

## БІОЛОГІЧНІ ТА МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ

УДК 615. 07(045)

Л. А. КОШЕВАЯ

Национальный авиационный университет, г. Киев

### МОДИФИКАЦИЯ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

**Анотація:** Невизначеність кількісних результатів біологічних випробувань, викликана недосконалістю процедури розведення, обумовлює необхідність введення додаткових зон, при знаходженні результату в яких існує невизначеність прийняття рішення про відповідність препарату встановленим вимогам. Запропоновано метод корекції вирішальних правил для встановлення меж зон невизначеності.

**Ключові слова:** біологічні випробування, контроль якості, вирішальне правило, невизначеність, процедура розведення

**Аннотация:** Неопределенность количественных результатов биологических испытаний, вызванная несовершенством процедуры разведения, обуславливает необходимость введения дополнительных зон, при нахождении результата в которых существует неопределенность принятия решения о соответствии препарата установленным требованиям. Предложен метод коррекции решающих правил для установления границ зон неопределенности.

**Ключевые слова:** биологические испытания, контроль качества, решающее правило, неопределенность, процедура разведения

**Abstract** The uncertainty of the quantitative results of biological testing due imperfect procedure breeding, causes necessity of the introducing additional zones. If the result is in these areas, there is uncertainty of the decision about according product to specified requirements. Proposed correction method of decision rules for delineating areas of uncertainty.

**Key words:** Biological testing, quality control, decision rule, the uncertainty, the process of breeding.

#### Введение

Согласно стандартам и положениям Фармакопеи Украины [1], устанавливающим нормы качества медицинских препаратов, для проверки их качества необходимо проведение биологических испытаний. Биологические методы контроля качества препаратов весьма разнообразны. Среди них испытания на токсичность, стерильность, микробиологическую чистоту и т.д. Оценивание показателей биологических испытаний осуществляются с помощью физических и физико-химических методов, в которых используются стандартные процедуры, в частности приготовление растворов, основанное на многократных разведениях в известных пропорциях исходного раствора различными растворителями в соответствии с принятой схемой. В большинстве случаев результатом биологического испытания является определение количества микроорганизмов в препарате, которое может составлять сотни тысяч единиц, для подсчета которых производят многоступенчатое разведение исходного препарата. Ранее в работах [2, 3] были предложены подходы к оцениванию неопределенности коэффициента разведения, значение которого, а также метрологические характеристики применяемых средств измерений, с очевидностью влияют на конечный результат биологических испытаний. Так, было получено выражение для оценки неопределенности, которое позволяет с учетом метрологических характеристик применяемого измерительного оборудования обоснованно выбирать схему разведения, обеспечивающую с наименьшей неопределенностью реализацию заданного значения.

На основании полученного результата испытаний делают заключение о качестве исследуемого препарата. Из-за влияния эффектов случайного и систематического характеров при оценке результатов контрольных испытаний существуют некоторые интервалы в окрестностях нижней и верхней границ нормы, при нахождении в которых значений контролируемой величины, возникает неопределенность принимаемых решений. Особый интерес представляют значения контролируемого параметра, находящегося в границах верхнего или нижнего пределов нормы, где сильно влияние неопределенности получаемых при испытании количественных результатов.

#### Цель работы

Показать метод коррекции решающих правил для установления границ зон неопределенности принятия решения по результатам биологических испытаний

#### Постановка проблемы

В качестве примера рассмотрим определение специфической активности и термостабильности вакцины БЦЖ, на основании которых принимается решение о качестве вакцины. На рис. 1 изображена последовательно-параллельная схема проведения испытаний вакцины БЦЖ.

Испытание вакцины БЦЖ по этим показателям проводится в три этапа [4].

Этап 1: Многократное разведение исходной суспензии, полученной путем разведения сухого нативного препарата.

Этап 2: Высевание в питательную среду.

Этап 3: Подсчет количества колоний и вычисление результата.

**Основная часть**

Результатом по показателю специфической активности является количество жизнеспособных микобактерий на единицу массы препарата.

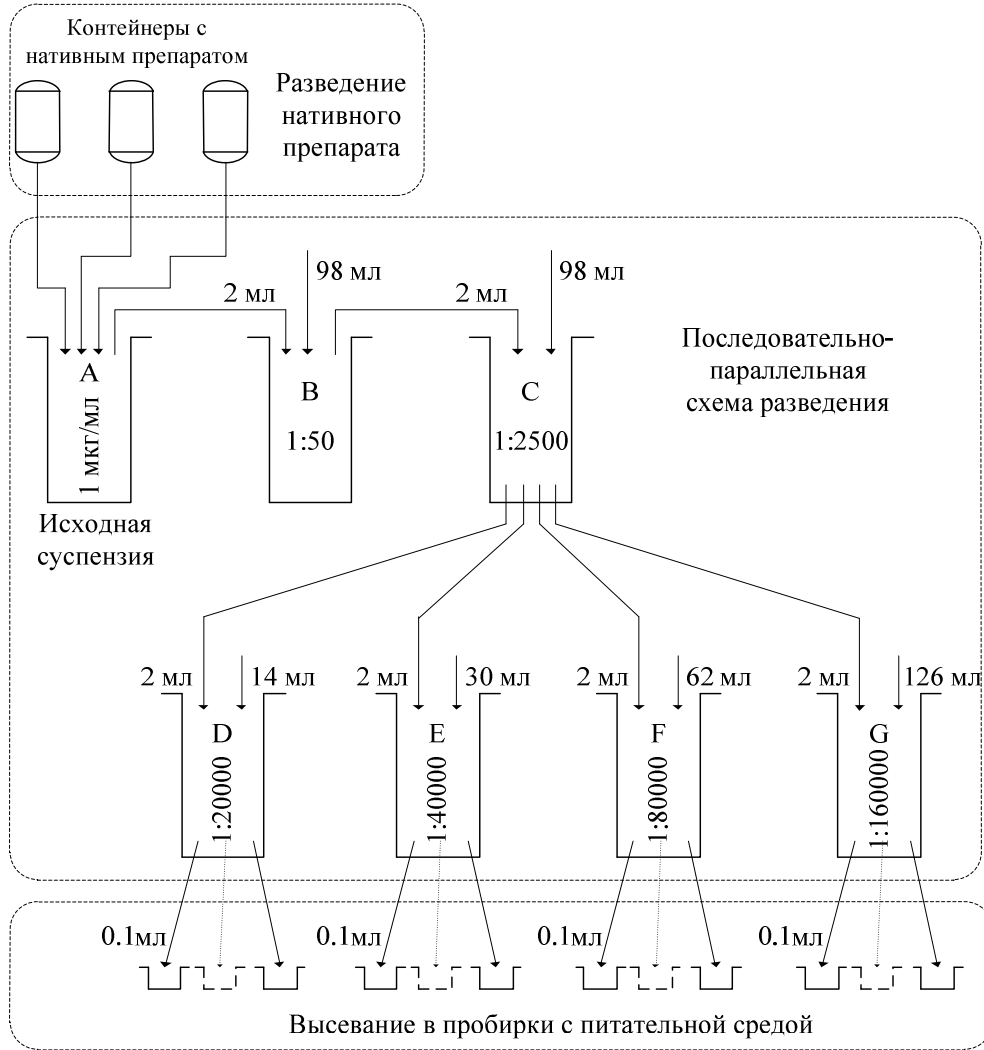


Рисунок 1 — Последовательно-параллельная схема проведения испытаний

Расчет количества жизнеспособных микобактерий в единице массы препарата  $R_i$  осуществляется по формуле из правого столбца табл. 1., которая отвечает решающему правилу из левого столбца.

Таблица 1 – Формулы для расчета количества жизнеспособных микобактерий в соответствии с решающим правилом

Решающее правило	Формула
$X_2 + 2X_3 \geq 2\omega \geq 2X_3$	$R_1 = \frac{d_1}{V} \cdot 0,5(X_1 + X_2 + 2X_3)$ (1)
$X_1 + X_2 + 2X_3 \geq 2\omega \geq X_2 + 2X_3$	$R_2 = \frac{d_2}{V} \cdot \omega \cdot \frac{X_1}{(2\omega + X_1 - X_2 - 2X_3)}$ (2)
$X_2 + 2X_3 \geq 2\omega \geq 2X_3$	$R_3 = \frac{d_3}{V} \cdot \omega \cdot \frac{X_2}{(2\omega + X_2 - 2X_3)}$ (3)
$2X_3 \geq 2\omega$	$R_4 = \frac{d_3}{V} \cdot X_3$ (4)

В табл. 1 использованы такие обозначения:  $X_1, X_2, X_3$  — средние значения количества колоний

$d_1 = d_E$  при кратности разведений  $d_1, d_2, d_3$ ;  $d_1 = d_E$ ;  $d_2 = d_F$ ;  $d_3 = d_G$  при испытаниях на специфическую активность неинкубированных образцов и  $d_1 = d_D$ ;  $d_2 = d_E$ ;  $d_3 = d_F$  при испытаниях на специфическую активность инкубированных образцов; индексы  $D, E, F, G$  соответствуют номерам флаконов для разведения в соответствии с рис. 1;  $V = 0,1$  мл — объем высевной суспензии;  $\omega = 40$  — постоянное число. На рис. 2 приведена графическая интерпретация табл. 1.

$X_1 + X_2 + 2X_3$	$\frac{2\omega}{V} \cdot \frac{d_1}{0.5} \cdot (X_1 + X_2 + 2X_3)$
$X_2 + 2X_3$	$\frac{2\omega}{V} \cdot \frac{d_2}{\omega} \cdot \frac{X_1}{2\omega + X_1 - X_2 - 2X_3}$
$2X_3$	$\frac{2\omega}{V} \cdot \frac{d_3}{\omega} \cdot \frac{X_2}{2\omega + X_2 - 2X_3}$
	$\frac{2\omega}{V} \cdot d_3 \cdot X_3$

Рисунок 2 – Графическая интерпретация табл. 1

Решающие правила, представленные в табл. 1, предполагают отсутствие неопределенности границ  $(X_1 + X_2 + 2X_3)$ ,  $(X_2 + 2X_3)$ ,  $(2X_3)$ .

Однако, на практике эти границы будут иметь неопределенность, т. к. они вычисляются на основании данных, полученных экспериментальным путем. Наличие неопределенности предполагает представление каждой границы в виде интервала, что приводит к необходимости коррекции решающих правил.

#### Коррекция решающих правил.

Средние значения количества колоний  $X_1, X_2, X_3$  вычисляются соответственно по формулам:

$$X_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} X_{1i}}{N_1}$$

$$X_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} X_{2i}}{N_2}; \quad X_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} X_{3i}}{N_3},$$

где  $X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}$  — количество колоний в  $i$ -м высевании разведений  $d_1, d_2, d_3$  соответственно;  $N_1 = 4$ ,  $N_2 = 4$  и  $N_3 = 8$  — количество пробирок с питательной средой, в которые производятся высевания из разведений  $d_1, d_2, d_3$  соответственно.

Стандартные отклонения (неопределенность по типу А) средних значений количества колоний определяются соответственно по формулам:

$$u(X_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (x_{1i} - x_1)^2}{N_1(N_1 - 1)}}; \quad u(X_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_2} (x_{2i} - x_2)^2}{N_2(N_2 - 1)}}; \quad u(X_3) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_3} (x_{3i} - x_3)^2}{N_3(N_3 - 1)}}$$

Стандартное отклонение верхней границы  $u(X_1 + X_2 + 2X_3)$  определяется выражением:

$$u(X_1 + X_2 + 2X_3) = \sqrt{\left(\frac{\partial L_1}{\partial x_1}\right)^2 u^2(X_1) + \left(\frac{\partial L_1}{\partial x_2}\right)^2 u^2(X_2) + \left(\frac{\partial L_1}{\partial x_3}\right)^2 u^2(X_3)}. \quad (5)$$

Стандартное отклонение  $u(X_2 + 2X_3)$  определяется выражением:

$$u(X_2 + 2X_3) = \sqrt{\left(\frac{\partial L_2}{\partial x_2}\right)^2 u^2(X_2) + \left(\frac{\partial L_2}{\partial x_3}\right)^2 u^2(X_3)}. \quad (6)$$

Стандартное отклонение  $u(2X_3)$  определяется выражением:

$$u(2X_3) = \sqrt{\left(\frac{\partial L_3}{\partial x_3}\right)^2 u^2(X_3)} \quad (7)$$

Расширенные неопределенности  $U(X_1 + X_2 + 2X_3); U(X_2 + 2X_3); U(2X_3)$  вычисляются соответ-

венно как:

$$U(X_1 + X_2 + 2X_3) = ku(X_1 + X_2 + 2X_3); \tag{9}$$

$$U(X_2 + 2X_3) = ku(X_2 + 2X_3); \tag{10}$$

$$U(2X_3) = ku(2X_3), \tag{11}$$

где  $k = 2$  — коэффициент охвата (предполагается нормальное распределение и  $P = 0,95$ ).

