Справки по телефонам: (0552) 552968, 326937