Вычислив производные и подставив (5), (6), (7) в (8), (9), (10) соответственно, получим выражения:

$$U(X_1 + X_2 + 2X_3 = k\sqrt{u^2(X_1) + u^2(X_2) + 4u^2(X_3)});$$

$$U(X_2 + 2X_3 = k\sqrt{u^2(X_2) + 4u^2(X_3)});$$

$$U(2X_3) = k \cdot 2u(X_3)$$

Зона I	$\frac{d_1}{V} \cdot 0,5 \cdot (X_1 + X_2 + 2X_3)$
$X_1 + X_2 + 2X_3 + U(X_1 + X_2 + 2X_3)$	
$X_1 + X_2 + 2X_3$	Зона Ia
$X_1 + X_2 + 2X_3 - U(X_1 + X_2 + 2X_3)$	
Зона II	$\frac{d_2}{V} \cdot \omega \cdot \frac{X_1}{2\omega + X_1 - X_2 - 2X_3}$
$X_2 + 2X_3 + U(X_2 + 2X_3)$	
$X_2 + 2X_3$	Зона IIa
$X_2 + 2X_3 - U(X_2 + 2X_3)$	
Зона III	$\frac{d_3}{V} \cdot \omega \cdot \frac{X_2}{2\omega + X_2 - 2X_3}$
$2X_3 + U(2X_3)$	
$2X_3$	Зона IIIa
$2X_3 - U(2X_3)$	
Зона IV	$\frac{d_3}{V} \cdot X_3$

На рис. 3 штриховкой обозначены зоны неопределенности принятия решений. Если значение  $2\omega$  попадает в зону **I, II, III, IV**, то принимается абсолютно достоверное решение о вычислении результата по формулам (1), (2), (3) или (4) соответственно.

Заштрихованные зоны **Ia, IIa, IIIa** являются зонами неопределенности принятия решений. Если значение  $2\omega$  попадает в зону **Ia, IIa** или **IIIa**, то невозможно принять абсолютно достоверное решение по какой формуле ((1) или (2), (2) или (3), (3) или (4) соответственно) необходимо вычислять результат.

С учетом зон неопределенности принятия решений табл. 1 примет вид таблицы 2.

Рисунок 3 — Графическая интерпретация табл. 1 с учетом зон неопределенности принятия решений

Таблица 2 Модифицированное решающее правило с учетом зон неопределенности

Зона	Решающее правило	Формула
<b>I</b>	$X_1 + X_2 + 2X_3 + U(X_1 + X_2 + 2X_3) \geq 2\omega$	$R_1 = \frac{d_1}{V} \cdot 0,5(X_1 + X_2 + 2X_3)$
<b>Ia</b>	$X_1 + X_2 + 2X_3 + U(X_1 + X_2 + 2X_3) \geq 2\omega \geq X_1 + X_2 + 2X_3 - U(X_1 + X_2 + 2X_3)$	Зона неопределенности принятия решений
<b>II</b>	$X_1 + X_2 + 2X_3 - U(X_1 + X_2 + 2X_3) \geq 2\omega \geq X_2 + 2X_3 + U(X_2 + 2X_3)$	$R_2 = \frac{d_2}{V} \cdot \omega \cdot \frac{X_1}{(2\omega + X_1 - X_2 - 2X_3)}$
<b>IIa</b>	$X_2 + 2X_3 + U(X_2 + 2X_3) \geq 2\omega \geq X_2 + 2X_3 - U(X_2 + 2X_3)$	Зона неопределенности принятия решений
<b>III</b>	$X_2 + 2X_3 - U(X_2 + 2X_3) \geq 2\omega \geq 2X_3 + U(2X_3)$	$R_3 = \frac{d_3}{V} \cdot \omega \cdot \frac{X_2}{(2\omega + X_2 - 2X_3)}$
<b>IIIa</b>	$2X_3 + U(2X_3) \geq 2\omega \geq 2X_3 - U(2X_3)$	Зона неопределенности принятия решений
<b>IV</b>	$2X_3 - U(2X_3) \geq 2\omega$	$R_4 = \frac{d_3}{V} \cdot X_3$

**Вычисление расширенной неопределенности результата.** Расширенные неопределенности результатов вычисляются как произведение коэффициента охвата на положительные корни из квадратов стандартных отклонений соответствующих результатов:

$$U(R_i) = k\sqrt{u^2(R_i)},$$

где  $k = 2$  — коэффициент охвата, предполагается нормальное распределение и  $P = 0,95$ . Тогда:

$$u^2(R_1) = \left(\frac{\partial R_1}{\partial d_1}\right)^2 u^2(d_1) + \left(\frac{\partial R_1}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial R_1}{\partial X_1}\right)^2 u^2(X_1) + \left(\frac{\partial R_1}{\partial X_2}\right)^2 u^2(X_2) + \left(\frac{\partial R_1}{\partial X_3}\right)^2 u^2(X_3);$$

$$u^2(R_2) = \left(\frac{\partial R_2}{\partial d_2}\right)^2 u^2(d_2) + \left(\frac{\partial R_2}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial R_2}{\partial X_1}\right)^2 u^2(X_1) + \left(\frac{\partial R_2}{\partial X_2}\right)^2 u^2(X_2) + \left(\frac{\partial R_2}{\partial X_3}\right)^2 u^2(X_3)$$

$$u^2(R_3) = \left(\frac{\partial R_3}{\partial d_3}\right)^2 u^2(d_3) + \left(\frac{\partial R_3}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial R_3}{\partial X_2}\right)^2 u^2(X_2) + \left(\frac{\partial R_3}{\partial X_3}\right)^2 u^2(X_3)$$

$$u^2(R_4) = \left(\frac{\partial R_4}{\partial d_3}\right)^2 u^2(d_3) + \left(\frac{\partial R_4}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial R_4}{\partial X_3}\right)^2 u^2(X_3)$$

где

$$u^2(V) = u^2(\Delta_p) + u^2(\Delta_p);$$

$u^2(d_1)$ ,  $u^2(d_2)$ ,  $u^2(d_3)$  — квадраты стандартных отклонений величин разведения  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  соответственно и определяются по таблице 3.

Таблица 3 – Квадраты стандартных отклонений величин разведений

Случай испытания неинкубированных образцов	Случай испытания инкубированных образцов
$u^2(d_1) = u^2(d_E)$	$u^2(d_1) = u^2(d_D)$
$u^2(d_2) = u^2(d_F)$	$u^2(d_2) = u^2(d_E)$
$u^2(d_3) = u^2(d_G)$	$u^2(d_3) = u^2(d_F)$

**Вычисление результата в зоне неопределенности принятия решений.** Если значение  $2\omega$  попадает в зону неопределенности принятия решений, то невозможно принять достоверное решение по какой формуле необходимо вычислять результат. Из-за невозможности принятия достоверного решения, может быть совершена непреднамеренная ошибка.

При вычислении результатов  $R_{1a}$ ,  $R_{2a}$  и  $R_{3a}$  в зонах *Ia*, *IIa* и *IIIa* рекомендуется пользоваться соотношениями:

$$R_{1a} = \begin{cases} R_1, \text{ если } U(R_1) < U(R_2) \\ R_2, \text{ если } U(R_2) < U(R_1) \end{cases};$$

$$R_{2a} = \begin{cases} R_2, \text{ если } U(R_2) < U(R_3) \\ R_3, \text{ если } U(R_3) < U(R_2) \end{cases};$$

$$R_{3a} = \begin{cases} R_3, \text{ если } U(R_3) < U(R_4) \\ R_4, \text{ если } U(R_4) < U(R_3) \end{cases}.$$

Расширенные неопределенности результатов  $R_{1a}$ ,  $R_{2a}$  и  $R_{3a}$  рекомендуется представлять в виде объединения двух соответствующих неопределенностей:

$$U(R_{1a}) = U(R_1) \cup U(R_2)$$

$$U(R_{2a}) = U(R_2) \cup U(R_3)$$

$$U(R_{3a}) = U(R_3) \cup U(R_4)$$

**Вычисление результатов по показателю термостабильности.** Результатом по этому показате-

лю является процентное соотношение количества жизнеспособных микобактерий в образцах инкубированного препарата (инкубация образцов производится при 37°C на протяжении 28 дней) к количеству жизнеспособных микобактерий в образцах неинкубированного препарата.

Термостабильность определяется по формуле:

$$T = \frac{A_2}{A_1} \cdot 100\%,$$

где  $A_2$  — специфическая активность инкубированных образцов;  $A_1$  — специфическая активность неинкубированных образцов.  $U(T) = 100k \cdot u^2(T)$

Расширенная неопределенность  $U(T)$  вычисляется как

$$U(T) = 100k \cdot u^2(T),$$

где

$$u^2(T) = \left( \frac{\partial T}{\partial A_2} \right)^2 u^2(A_2) + \left( \frac{\partial T}{\partial A_1} \right)^2 u^2(A_1) = 1000 \left( \frac{1}{A_1^2} u^2(A_2) + \frac{A_2^2}{A_1^4} u^2(A_1) \right);$$

$u^2(A_2)$  — стандартное отклонение результата по показателю специфической активности для случая испытания инкубированного образца  $u^2(A_1)$  — неинкубированного образца.

Тогда

$$U(T) = k \cdot 100 \sqrt{\frac{1}{A_1^2} u^2(A_2) + \frac{A_2^2}{A_1^4} u^2(A_1)},$$

откуда следует, что неопределенность показателя термостабильности зависит от неопределенности специфической активности инкубированных и неинкубированных образцов.

### Выводы

В результате влияния на результат испытаний неопределенности коэффициента разведения исходных материалов и реактивов при пробоподготовке возникает необходимость корректировать решающие правила, которые позволяют выбрать способ пересчета количества микроорганизмов в разведенном препарате в количестве микроорганизмов в исходном препарате. На основании полученного результата испытаний принимается решение о соответствии препарата требованиям. С помощью предложенного метода коррекции устанавливаются зоны неопределенности, при нахождении результата в которых, нельзя достоверно определить какое из решающих правил следует использовать.

### Список литературы

1. Державна Фармакопея України. – Харків.: РІРЕГ. – 2008. – 605с.
2. Володарский Е.Т. Особенности оценивания неопределенности результатов биологических испытаний/Е.Т. Володарский Л.А. Кошечья/ Системы обработки информации.–2010.–Вып.4(85).–С.142-144.
3. Володарский Е.Т. Уменьшение неопределенности процедуры разведения растворов при аналитических исследованиях/Е.Т. Володарский, Л.А. Кошечья//Системы обработки информации. – Системы обработки информации. – 2011. – Вып.1 (91). – С.74-77.
4. Стандартна операційна процедура МОЗ України ДП «Центр імунологічних препаратів». Випробування вакцини БЦЖ за показниками «Специфічна активність», «Автентичність», «Термостабільність». Автор Макушенко О.С.– ред.№1.– 9 с.:іл.
5. Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений»: ДСТУ-Н РМГ 43:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 20 с. – (Національний стандарт України).

### Информация об авторе

**Кошечья Лариса Александровна**, д.т.н., профессор кафедры биокрибернетики и аэрокосмической медицины, Национальный авиационный университет, просп. Космонавта Комарова, 1, Киев, 03058, Украина, тел / факс (044) 4067442, e-mail: arnis@ukrpost.net.

УДК 615.478.004 (045)

В.Д. КУЗОВИК, В.Л. КУЧЕРЕНКО

Національний авіаційний університет, м. Київ

## НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ МЕДИЧНОГО ДІАГНОСТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ФАКТИЧНИМ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ

**Анотація:** Проведений аналіз виробничої діяльності експлуатаційних та ремонтних підприємств, в результаті якого визначені певні недоліки технологічних процесів обслуговування та ремонту медичного діагностичного обладнання, яке розміщене на мобільних медичних комплексах. Показані ефективні методи та засоби вдосконалення технологій ремонту медичного діагностичного обладнання, впровадження яких забезпечує перехід на ремонт за фактичним технічним станом.

**Ключові слова:** система ремонту, виробнича та інформаційна технології ремонту, фактичний технічний стан, засоби автоматизації.

**Аннотация:** Проведен анализ производственной деятельности эксплуатационных и ремонтных предприятий, в результате которого определены недостатки технологических процессов обслуживания и ремонта медицинского диагностического оборудования, которым оснащены мобильные медицинские комплексы. Показаны эффективные методы и средства усовершенствования технологий ремонта медицинского диагностического оборудования, внедрение которых обеспечит переход на ремонт по фактическому техническому состоянию.

**Ключевые слова:** система ремонта, производственная и информационная технологии, фактическое техническое состояние, средства автоматизации.

**Abstract:** The analysis of production activity of operating and repair enterprises, as a result of which the certain are certain lacks of technological processes of service and repair of medical diagnostic equipment which is placed on mobile medical complexes is conducted. Basic principles of construction of the system of repair are resulted by development and introduction of the newest information and production technologies. The topology model of the system of service and repair of medical diagnostic equipment is developed.

**Keywords:** system of repair, production and information technologies of repair, actual technical state, facilities of automation.

### Вступ

Проблема розробки та впровадження ефективних систем ремонту (СР) медичного діагностичного обладнання (МДО) являється актуальною, оскільки вона пов'язана з вірогідністю оцінювання стану здоров'я людини. Особливого значення проблема набуває для мобільних медичних комплексів (ММК), які призначені для своєчасного діагностування стану здоров'я населення у віддалених регіонах країни.

Аналіз виробничої діяльності експлуатаційних та ремонтних підприємств показує, що технологічні процеси обслуговування та технологічні процеси ремонту МДО мають низьку продуктивність. Рівень якості робіт з обслуговування та ремонту не завжди відповідає встановленим вимогам, а також зазначені технологічні процеси мають високу собівартість. Як показує досвід експлуатації, значна кількість ММК знаходяться в непрацездатному стані через відмови МДО, яке на них розміщене. Така ситуація недопустима, оскільки стан експлуатаційної готовності як ММК, так і автомобілів швидкої медичної допомоги повинен бути на високому рівні.

Враховуючи результати аналізу виробничої діяльності підприємств, що здійснюють на теперішній час ремонт МДО, можна відмітити характерні недоліки [1]:

- низький рівень автоматизації технологічних операцій, що не дає можливість отримати необхідний рівень якості ремонтних робіт;
- невідповідність обсягу ремонтних робіт технічному стану виробів, в результаті чого відбувається необґрунтоване виконання підвищених обсягів ремонтних робіт;
- відсутність методів та засобів об'єктивної оцінки технічного стану (ТС) МДО при ремонті, що призводить до помилкових рішень щодо працездатного стану зазначеного обладнання;
- недосконалість або відсутність інформаційних систем, що призводить до нерациональних витрат елементної бази, енергоресурсів та трудових ресурсів;
- відсутність методів та засобів прогнозування технічного стану МДО;
- в існуючих виробничих технологіях роботи з обслуговування та ремонту здійснюються за встановленим регламентом або за ресурсом.

### Актуальність

Проведений аналіз показує, що у нинішній час в системі ремонту МДО має місце проблемна ситуація, при якій рішення приймаються в умовах ризику та невизначеності. Іншими словами, рішення приймаються або при недостовірній, або при неповній інформації щодо ТС як складових МДО, так і МДО загалом. Така ситуація накладає принципові обмеження на можливість досягнення необхідного рівня експлуатаційної надійності МДО.

Вибірковий перелік недоліків вказує на необхідність переходу на ремонт МДО за фактичним технічним станом (ФТС).

### Мета

Визначити основні принципи побудови новітніх технологій ремонту медичного діагностичного обладнання шляхом аналізу топологічної моделі системи обслуговування та ремонту МДО.

### Основна частина

Реалізація методу ремонту МДО за фактичним технічним станом полягає у розробці перспективної системи ремонту, яка включає в контур ремонту МДО не тільки ремонтні підприємства (заводи-виробники), а і сервісні підприємства (експлуатаційні підприємства). Система будується на основі розроблення та впровадження новітніх інформаційної та виробничої технологій і призначена для підвищення ефективності експлуатації ММК. В запропонованій системі ремонту демонтовані вироби (ДВ) МДО об'єднуються в керуємі потоки, які переміщуються в замкнутому контурі експлуатація-ремонт-експлуатація.

При переході на ремонт за ФТС необхідно створити комп'ютеризовану інформаційну систему (КІС), що забезпечує оцінювання технічного стану МДО за різних режимів експлуатації. Така КІС є базовою при створенні інформаційної технології і включає засоби збору технологічних та експлуатаційних даних, мережі зв'язку та системи передачі даних для формування інформаційного ресурсу.

Таким чином, процес перетворення інформації в інформаційний ресурс відбувається за рахунок розроблення та впровадження інформаційної технології (ІТ). Така інформаційна технологія забезпечує необхідний рівень ефективності застосування виробничої технології (ВТ) як базової складової технологічного процесу ремонту. При переході на ремонт за ФТС виробнича технологія формується при широкому впровадженні засобів автоматизації – автоматизованого комплексу.

Автоматизований комплекс (АК), який включає сучасні ЕОМ, є багатофункціональним пристроєм, який можна застосувати як засіб автоматизації ТПП і, разом з тим, як засіб реалізації функцій КІС. Такі АК доцільно застосовувати при реалізації ВТ на етапах вхідного контролю технічного стану та при здійсненні вихідних випробувань. Контроль технічного стану МДО включає послідовність таких етапів як вимірювання контрольованих параметрів, визначення виду технічного стану та технічного діагностування.

Впровадження автоматизованих комплексів в процесі експлуатації ММК дозволяє:

- реалізувати прогресивні методи технічного обслуговування за фактичним технічним станом на основі прогнозування та попередження відмов;
- реалізувати діагностування та регулювання основних параметрів МДО без демонтажу блоків;
- зменшення трудомісткості та скорочення часу діагностування, а як наслідок, підвищення ефективності експлуатації і МДО, і ММК в цілому.

Зазначені новітні технології необхідно впроваджувати як на експлуатаційних підприємствах, так і на підприємствах, що здійснюють ремонт ММК.

Оскільки для здійснення ремонту за ФТС необхідно володіти всією інформацією щодо технічного стану МДО, яку і акумулює КІС, то для отримання початкової інформації потрібно здійснити аналіз системи ремонту, яку можна представити у вигляді топологічної моделі. Структура такої моделі представлена на рис. 1.

Як відомо [2], обсяг ремонтних робіт можна розподілити як роботи поточного ремонту (обслуговування), середнього і капітального ремонтів. Для забезпечення ефективності кожного із видів ремонту при переході на ремонт за фактичним технічним станом використовується інформаційний ресурс щодо ФТС МДО. Як показують результати аналізу техніко-економічних характеристик процесу застосування методу ремонту за ФТС, саму систему ремонту МДО доцільно організувати за наступною структурою: обсяги поточного та середнього ремонтів (обслуговування) виконувати в умовах експлуатаційних підприємств (ЕП), а в нашому випадку – це безпосередньо на ММК, а обсяги капітального ремонту виконувати на спеціалізованих ремонтних підприємствах (РП). Процес реалізації методу ремонту за ФТС базується на використанні інформаційного ресурсу щодо оцінювання функціональних режимів МДО: контроль працездатності, діагностування і прогнозування технічного стану. Інформаційний ресурс для зазначеного методу ремонту має, принаймні, три складові:

- інформація, яка отримана від засобів автоматизованого контролю технічного стану МДО, і яка інтегрується в базах даних КІС (режим контролю працездатності і діагностування);
- інформація, яка оперативним обробляється від засобів контролю технічного стану з метою прогнозування можливих відмов МДО;
- інформація прогнозування відмов за результатами обробки статистичних даних.

Комп'ютеризована інформаційна система необхідна для ефективної організації перспективної системи ремонту та управління автоматизованою виробничою технологією як на експлуатаційних підприємствах, так і на підприємствах з ремонту ММК. Для виконання перерахованих функцій необхідно володіти інформацією щодо технічного стану МДО в процесі експлуатації в контурі ММК – ремонтне підприємство – ММК, а також інформацією щодо зміни техніко-економічних показників виробничої технології ремонту в процесі впровадження засобів автоматизації.

Враховуючи викладене, мета даної статті полягає у проведенні аналізу системи обслуговування та ремонту МДО в замкнутому контурі ММК – ремонтне підприємство – ММК для визначення принципів побудови новітніх технологій ремонту МДО. Для досягнення поставленої мети розроблено топологію

системи обслуговування та ремонту МДО, що розміщується на ММК (рис.1). Як видно із топології, виробнича технологія ремонту є базовою для обслуговування і ремонту, а інформаційна технологія призначена для збору, оброблення та зберігання експлуатаційної інформації та перетворення її в інформаційний ресурс.

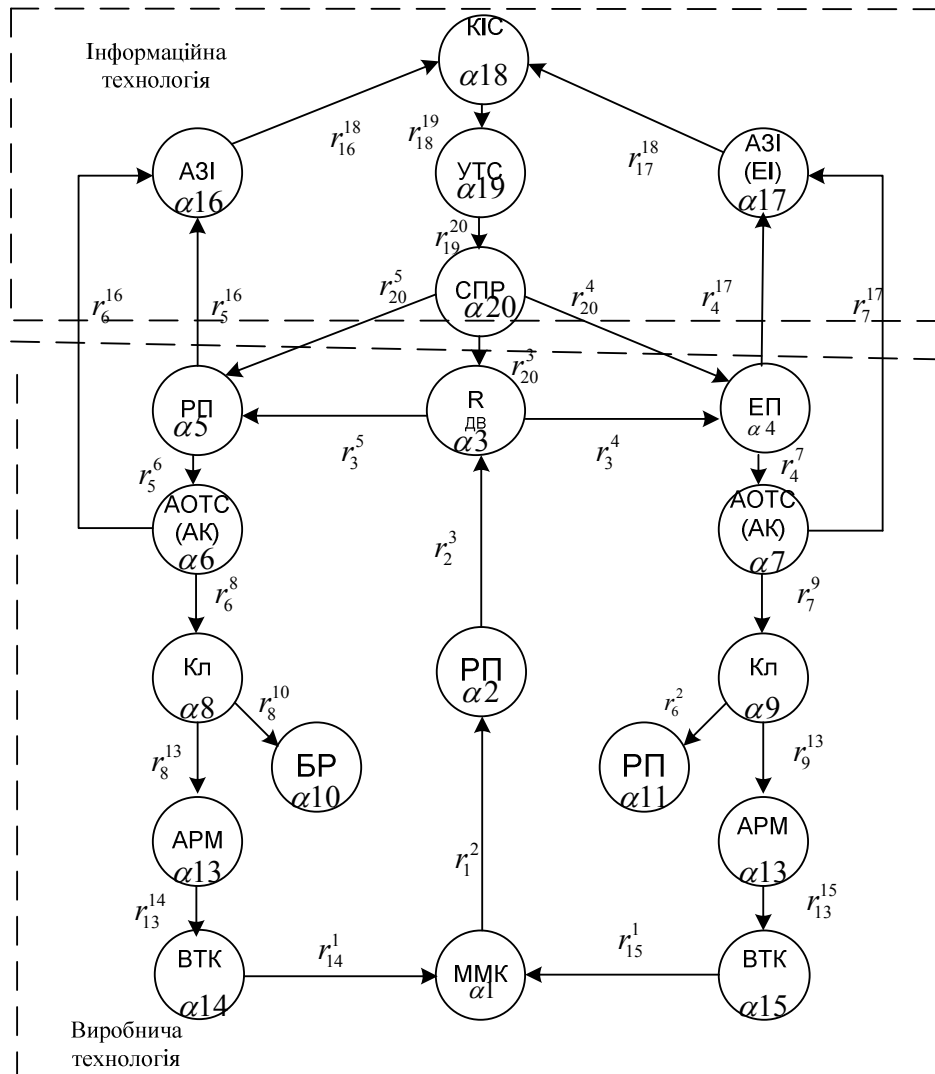


Рисунок 1 – Топологія системи обслуговування та ремонту МДО

На топології кожна з вершин відповідає подіям, які мають місце при експлуатації МДО в замкнутому контурі: ММК – ремонтне підприємство – ММК. Дуги відтворюють причинно-наслідкові зв'язки між відповідними подіями. Необхідно зауважити, що вершини та дуги такої топології не є ідентичними в розумінні ступеню важливості при функціонуванні системи, яка розглядається. Проаналізуємо за допомогою топологічної моделі взаємозв'язок виробничої технології з інформаційною, які пропонується впровадити як на експлуатаційних підприємствах, так і на підприємствах, що здійснюють ремонт МДО. Управління процесом переміщення МДО при експлуатації здійснюється системою прийняття рішень (СПР) (вершина  $\alpha 20$ ), функціональна основа якої побудована на використанні інформаційного ресурсу, який формується в КІС (вершина  $\alpha 18$ ). Початкова експлуатаційна інформація в КІС поступає із підсистем автоматизованого збору інформації (АЗІ, вершина  $\alpha 17$ ). На вершину  $\alpha 17$  поступає інформація з експлуатації МДО (вершина  $\alpha 1$ ). Початкова інформація в КІС (дуги  $r_{16}^{18}$ ,  $r_{17}^{18}$ ) перетворюється в інформаційний ресурс. Наприклад, для системи прийняття рішень ( $\alpha 20$ ) інформаційний ресурс представляється:

- розрахунком обслуговування і ремонту МДО;
- алгоритмом управління технічним станом (УТС) (вершина  $\alpha 19$ );

розрахунком обсягів ремонтних робіт  $V_{pp}$  ;

розрахунком обсягів ремонтних групових комплектів  $V_{дгк}$  .

Таким чином, для топології дуги ( $r_{16}^{18}$ ,  $r_{17}^{18}$ ) ідентифікують формування інформаційного ресурсу для побудови керуючих алгоритмів в системі прийняття рішень.

В якості таких алгоритмів можуть бути:

планування обсягів ремонтних робіт, обсягів ремонтних групових комплектів, обсягів запасного обладнання як для ЕП, так і для РП;

доцільний (економічно обґрунтований) розподіл МДО для обслуговування і ремонту між ЕП та РП. При цьому, формується два потоки МДО. Один потік організується для обслуговування на ЕП (вершина  $\alpha 4$ ), а другий потік організується для ремонту на РП (вершина  $\alpha 5$ ).

На основі викладеного, визначимо, що практична реалізація функцій КІС та СПР організує інформаційну технологію процесу ремонту МДО за фактичним технічним станом. Виробнича технологія процесу експлуатації МДО об’єднує функціональні властивості технологічних процесів обслуговування і ремонту. Накопичення МДО здійснюється безпосередньо на ММК (експлуатаційних підприємствах (вершина  $\alpha 1$ )). Таке МДО характеризується станом відмови. За керуючим рішенням (дуга  $r_{20}^4$ ) системи прийняття рішень (вершина  $\alpha 20$ ) МДО проходить процедуру оцінювання технічного стану (ОТС) – вершина  $\alpha 7$ . Після виконання цієї операції та у відповідності з необхідністю виконання планових обсягів ремонтних робіт МДО розподіляються класифікатором (Кл -вершина  $\alpha 9$ ) за рівнями ремонту та обслуговування.

Таким чином, формуються два потоки МДО, один з яких містить у собі обладнання, ремонт та обслуговування якого доцільно проводити на ММК (дуга  $r_9^{13}$ ), а другий (дуга  $r_9^{11}$ ) – МДО, ремонт і обслуговування якого доцільно виконувати на РП – вершина  $\alpha 11$ . Як уже зазначалось, на етапі виробничого процесу  $\alpha 3$  здійснюється розподіл МДО для РП (вершина  $\alpha 5$ ) і для ЕП (вершина  $\alpha 4$ ). Для кількісних розрахунків доцільності ремонту на РП або ЕП вводиться коефіцієнт ефективності ремонту, аналітичне представлення якого має вид:

$$K_{ef} = \frac{\tau_n \lambda_1 t_{np} (t_{pc} K_{кр} - t_{pm}) C_{рем}}{\lambda_2 t_{pc} (t_{mp} t_{рем}) C_{вир}}$$

де  $\lambda_1$  – інтенсивність відмови ДВ 1-ої категорії;  $\lambda_2$  – інтенсивність відмови ДВ, що пройшла капітальний ремонт;  $t_{np}$  – час простою МДО через відмову виробу;  $t_{pm}$  – міжремонтний ресурс виробу;  $K_{кр}$  – кількість проведених капітальних ремонтів до моменту відмови;  $t_{mp}$  – час транспортування ДВ від РП до ЕП і назад;  $t_{рем}$  – час проведення ремонтних робіт;  $C_{рем}$  – вартість ремонту;  $C_{вир}$  – вартість виробу з урахуванням транспортування.

Встановлено, якщо  $K_{ef} < 1$ , то МДО доцільно ремонтувати в умовах ЕП, якщо ж  $K_{ef} > 1$ , то МДО відправляється для ремонту до РП. Реалізація процедури розподілу МДО для ремонту та розрахунок обсягу ремонтних робіт здійснюється на основі інформації про технічний стан МДО. Така інформація і складає основу комп’ютеризованої інформаційної системи

Оскільки автоматизована оцінка ТС виконується на автоматизованому комплексі (АК) – вершина  $\alpha 7$ , то інформація про ТС апаратури (дуга  $r_7^{17}$ ) поступає в підсистему збору інформації (АЗІ). В цю ж підсистему паралельно надходять дані щодо кількості та номенклатури обладнання, що демонтується (дуга  $r_4^{17}$ ), та інформація (ЕІ – вершина  $\alpha 17$ ) щодо ТС виробів, яка формується в процесі експлуатації ( $\alpha 1$ ). Інформація із  $\alpha 17$  поступає в КІС системи ремонту і обслуговування (вершина  $\alpha 18$ ). Ремонтні роботи в РП виконуються на автоматизованому робочому місці (АРМ) – вершина  $\alpha 13$ . Після перевірки відремонтованого обладнання у відділі технічного контролю (ВТК) – вершина  $\alpha 15$ , вони відправляються на експлуатацію. Вироби для РП групуються у потоки відповідно рівням ремонту і обслуговування. Ці вироби у сукупності з виробами (дуга  $r_2^3$ ), що на РП (вершина  $\alpha 2$ ), створюють матеріальний потік ( $r_3^5$ ), який надходить на ремонт. Ремонт і обслуговування на РП здійснюється за етапами, що аналогічні відповідним етапам в ЕП. Додатковим є те, що класифікатором виділяється та частина виробів (дуга  $r_8^{10}$ ), ремонт і обслуговування якої недоцільний, тобто для подальшої експлуатації вироби бракуються (БР –

вершина  $\alpha_{10}$ ). Динамічні характеристики процесу переміщення матеріальних потоків у контурі ММК – ремонтне підприємство – ММК характеризують рівень рентабельності і ступінь автоматизації виробничої технології. Аналіз топології системи обслуговування і ремонту є основою для формування задачі побудови перспективних виробничої та інформаційної технологій ремонту МДО для застосування на мобільних медичних комплексах.

#### **Висновок**

1. З практичної точки зору, для мобільних медичних комплексів, в залежності від вирішення задач експлуатації, можливі наступні варіанти застосування новітньої системи ремонту за ФТС. Якщо ставиться задача, що в процесі експлуатації достатньо проводити тільки роботи з обслуговування, то доцільно для організації системи ремонту застосовувати структуру ЕП. Якщо ж необхідно виконувати роботи капітального ремонту, то економічно доцільно застосовувати структуру РП.
2. Таким чином, якщо ремонт МДО здійснюється на мобільних медичних комплексах, то економічно доцільно, використовуючи сучасні методи та засоби автоматизації (автоматизовані комплекси та автоматизовані робочі місця), комп'ютеризації, впроваджувати новітні виробничу та інформаційну технології, які забезпечують перехід на ремонт МДО за фактичним технічним станом, що, в свою чергу, сприяє підвищенню рівня експлуатаційної надійності та готовності мобільних медичних комплексів.

#### **Список літератури**

1. Кузовик В.Д. Методика оцінювання рівня якості процесу ремонту медичного обладнання / В.Д. Кузовик, Л.О. Кошева, В.Л. Кучеренко // Системи обробки інформації. – 2011. – №6(96). – С. 64-67.
2. Кучеренко В. Автоматизована виробнича технологія ремонту для забезпечення якості експлуатації медичного діагностичного обладнання / Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. № 06 (82). – С. 216-220.

#### **Відомості про авторів**

**Кузовик Вячеслав Данилович** – д.т.н., проф., завідувач кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини, Національний авіаційний університет, просп. Космонавта Комарова, 1. м. Київ, 03058. тел: 044406-71-98, e-mail: bikam\_nau@mail.ru.

**Кучеренко Валентина Леонідівна** – асистент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини, Національний авіаційний університет, просп. Космонавта Комарова, 1. м. Київ, 03058. тел: 044406-74-42, e-mail: kvl20@yandex.ru.

УДК 615.471:616

С. В. ПАВЛОВ, С. Н. ПЕРЕГУДОВ, А. Ф. ЯНЕНКО

Винницький національний технічний університет, г. Вінниця  
Національний технічний університет України "КПІ", г. Київ**ГЕНЕРАТОР НА ИНФРАКРАСНЫХ СВЕТОДИОДАХ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОЙ ТЕРАПИИ**

**Анотація.** Розглядається тепловий генератор шуму, в якому температура робочого тіла підтримується за допомогою джерела інфрачервоного випромінювання. Дане рішення дозволяє поліпшити характеристики медичної апаратури, призначеної для міліметрової терапії.

**Ключові слова:** генератор шуму, світлодіод, інфрачервоне випромінювання, міліметрова терапія.

**Аннотация.** Рассматривается тепловой генератор шума, в котором температура рабочего тела поддерживается при помощи источника инфракрасного излучения. Данное решение позволяет улучшить характеристики медицинской аппаратуры, предназначенной для миллиметровой терапии.

**Ключевые слова:** генератор шума, светодиод, инфракрасное излучение, миллиметровая терапия.

**Abstract.** The thermal noise generator is considered. The temperature of working body is supported by the source of infra-red radiation. This allows to perfect medical apparatus for millimeter wave therapy.

**Keywords:** noise generator, LED, infrared, millimeter therapy.

**Введение**

Электромагнитное излучение миллиметрового (мм-) диапазона длин волн широко применяется в различных областях науки, техники, а также в новых технологиях практической медицины. В последнее время наметилась стойкая тенденция снижения мощности используемых сигналов до уровня  $10^{-9}$ - $10^{-12}$  Вт [1, 2]. Кроме того, регистрируемое при помощи радиометрических систем слабое излучение физических и биологических объектов в мм-диапазоне длин волн позволяет получить о них дополнительную информацию. Для повышения достоверности таких исследований, необходимы широкополосные генераторы электромагнитного шума (ГЭШ) мм-диапазона.

Однако значения интенсивности излучения известных генерирующих устройств [3] существенно превышают рекомендуемые уровни, что усложняет как процедуру лечения, так и методы биомедицинских исследований. Разработанный генератор теплового шума [4] сопоставим по интенсивности мм-излучения с биологическими объектами, но его инерционность и достаточно большие габариты сильно ограничивают область применения. Таким образом, актуальной представляется разработка портативного, менее инерционного генератора опорных шумовых сигналов.

**Принцип работы и основные параметры генератора**

Отличительной особенностью тепловых ГЭШ является поддержание заданной температуры рабочего тела, которая соответствует определенному уровню мощности электромагнитного излучения в том или ином диапазоне длин волн. В мм-диапазоне рабочим телом является поглотитель волноводной согласованной нагрузки.

Основной вклад в погрешность установления излучаемой мощности вносят система регулировки температуры нагрузки и выходной тракт, обеспечивающий передачу электромагнитных волн между объектами разной температуры. Недостаточная точность и инерционность (до единиц минут) системы регулирования температуры являются сдерживающими факторами, ограничивающими их использование в медицинской аппаратуре, а также в средствах измерений биомедицинских исследований, например, в автоматизированных быстродействующих радиометрических системах [5].

Авторами данной работы разработан и исследован тепловой генератор шумовых сигналов (рис. 1), состоящий из волноводной согласованной нагрузки 1 и содержащей поглотитель (рабочее тело) 2.

Нагревание рабочего тела осуществляется при помощи инфракрасного (ИК) излучения светодиода 3. Температура в этом случае определяется мощностью излучения, которая пропорциональна рабочему току диода  $VD_1$ , устанавливаемому ДРТ.

Для обеспечения теплоизоляции рабочего тела применяется волновод из пластмассы с нанесенным внутри тонким слоем металла 4. Винт настройки 5 предназначен для согласования генератора с внешней нагрузкой. В результате на выходе 6 генератора в антенне WA1 имеем заданный уровень мощности электромагнитного излучения.

Для стационарного режима работы устройства уравнение баланса мощностей можно записать следующим образом

$$P_0 = P_r + P_c, \quad (1)$$

где  $P_0$  – мощность инфракрасного излучения светодиода 3, рассеиваемая в рабочем теле 2;

$P_r$  – мощность, излучаемая рабочим телом в мм-диапазоне, для случая полного согласования выхода генератора с внешней нагрузкой;

$P_c$  – тепловая мощность, рассеиваемая в корпусе 1.

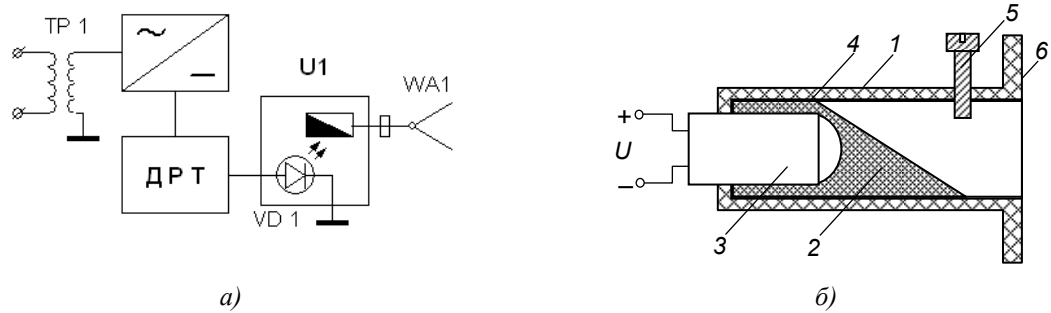


Рисунок 1 – Структурная схема генератора для миллиметровой терапии (а) и конструкция его излучающей головки (б):

ДРТ – дискретный регулятор тока, VD1 – ИК излучающий диод, U1 – преобразователь оптического излучения в миллиметровое (волноводная нагрузка), WA1 – излучающая антенна.

Величина  $P_0$  определяется коэффициентом серости материала рабочего тела  $\beta$  и мощностью ИК-излучения диода  $P_{IR}$ , зависящей от его тока.

$$P_0 = \beta P_{IR}(I) \quad (2)$$

Значение  $P_c$  можно найти из уравнения Фурье для изотермической поверхности теплоизолирующего слоя с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  и градиентом температуры  $\nabla T$

$$P_c = \lambda \nabla T \Sigma_0 \quad (3)$$

где  $\Sigma_0$  – общая поверхность контакта рабочего тела с волноводом.  
В результате из уравнений (1)-(3) получаем

$$P_r = \beta P_{IR}(t) - \lambda \nabla T \Sigma_0 \quad (4)$$

С другой стороны согласно закону Стефана-Больцмана

$$P_r = \sigma (T_1^4 - T_0^4) \Sigma \quad (5)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана;

$T_1$  – температура рабочего тела;

$T_0$  – температура окружающей среды;

$\Sigma$  – площадь излучающей поверхности.

Учитывая, что в данном генераторе  $T_1$  и  $T_0$  отличаются незначительно, их разность можно определить из (3) и (4) следующим образом

$$T_1 - T_0 \approx \frac{1}{4\sigma T_0^3 \Sigma} [\beta P_{IR}(t) - \lambda_0 \nabla T \Sigma_0] \quad (6)$$

Для одномодового режима прямоугольного волновода с типом колебаний  $H_{10}$  с учетом (6) можно получить выражение для спектральной плотности мощности шума рассматриваемого генератора

$$p = A(T_0, \beta) P_{IR}(t) - B(T_0, \lambda) \nabla T \frac{\Sigma_0}{\Sigma}, \quad (7)$$

где  $A(T_0, \beta)$  и  $B(T_0, \lambda)$  – некоторые функции, зависящие от температуры окружающей среды и тепловых свойств рабочего тела и корпуса волновода, которые можно рассчитать по формуле (6).

Как следует из приведенного уравнения для увеличения динамического диапазона регулирования мощности ГЭШ необходимо уменьшать соотношение поверхностей  $\Sigma_0/\Sigma$  и градиент температуры в теплоизолирующем корпусе устройства.

### Конструкция генератора и результаты экспериментальных исследований

В процессе работы было исследовано излучение в мм-диапазоне различных светодиодов инфракрасной ( $\lambda = 920\text{нм}$ ), видимой части ( $\lambda = 610\text{нм}$ ) и начала ультрафиолетовой ( $\lambda = 403\text{нм}$ ) частей оптического спектра. В результате эксперимента не зарегистрировано электромагнитного излучения, генерируемого в мм-диапазоне конструктивными частями диодов в результате их нагревания.

В то же время нанесение тонкого слоя поглощающего материала (ферроэпоксида) на линзу инфракрасных светодиодов обеспечивает генерации электромагнитного шума, интенсивность которого сравнима с известными тепловыми генераторами, применяемыми в медицине и биомедицинских исследованиях. Наивысшая интенсивность мм-излучения наблюдалась для диода 3Л107Б. Измерения проводились на аттестованной высокочувствительной радиометрической системе частотного диапазона 37-53 ГГц.

Указанный светодиод был использован в качестве источника инфракрасного излучения 3 разработанного генератора для миллиметровой терапии. Данный генератор может также применяться для градуировки радиометрических систем, в том числе, и автоматизированных [5].

На рис. 2 приведена частотная зависимость относительной интенсивности  $S/S_0$  мм-излучения генератора (здесь  $S_0$  – максимальное значение интенсивности). Характеристика имеет неравномерность, 2 дБ, что позволяет использовать генератор не только как медицинский прибор, но и в качестве источника эталонного электромагнитного шума.

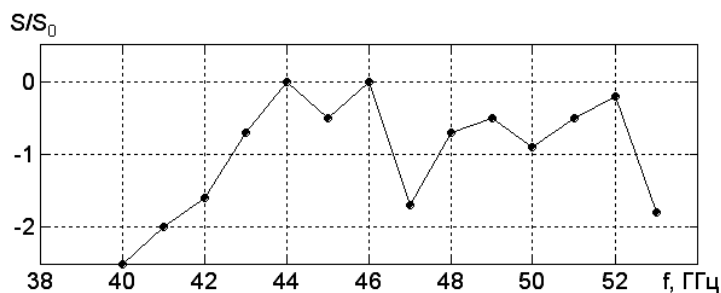


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика генератора

На рис. 3 показана зависимость избыточной спектральной плотности мощности излучения  $(p - p_0)$  от тока диода  $I$  (здесь  $p_0$  соответствует  $I = 0$ ). Как видно, зависимость практически линейна.

Кроме того, проведенные исследования показали существенное увеличение мощности при токах, превышающих паспортное значение – 100 мА. Вместе с тем вплоть до 200 мА не наблюдалось заметного увеличения отказов светодиодов.

Учитывая, что представляемый генератор относится к классу медицинской аппаратуры, отказ которой не приводит к снижению уровня безопасности пациента и обслуживающего персонала, можно рекомендовать применение режима рабочих токов выше 100 мА. Вместе с тем для повышения надежности медицинской аппаратуры, в которой применяется генератор, можно использовать его резервирование или импульсный режим работы.

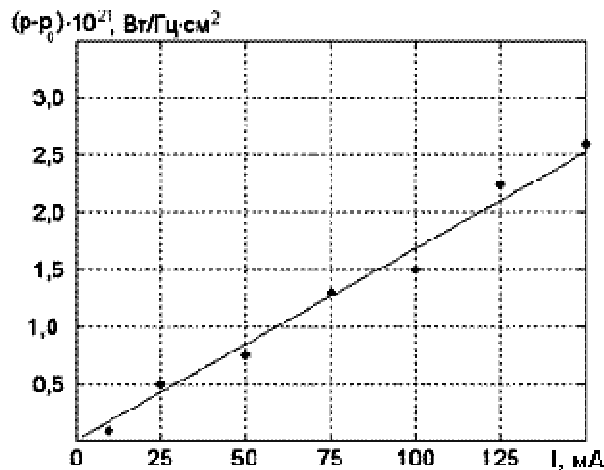


Рисунок 3 – Регулювальна характеристика генератора

### Выводы

1. В результате проведенных исследований был разработан генератор для миллиметровой терапии на основе инфракрасного светодиода, что значительно упрощает соответствующую медицинскую аппаратуру и снижает ее себестоимость.
2. Предложенный генератор является малогабаритным устройством и обладает меньшей инерционностью, чем аналоги.
3. Измерения показали, что избыточная спектральная плотность интенсивности излучения генератора может достигать  $3 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц·см<sup>2</sup>, имеет неравномерность не более 2 дБ в диапазоне частот 41-54 ГГц и практически линейно зависит от рабочего тока диода.
4. Приведенные характеристики позволяют использовать разработанный генератор в качестве источника эталонного электромагнитного шума при калибровке радиометрических систем мм-диапазона.

### Литература

1. Скрипник Ю. А., Яненко А. Ф., Манойлов В. Ф., Куценко В. П., Гимпилевич Ю. Б. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов. – Житомир: Вольнь, 2003. – 406 с.
2. Ситько С. П., Скрипник Ю. А., Яненко А. Ф. Аппаратное обеспечение современных технологий квантовой медицины. – Киев: ФАДА ЛТД, 1999. – 200 с.
3. Ситько С.П. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины / С.П. Ситько, Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко ; под ред. С.П. Ситько. – К.: ФАДА, ЛТД, 1999. – 199 с.
4. Skripnik Yu., Krasuk A., Manoylov V., Peregudov S., Yanenko A. Increased accuracy of measurement of high-sensitivity mm-range radiometric equipment intended for medical-biological application. // Proceedings of 10th IMEKO TC7 International Symposium June 30–July 2, 2004, Saint-Petersburg, Russia, – P. 143–148.
5. Перегудов С.Н., Яненко А.Ф. Радиометрическая установка с автоматической регулировкой выходной мощности генератора эталонного шума // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005, № 4. – Т. 1, частина 1, – С. 131-134.

### Сведения об авторах

**Павлов Сергей Владимирович** – д.т.н., профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой общей физики и фотоники, Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина.

**Яненко Алексей Филиппович** – д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоконструирования и производства радиоаппаратуры, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт".

**Перегудов Сергей Николаевич** – к.т.н., доцент кафедры радиоконструирования и производства радиоаппаратуры, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт".

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.89

GOGISHVILI PAATA

Saint Andrew the First Called Georgian University, Georgia, Tbilisi

## DETERMINATION OF THE VEHICLE LOCATION IN CASE OF INCOMPLETE GPS DATA

**Анотація.** Дана робота пропонує рішення для визначення місцезнаходження транспортних засобів у разі неповних даних від GPS і маршруту складної форми. Інформація про місцезнаходження необхідна для прогнозування часу прибуття транспорту на зупинках. Прогнозований час можна показувати на сайтах та інформаційних табло на зупинках, що є важливим для пасажирів, зменшує час очікування і робить рух транспорт передбачуваним.

У роботі пропонується використовувати нейронну мережу для визначення точного місця локації транспорту на ділянках маршруту складної форми і при неповних даних від GPS.

**Аннотация.** Данная работа предлагает решение для определения местоположения транспортных средств в случае неполных данных от GPS и маршрута сложной формы. Информация о местоположении необходима для прогноза времени прибытия транспорта на остановках. Прогнозированное время можно показывать на сайтах и информационных табло на остановках - что крайне важно для пассажиров, уменьшает время ожидания и делает транспорт прогнозируемым.

В работе предлагается использовать нейронную сеть для определения точного местоположения транспорта на участках маршрута сложной формы и при неполных данных от GPS.

**Abstract.** The present paper gives the solution for one particular problem of the transporting system. We determine precise location of the vehicle in case of incomplete GPS data and complex shaped route. Information about real time location is necessary for predicting the arrival time of vehicle on final or intermediate destinations. Predicted arrival times can be shown on information boards and sites in order to reduce wait time of passengers. When GPS data are received rarely, accuracy is low and the route is complicated, determination of the exact location of the vehicle on the route by GPS data is not trivial. The paper suggests using several neural networks, placed in complex shaped segments of the route in order to determine precise location of the vehicle within those segments.

## Introduction

The present paper gives the solution for one particular problem of the transporting system. We determine precise location of the vehicle in case of incomplete GPS data and complex shaped route. Information about real time location is necessary for predicting the arrival time of vehicle on final or intermediate destinations. Predicted arrival times can be shown on information boards and sites in order to reduce wait time of passengers. When GPS data are received rarely, accuracy is low and the route is complicated, determination of the exact location of the vehicle on the route by GPS data is not trivial. The paper suggests using several neural networks, placed in complex shaped segments of the route in order to determine precise location of the vehicle within those segments.

## Formulation of the problem

GPS tracking technology is used in many countries in order to ease the solving of the issues connected with public transport system. GPS tracking technology helps to predict the arrival times precisely and display on the information boards and information sites. It is especially useful for passengers as they will need less time for waiting their transport in rainy and cold days. Many other issues of the transport system can be solved successfully with good tracking system.

Knowing exact real time location of vehicle is the key for all the tasks that arise in transport systems. The location information is transmitted from vehicle to the information centers. The frequency of transmission of the GPS coordinates is important parameter for tracking system. With more frequent transmission of coordinates we can determine the real time location with more precision. The GPS tracking technology is good, but not cheap solution for transport system. Sometimes the frequency of transmission of GPS data is reduced, in order to reduce costs of tracking system. If the accuracy of GPS equipment is not very good, period between two neighbor coordinates of GPS is quite big, the shape of route is complex - the determination of precise location of the vehicle on the route is not trivial task.

The present paper gives the solution for determining vehicle location in case of above mentioned incomplete GPS data and complex shaped routes.

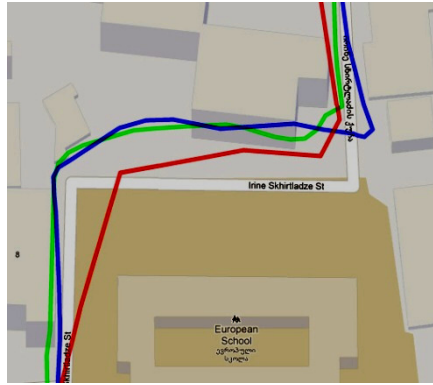
As a tool for solving above mentioned task, we choose the neural network.

## GPS accuracy

GPS data can be not very accurate, see picture 1.

There are 3 GPS tracks of one route. All GPS tracks were been taken with same GPS device. Data are taken in different days.

The error is noticeable. GPS track is not along real route (street). Error is bigger when vehicle moves between big houses or on serpentine roads with high bounds. In this picture we use GPS point frequency about 1-2 seconds. In practice, we have time delay between 2 neighbor points about 30 seconds (and even more in some transport systems).

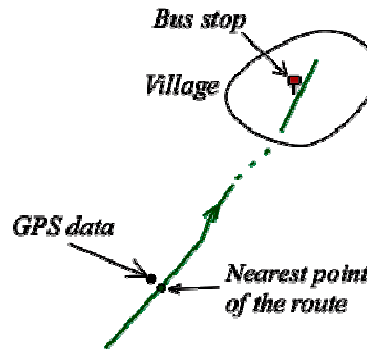


Picture 1 – GPS accuracy

### Different types of the routes

In this paper we assume, that location of the bus is needed in order to predict the arrival time on the bus stop.

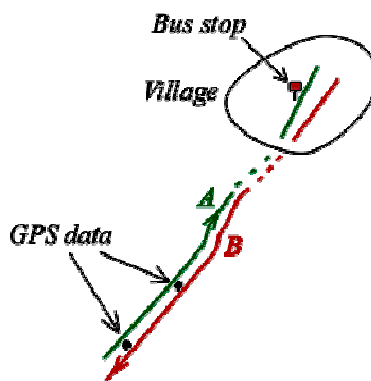
If the route of the vehicle is simple, the location can be determined easily. Assume that we have bus stop in the village and the bus is going from town to village. See picture 2.



Picture 2 – Simple route

Note, that, point received from GPS is not precise location. GPS has level of accuracy and it may be not sufficient in every case when it is used. In this simple case, we can find the point of the route, which is nearest to the point received from GPS device and assume that we found the location. Once we determine the location, we can predict arrival time to the bus stop and show this time on the bus stop board located in the village. I.e. in this case, the nearest point of the route is our solution.

Consider the other situation, which is more common case in real life. See picture 3.



Picture 3 – Common route

In this case, bus can go along two routes:

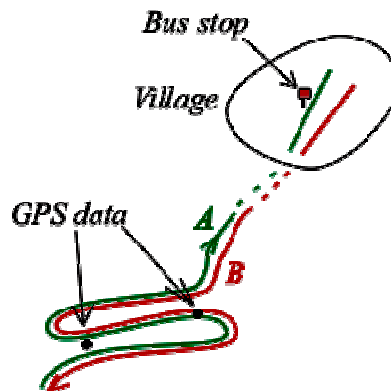
Route to the village,

Route from the village.

At first, we should determine on which route is going the bus. It is obvious, that only one point of GPS data will be insufficient in this situation. We need at least 2 points. Then we should calculate direction of the bus via these two points and compare it with directions of A and B. Comparison of directions of the routes with the direction of the bus is sufficient in order to choose right direction. Note, that directions of moving bus, determined with GPS data (call this direction GPS direction), will not be exactly equal to the direction of route because the GPS data can be not very accurate. So, we should compare GPS direction with both routes and determine closest one.

Consider the other situation. When village located in mountains, there can be serpentine routes to that village. When moving on serpentine routes, GPS receiver accuracy may be less than on straight road and open space.

See picture 4.



Picture 4 – Complex route

In this situation even two GPS points may be insufficient to determine right route of the vehicle. We need more points and new algorithm.

When the route is more complex, more GPS points are needed. The algorithm can be very complex.

In this paper we suggest using the neural networks to determine the location of vehicle in case of complex shaped routes. Our goal was to find the method, which would be work in almost any situation.

#### Neural network for location determination

It is possible to determine the route on which the vehicle is going, if A and B routes and several (4-5) points from GPS are given. Practically in any case, 4-5 points are enough to be sure in correct result. So, we can take neural network and train it for particular, complex shaped part of the route. This network will be responsible only for its part of the route. The output of the neural network will be route A, or route B (or another route, if such exists).

Once the correct route is determined, the exact location on this route can be found without big problems. We will not discuss latter problem in this document.

We use one layer RBF network [1] and [2]. Network has  $n$  inputs  $x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbb{R}$ . If we want to consider  $p$  points of GPS data, we should take neural network with  $n=2p$  inputs.

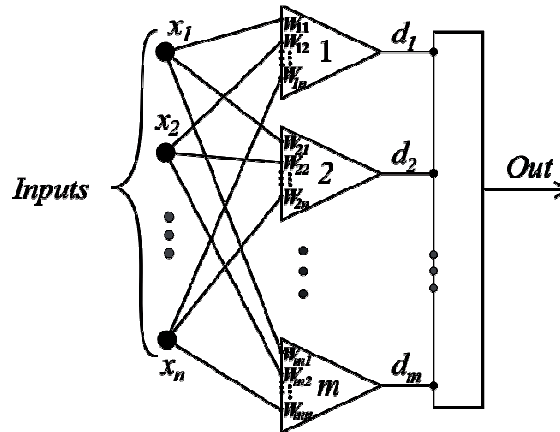
Neural network inputs are connected with neurons of the network. Neuron layer consists of  $m$  neurons. The number of neurons can be taken arbitrary but, note, that small count of  $m$  may be not enough to represent all the combinations of GPS data.

Neurons have  $n$  inputs and  $n$  weights for each input. Neuron calculates Euclidean distance between inputs and weights and gives this distance  $d$  as output of neuron.

We call neuron active neuron, if weights are calculated during learning process.

Decision making process of our neural network includes following steps:

1. Sample vector with  $n$  coordinates  $x_1, x_2, \dots, x_n$  is applied as inputs of the network. If we have 3 GPS points  $(p_{1x}, p_{1y}), (p_{2x}, p_{2y}), (p_{3x}, p_{3y})$  the 6 inputs of the neural network will be  $x_1 = p_{1x}; x_2 = p_{1y}; x_3 = p_{2x}; x_4 = p_{2y}; x_5 = p_{3x}; x_6 = p_{3y}$ .



Picture 5 – Neural network

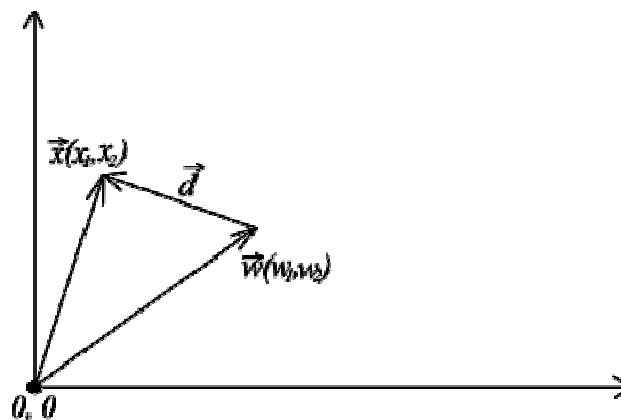
2. All the inputs of the network are connected with all the neurons of the network. First input of network is connected with first input of all the neurons, the second input of network is connected with second input of all the neurons, ..., ...so, the inputs of all the neurons will be the same  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .
3. All the active neurons make decision, i.e. calculate Euclidean distance  $d$  between inputs and corresponding weights and give this distance as neuron output.
4. The winner is the active neuron with minimal distance  $d$ .
5. The answer of the neural network is the index of the winner neuron if the output of this neuron is less or equal to  $v$  (neuron visibility). The answer of the neural network will be undefined if all the neuron outputs are more than  $v$ .

Each active neuron is associated with route A or route B (or other route if such exists). The answer of neural network is particular route. Finding location of the bus is much easier process when particular route is found.

#### Neural network learning

Several active neurons are needed inside neural network in order to get network answer. Active neurons are neurons which weights are obtained during neuron training (learning) process. We get  $p$  GPS points in order to determine corresponding route, compose  $n$  inputs for network and make network to learn this input vector. I.e. we have so called "learning with teacher" process. Particularly learning process includes following steps:

1. We put input vector into neural network inputs.
2. Network inputs are distributed to active neurons.
3. Active neurons calculate their outputs.
4. If minimal output is less or equal than *neuron visibility*, we slightly modify neuron weights – made them closer to input vector.
5. If minimal output is more than *neuron visibility*, or there are no active neurons yet, we take free (not active) neuron and made its weights equal to initial vector. This free neuron becomes active neuron.

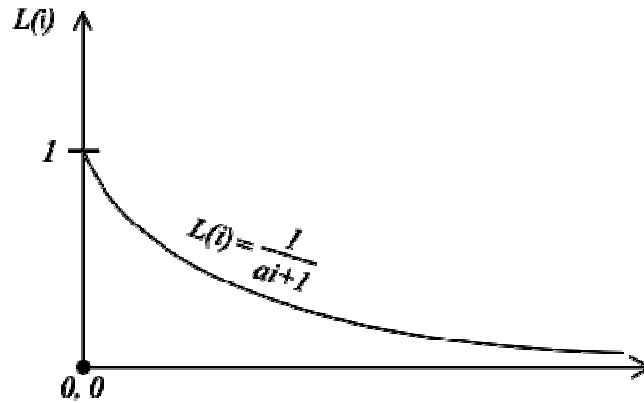


Picture 6 – Neural network learning

The weights of the active neurons are modified during learning process. New weights are obtained from old weights, input vector and the learning step counter. Each neuron has own counter. The counter increases by 1 after each learning step of the neuron. Modification vector size became smaller when learning counter increases.

$$\vec{w}_{i+1} = \vec{w}_i + L(i) \cdot (\vec{x}_i - \vec{w}_i)$$

$\vec{w}_{i+1}$  are the new weights,  $\vec{w}_i$  old weights,  $\vec{x}_i$  input vector,  $i$  is learning counter of the neuron,  $L(i)$  can be arbitrary decreasing function. We choose  $L(i) = \frac{1}{a \cdot i + 1}$ .



Picture 7 – Neural network

#### Summary

When we need to find vehicle location on the route, at first we need to find the correct route (if there are several routes near coordinates received via GPS). The route is found via neural network. The radial based function network is used to find the route. For each complex shaped route we take one network and this network is responsible for that region of the route.

We take the data about routes of buses and minibuses in Tbilisi. Time between neighbor GPS points is about 25 seconds. Network with 100 neurons are enough for every complex part of route.

Our approach is simple and effective. The training process is trivial in almost any type of route. The network is trained via real GPS data, therefore, recognition is good.

In more complex cases, we suggest to add the GPS point time data to neural network inputs. In that case, scale the time coordinate in order to make them close to spatial coordinate values.

#### References:

1. Simon Haykin: Neural Networks, A comprehensive Foundation // Prentice Hall, Second Edition. 1999. P 256-312.
  2. Michael A. Arbib: The Handbook of Brain Theory and Neural Networks // Massachusetts Institute of Technology, The MIT Press, Second Edition. 2003. P 937-940.
- Article received: 14.11.12.

#### Information about author:

**Paata Gogishvili**, Master of Physics, III level (PhD) student of Saint Andrew the First Called Georgian University, Georgia, Tbilisi, Chavchavadze st. 53a, building 2. Tel +995 599 185534, email paatagog@gmail.com

## УДК 004.9

Д. С. ЗАМЯТІН, О. С. КЕБКАЛО, Л. І. ЛУКАШЕВСЬКА, А. Ю. МИХАЙЛЮК, О. С. МИХАЙЛЮК,  
А. В. ПЕТРАШЕНКО, В. П. ТАРАСЕНКО

НТУУ "Київський політехнічний інститут", М. Київ

### ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОРПОРАТИВНОГО ДОКУМЕНТО-ОРІЄНТОВАНОГО СХОВИЩА ДАНИХ ОСВІТНЬОЇ УСТАНОВИ

**Анотація.** Пропонується концепція організації універсального програмного середовища, призначеного для формування відомчого документо-орієнтованого сховища даних навчального закладу з подальшою можливістю індивідуального конструювання засобів бізнес-логіки, загалом характерної для освітньої діяльності. В основу концепції ховища слабоструктурованих даних покладена логічна модель «об'єкт-атрибут-значення», яка дозволяє не лише зберігати електронні документи з різними наборами атрибутів, але й забезпечувати можливість оперативної модифікації цих наборів.

**Ключові слова:** інформаційні ресурси навчального закладу, корпоративне сховище даних навчального закладу, документо-орієнтоване сховище даних, сховище слабоструктурованих даних.

**Аннотация.** Предлагается концепция организации универсальной программной среды, предназначенной для формирования ведомственного документо-ориентированного хранилища данных учебного заведения с возможностью индивидуального конструирования средств бизнес-логики, характерной для образовательной деятельности. В основу концепции хранилища слабоструктурированных данных положена логическая модель «объект-атрибут-значение», которая позволяет не только хранить электронные документы с разными наборами атрибутов, но и обеспечивать возможность оперативной модификации этих наборов.

**Ключевые слова:** информационные ресурсы учебного заведения, корпоративное хранилище данных учебного заведения, документо-ориентированное хранилище данных, хранилище слабоструктурированных данных.

**Abstract.** A conception to organizing universal programming environment, intended to form the departmental document-oriented data warehouse of the educational institution, is offered in the article with possibility of individual design of business logic that is generally characteristic for educational activities. The concept of specialized warehouse of semistructured data is based on the logical model "object-attribute-value", which allows not only to store electronic documents with different sets of attributes, but also to provide the possibility of operative modification of these sets.

**Key words:** information resources of the educational institution, corporate data warehouse of the educational institution, document-oriented data warehouse, warehouse of semistructured data.

#### Вступ

Однією з характерних рис освітньої діяльності в суспільстві знань є виражена тенденція до використання переважно електронної форми подання навчальної інформації [1, 2]. Очевидно, це ставить перед системою освіти взагалі, і перед окремими навчальними закладами зокрема, ряд нових завдань, які потребують нагального вирішення. До числа таких завдань безумовно належить формування та упорядкування власного електронного інформаційного ресурсу (ІР) [3]. Частково ця задача розв'язується за рахунок використання специфічного програмного забезпечення (ПЗ) освітнього призначення [4]. Так, у системах дистанційного навчання, електронних підручниках, електронних бібліотеках тощо звичайно передбачають вбудований інструментарій для підтримки власного ІР. Однак, використання широкого переліку спеціалізованих систем породжує загалом негативне, з точки зору упорядкування інформації, явище технологічної та логічної гетерогенності ресурсу [5, 6]. Крім того, існує надзвичайно великий прошарок інформаційних об'єктів, що залишаються поза сферою впливу традиційних освітніх та офісних комп'ютерних систем [3, 7]. До числа таких об'єктів можна віднести електронні версії учнівських (студентських) робіт, різноманітні презентації, методичні матеріали, наукові розробки, будь-які електронні документи (Д), які з тих чи інших причин не вписуються у технологічний цикл традиційних систем електронного документообігу, і т.п. Ці дані формують окремий, також гетерогенний, інформаційний простір, який є надзвичайно важливим в плані використання у освітній та науковій діяльності учбового закладу, але не забезпечений конкретними ПЗ. Гетерогенність простору обумовлюється не тільки різноманітністю типів об'єктів, а й розмаїттям самих об'єктів одного типу. Об'єкти, що розглядаються, є слабоструктурованими, оскільки їх внутрішня організація залежить від багатьох факторів (тип Д, авторство, час створення тощо). Слід визнати, що перелік таких даних інтенсивно змінюється (в основному, збільшується), у зв'язку з чим використання для їх упорядкування деякої бази з наперед заданою сталою схемою даних не є реальним. Підтримка ж у повній мірі власного динамічного електронного ІР, передусім текстового, засобами стандартних систем керування базами даних сьогодні не під силу пересічним освітнім закладам, принаймні вітчизняним, зокрема з економічних причин [8].

#### Постановка задачі

Тому в контексті глобальної інформатизації освіти актуальною задачею є розробка та впровадження спеціалізованих, орієнтованих на використання в навчальних закладах, сховищ слабоструктурованих даних [9-12]. Далі пропонується підхід і концепція організації універсального програмного середовища, призначеного для формування відомчого документо-орієнтованого сховища даних навчального закладу, на базі якого існує можливість індивідуального конструювання засобів бізнес-логіки, характерної для різних ланок освітньої та наукової діяльності.

### Загальна концепція спеціалізованого документо-орієнтованого сховища даних

В основу концепції спеціалізованого сховища слабоструктурованих даних покладена логічна модель «об'єкт-атрибут-значення», в якій кожна сутність або об'єкт подається певною сукупністю характеристик або атрибутів. Ця модель дозволяє не лише зберігати Д з різними наборами атрибутів, але й підтримувати динамічність цих наборів. Тому інформаційна база системи дозволяє накопичувати та обробляти сутності довільної структури (з довільною кількістю і типами атрибутів) [13].

Окремий ІР у межах сховища розглядається як підмножина документів, де окремий Д — довільний набір атрибутів і їх значень.

Розмежування прав доступу для роботи з ресурсами здійснюється на основі шаблонів. Шаблон — це набір умов для значень атрибутів Д, який дозволяє здійснити відбір потрібного сегменту ресурсів. Завдяки шаблонам групі користувачів можна призначити права в одному режимі роботи (у даному випадку і надалі маються на увазі режими роботи з Д) з одним набором Д, а у другому режимі — з іншим набором Д (певного ІР). Для ПЗ сховища даних (надалі - системи) визначено рівні доступу до ІР (гість, модератор тощо). Кожному рівню доступу відповідає набір режимів роботи, кожному з яких поставлено у відповідність шаблон. Можна призначити різні рівні доступу для різних ІР. Завдяки включенню користувача у довільний набір груп можна вибрати і призначити будь-яку комбінацію рівнів доступу до різних ІР. Відповідність Д певному шаблону визначається динамічно при роботі у кожному з режимів. Тобто, при зміні Д можливе включення або виключення його доступності у будь-якому з режимів для групи користувачів з певним рівнем доступу.

Для користувачів визначено наступні режими функціонування системи:

- додавання і редагування Д;
- перегляду Д;
- адаптивної каталогізації;
- адміністрування.

Режим додавання і редагування Д передбачає:

- створення, редагування, видалення, групування, розгрупування атрибутів;
- додавання, редагування Д (включення і вилучення з них атрибутів, встановлення і редагування значень, збереження змін).

Режим перегляду Д:

- перегляд повного набору атрибутів Д і їх значень;
- перегляд та друк Д у вигляді однієї з форм всіх шаблонів, яким відповідає Д;
- перегляд, друк і завантаження файлів, пов'язаних із атрибутами відповідного типу;
- модерування, закриття, перехід до редагування, вилучення Д;
- перегляд Д, з яким даний пов'язаний асоціативним зв'язком.

Режим адаптивної каталогізації:

- вибір Д для подальшого перегляду;
  - пошук за значеннями і вмістом атрибутів;
  - перегляд звітів обробки Д;
  - систематизація, друк Д.
- Режим адміністрування:
- створення, редагування, видалення інформаційних об'єктів системи (атрибути, шаблони, профілі користувачів та ін.);
  - встановлення порядку відображення атрибутів Д при перегляді і редагуванні набору атрибутів шаблону;
  - конструювання формул, конструювання форм перегляду Д і форм звітів.

Адміністрування організоване таким чином, що для кожного типу інформаційних об'єктів (атрибут, шаблон, форма тощо), які використовуються у системі, можна додавати дозволи на виконання дій над ними. Кожному користувачеві або групі користувачів можна надавати ці дозволи або позбавляти їх. Для груп є можливість надання і позбавлення дозволів і прав на режими роботи з сегментами ІР. Шляхом включення певної категорії користувачів у групу можна автоматично надати їм дозволи і права, які визначені для даної групи. При роботі у кожному з режимів будь-якому користувачеві надаються лише ті можливості, які доступні йому згідно його прав.

### Архітектура програмного забезпечення сховища даних

До складу системи входять наступні підсистеми (ПС) (рис. 1):

*інформаційна база (ПС збереження ІР)*, відповідає за збереження ІР, які використовуються іншими модулями системи;

*ПС адміністрування*, забезпечує підтримку сесій, налаштування шаблонів, розмежування прав у кожному з режимів для різних ІР на основі шаблонів;

*ПС введення даних*, відповідає за наповнення і оновлення інформаційної бази;

*пошукова ПС*, здійснює каталогізацію, реалізує операції пошуку і встановлення асоціативних зв'язків;

*ПС обробки даних*, реалізує аналітичну обробку текстів, обслуговує користувацькі режими обробки Д і статистичну обробку даних;

*ПС візуалізації*, забезпечує формування інтерактивного інтерфейсу для користувача.

Далі подано опис складових частин вказаних підсистем.

*Інформаційна база* включає наступні сегменти даних.

*Сегмент даних про атрибути* — властивості атрибутів (назва, тип, текст підказки, можливість (не)відображення підказки, значення за замовчанням, порядок у списку атрибутів при перегляді, параметр для задання групових атрибутів та ін.), з яких складаються Д.

*Сегмент Д - Д*, які можуть належати до різних їх категорій.

*Сегмент освітніх IP різного формату* — файли, які можна пов'язувати зі значеннями атрибутів типу «Файл» Д (навчально-методичні матеріали, фото і т.д.) і які можуть бути довільного формату.

4) *Сегмент адміністративних даних* – інформація про користувачів (профілі користувачів): логін, пароль, прізвище, ім'я, e-mail, привілеї (активність, статус персоналу, статус суперкористувача, дозволи на виконання дій над інформаційними об'єктами), останній вхід, дата приєднання, входження у групи тощо. Статус суперкористувача визначає, що такий користувач має всі дозволи без їх точного зазначення. Тут також міститься інформація: про групи користувачів, для яких можна визначити права на виконання дій над інформаційними об'єктами системи (наприклад, на додавання, редагування і видалення атрибутів) та права на режими роботи з відповідними IP (ресурс публікацій, ресурс педагогічного досвіду тощо), які визначаються умовами шаблонів; про підтримку шаблонів — умови

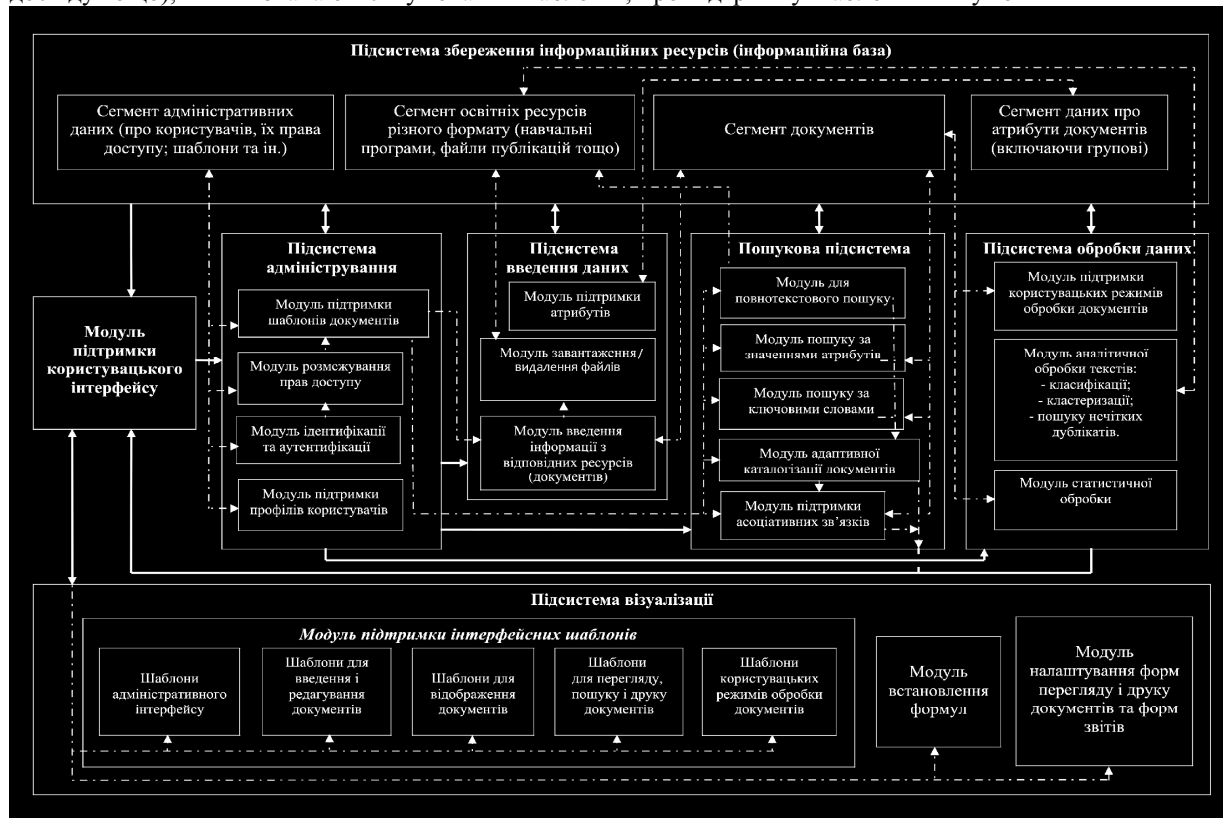


Рисунок 1 - Архітектура програмного забезпечення сховища даних навчального закладу

шаблонів, порядок відображення атрибутів для кожного шаблону; про параметри відображення форм перегляду Д та форм звітів, параметри звітів (формули). Для кожного шаблону або виду звіту можна створювати форми, у параметрах відображення яких задається інформація про координати розміщення і розміри блоків для атрибутів і їх значень (для форм Д) або для результатів звітів, а також для блоків міток.

*ПС адміністрування* має наступні складові.

*Модуль підтримки профілів користувачів* — дозволяє створювати, редагувати і видаляти профілі користувачів.

*Модуль ідентифікації та аутентифікації* — забезпечує можливість введення користувачем логіну і паролю та встановлення відповідності користувача пред'явленому ним ідентифікатору шляхом співставлення введених значень з інформацією, наявною у сегменті адміністративних даних.

*Модуль розмежування прав доступу* — у відповідності з правами доступу надає користувачеві можливість роботи у доступних режимах з доступними ІР системи, які визначаються умовами шаблонів. Для системи визначені наступні режими роботи з Д: *додавання, редагування, модерування, перегляд*. Режим модерування призначений для контролю за правильністю введених даних. Право на модерування надає користувачеві можливість обмежити доступність редагування певного набору Д для групи інших користувачів, після перевірки на коректність введених ними значень атрибутів. Таким чином, користувач системи, у обов'язки якого входить лише введення даних для певного сегменту ІР, може редагувати доступні йому Д доти, доки їх не перевірить і не зафіксує (промодерує) відповідальна особа.

*Модуль підтримки шаблонів* — дозволяє додавати, редагувати і видаляти шаблони і умови для них, здійснювати відбір Д, відповідних певному шаблону, а також визначати порядок відображення атрибутів для наборів Д, які відповідають певному шаблону. Для шаблону можна задавати умови не лише для значень атрибутів, які доступні для режиму редагування, але й атрибутів, які мають адміністративний характер («Модерування», «Власник»). Завдяки цьому забезпечується функціонування режиму модерування і фільтрація Д, створених певним користувачем, з метою надання йому прав лише на роботу із сегментом власних Д у визначеному режимі.

*ПС введення даних* включає наступні модулі.

*Модуль підтримки атрибутів* — дозволяє створювати, редагувати і вилучати атрибути з усіма їх властивостями, групувати і розгрупувати атрибути для користувачів, у яких є дозвіл на зміну інформаційних об'єктів даного типу. Аналогічні можливості надаються у підсистемі адміністрування, але на відміну від підсистеми введення даних з дещо іншою логікою діалогу і ширшими можливостями та зручнішими інструментами для відбору необхідних атрибутів (сортування за певними полями, пошук за назвою, фільтрація за типом).

*Модуль введення Д* — дозволяє вводити і редагувати Д для різних ІР. Конкретний користувач може вводити (редагувати) лише ті Д, які відповідають шаблону, визначеному для режиму введення (редагування) для груп, у які включений даний користувач. При введенні даних користувачеві пропонується обрати шаблон, після чого відображається певний набір атрибутів, який динамічно формується у базі даних у процесі перебору всіх існуючих Д. Таким чином, набір атрибутів шаблону — це сукупність всіх існуючих атрибутів збережених Д, котрі відповідають обраному шаблону. Додавання нового атрибуту в Д призводить до появи даного атрибуту у наборах атрибутів всіх шаблонів, яким відповідає вказаний Д. Якщо при зміні значення одного з атрибутів Д атрибут втрачає відповідність певному шаблону, то атрибути даного Д не враховуються при формуванні набору атрибутів даного шаблону. До Д можна включати атрибути, які уже присутні, для введення декількох значень для одного атрибуту.

*Модуль завантаження/видалення файлів* — дозволяє завантажувати з файлової системи на сервер і видаляти зі сховища освітні ІР або довідкові файли, які пов'язуються зі значеннями атрибутів типу «Файл», при введенні і редагуванні Д. У режимі перегляду модуль забезпечує завантаження з серверу необхідних файлів для детальнішого ознайомлення з їх змістом.

*ПС пошуку* містить наступні модулі.

*Модуль адаптивної каталогізації* — систематизує Д сховища, надає структуровану інформацію про Д і можливість її застосування для подальшого пошуку, забезпечує доступ до Д за атрибутами. Перегляд Д здійснюється через каталог, у якому відображається той набір Д, який доступний користувачу у цьому режимі згідно його прав. Будь-який з Д, доступних для перегляду, може мати довільний набір атрибутів. Користувачеві надається список всіх атрибутів, що присутні у доступному для перегляду наборі Д. При виборі атрибуту відображається список всіх його можливих значень у алфавітному порядку серед всіх Д набору, які можуть бути використані для подальшого пошуку. Список атрибутів змінюється відповідно до зміни набору Д.

*Модуль для повнотекстового пошуку* — дозволяє здійснити пошук серед файлів, які пов'язуються з Д. Даний модуль також має реалізувати пошук за ключовими словами у тексті файлів Д і використовувати порядок відображення результатів, який залежить не лише від частоти входження вказаних слів, але і від інших критеріїв, які підвищують релевантність пошуку, за рахунок впровадження засобів Text Mining.

*Модуль пошуку за значеннями атрибутів* — дозволяє відфільтрувати Д згідно заданих значень атрибутів. Даний вид пошуку може бути ієрархічним. Таким чином, реалізується операція перетину для множин Д з обраними значеннями атрибутів.

*Модуль пошуку за ключовими словами* — дозволяє знайти Д, у значеннях відповідних атрибутів яких містяться введені користувачем ключові слова (регістронезалежний пошук). Пошук за ключовими словами може здійснюватись для значень довільного набору атрибутів. Таким чином, будуть відібрані ті Д, які мають вказані користувачем атрибути, і у відповідних значеннях яких містяться введені ключові

слова. Пошук може бути комбінований (взаємодіючий). Можна також паралельно використовувати ці два види пошуку (за значеннями атрибутів і за ключовими словами), що забезпечує фільтрацію Д за значеннями і вмістом відповідних атрибутів.

*Модуль підтримки асоціативних зв'язків* — дозволяє знайти за допомогою засобів адаптивної каталогізації ті Д, які пов'язані з обраним, і встановити асоціативні зв'язки за рахунок атрибутів відповідного типу. Якщо у користувача немає прав на перегляд Д, які пов'язані асоціативним зв'язком з доступним, то відповідні атрибути, які встановлюють вказаний зв'язок, взагалі не відображаються.

*ПС обробки даних* включає наступні модулі.

*Модуль підтримки користувацьких режимів обробки Д* — забезпечує реалізацію необхідних користувачеві задач шляхом здійснення операцій (вибірка, фільтрація та ін.) над необхідними наборами Д. В основі лежить використання синтаксичного аналізатора формул і математичних виразів, завдяки чому забезпечується підтримка змінних вимог до проведення обробки інформації. При необхідності здійснення операцій над новоствореним сегментом Д з новими атрибутами відповідальна особа вводить формули з відповідними параметрами, які визначаються логікою обробки.

*Модуль аналітичної обробки текстів* забезпечує наступні процеси.

Класифікацію — групування вихідних понять, наявних у тексті, за будь-якими суттєвими ознаками і розташування їх у певному порядку, що відображає ступінь схожості.

Кластеризацію — логічне продовження класифікації, але класи набору даних заздалегідь невідомі. Призначена для розбиття сукупності об'єктів на однорідні групи.

Пошук нечітких дублікатів (для виявлення плагіату). Забезпечує визначення того, чи фрагменти даного тексту взяті із уже існуючих, тобто наявних у сегменті освітніх ІР інформаційної бази системи.

*Модуль статистичної обробки* забезпечує застосування засобів статистики (статистичних показників, критеріїв) для формування даних, необхідних для звітної документації. *ПС візуалізації* містить наступні складові частини.

*Модуль підтримки інтерфейсних шаблонів* — забезпечує генерацію веб-сторінок з необхідною інформацією і включає наступні групи шаблонів.

*Шаблони адміністративного інтерфейсу* призначені для привілейованих користувачів (адміністраторів). Забезпечують інтерфейс з елементами управління і навігацією, які дозволяють виконувати дії адміністративного характеру. Для кожного типу об'єктів існує форма редагування, яка дозволяє додавати, редагувати і видаляти конкретні записи і список всіх доступних у базі даних об'єктів. У формі редагування для кожного типу значень визначено відповідні елементи відображення (календар для типу «Дата», перемикач для булевого типу тощо). У списку об'єктів забезпечуються зручні візуальні засоби для здійснення пошуку, фільтрації, сортування змінюваних інформаційних об'єктів. При встановленні порядку для атрибутів шаблону здійснюється динамічне відображення набору атрибутів даного шаблону у порядку, який був збережений у базу. Для зміни цього порядку використовується технологія drag-and-drop (перетягування за допомогою миші).

*Шаблони для введення і редагування Д.* Забезпечується відображення атрибутів у встановленому порядку у відповідному вікні з метою надання користувачеві можливості вибору і включення певного атрибуту в Д. Елементи інтерфейсу забезпечують зручний режим введення (редагування) Д за рахунок:

використання динамічного відображення атрибутів, які відповідають обраному шаблону;

спливаючих підказок для введення значень;

різних форм відображення елементів для введення значень атрибутів (перемикачі, прапорці, текстові поля, поля введення, випадаючі списки, поля типу "Файл", спливаючі календарики для введення значень типу "Дата");

діалогових вікон з адаптивною каталогізацією (для атрибутів типу "Асоціативний зв'язок") та ін.

Для кожної з форм відображення елементів введення, якщо значення для доданого в Д атрибуту не було встановлено, атрибут зберігається у Д і доступний при наступному редагуванні без додаткових включень.

*Шаблони для відображення Д.* Атрибути Д відображаються у встановленому модулем підтримки шаблонів порядку. Для певних форматів завантажені освітні ІР можна переглядати у відповідному вікні і здійснювати друк. Всі файли можна завантажувати з серверу, користуючись посиланням. У даному шаблоні перегляду можна відобразити Д у вигляді будь-якої форми інших шаблонів, яким відповідає даний Д, а також роздрукувати форму. Для атрибутів типу «Асоціативний зв'язок» значення відображаються у вигляді гіперпосилання, за допомогою якого можна перейти до перегляду відповідного Д.

*Шаблони для перегляду, пошуку і друку Д.* Наявна посторінкова навігація доступних для перегляду Д. Пошук за ключовими словами полегшується за рахунок використання спливаючих підказок, а пошук за значеннями атрибутів — за рахунок динамічного відображення значень у алфавітному порядку. Для друку обраних Д можна обирати атрибути, значення яких відображені у таблиці для виведення інформа-

## УДК 004.65:504.06

В. Б. МОКІН, Ю. С. БОГОМОЛОВ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

## НОВІ ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО СТВОРЕННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ БАЗИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

**Анотація.** У статті описуються нові підходи до створення технології автоматизованої ідентифікації структури та наповнення геоінформаційної бази екологічної інформації на основі різноформатних даних. Вирішення даної задачі є дуже актуальним у наш час, оскільки обсяг неформалізованої за єдиними принципами інформації постійно зростає. Авторами пропонується підхід до обробки такої інформації із використанням трьох взаємопов'язаних онтологічних баз даних — бази об'єктів, їх атрибутивних та просторових характеристик, відповідно. Запропонована технологія дозволить підвищити релевантність та обсяг результатів пошуку взаємопов'язаної екологічної інформації щодо об'єктів карт ГІС за рахунок використання трьох типів інформаційних моделей даних.

**Ключові слова:** автоматизована ідентифікація структури бази даних, екологічна інформація, геоінформаційні системи.

**Анотация.** В статье описываются новые подходы к созданию технологии автоматизированной идентификации структуры и наполнения геоинформационной базы экологической информации на основе разноформатных данных. Решение данной задачи является очень актуальным в наше время, поскольку объем неформализованной по единым принципам информации постоянно растет. Авторами предлагается подход к обработке такой информации с использованием трех взаимосвязанных онтологических баз данных — базы объектов, их атрибутивных и пространственных характеристик, соответственно. Предложенная технология позволит повысить релевантность и количество результатов поиска взаимосвязанной экологической информации по объектам карт ГИС за счет использования трех типов информационных моделей данных.

**Ключевые слова:** автоматизированная идентификация структуры базы данных, экологическая информация, геоинформационные системы.

**Abstract.** The paper describes a new approach to creating technology of automated identification of the structure and content of a GIS database of environmental information from multiformat data. Solving this problem is very important nowadays, because the amount of informal according to common principles information is growing. The authors proposed an approach to handling such information using three interrelated ontological databases – database of objects, their attribute and spatial characteristics, respectively. The proposed technology will improve the relevance of search results and coherent environmental information on objects of GIS maps through the use of three types of information data models.

**Keywords:** automated identification of the structure of a database, ecological information, geoinformational systems.

## Вступ

Все більша кількість організацій займається екологічними питаннями та дослідженнями у галузі екологічного моніторингу, що призводить до постійного росту обсягу неформалізованої за єдиними принципами інформації, що зберігається у різноформатних джерелах (текстах природною мовою, графіках, таблицях тощо). Саме тому видобування структурованих знань із таких даних, пошук та аналітична обробка цих знань є надзвичайно актуальними задачами сьогодення. Відомо, що для роботи із просторово-орієнтованими даними оптимальним є застосування засобів геоінформаційних систем (ГІС), тому актуальною задачею є ще й прив'язка видобутих знань до об'єктів карт ГІС.

## Постановка задачі

В останні роки все більше уваги приділяється екологічним питанням та аспектам усіх сфер нашого життя та дослідженням в галузі екологічного моніторингу. Цими питаннями займається велика кількість державних та громадських інституцій, наукових та освітніх установ тощо, що призводить до появи величезної кількості, переважно неформалізованої за єдиними принципами, інформації, яку все складніше обробляти, порівнювати між собою, та, відповідно, використовувати для прийняття оптимальних управлінських рішень в галузі управління довкіллям та господарством.

Відповідно Орхуської конвенції про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля, до екологічної інформації відносять будь-яку інформацію в письмовій, аудіовізуальній, електронній чи будь-якій іншій матеріальній формі про: а) стан таких складових навколишнього середовища, як повітря і атмосфера, вода, ґрунт, земля, ландшафт і природні об'єкти, біологічне різноманіття та його компоненти, включаючи генетично змінені організми, та взаємодію між цими складовими; б) фактори, такі як речовини, енергія, шум і випромінювання, а також діяльність або заходи, включаючи адміністративні заходи, угоди в галузі навколишнього середовища, політику, законодавство, плани і програми, що впливають або можуть впливати на складові навколишнього середовища, зазначені вище в підпункті а), і аналіз затрат і результатів та інший економічний аналіз і припущення, використані в процесі прийняття рішень з питань, що стосуються навколишнього середовища; стан здоров'я та безпеки людей, умови життя людей, стан об'єктів культури і споруд тією мірою, якою на них впливає або може вплинути стан складових навколишнього середовища або через ці складові, фактори, діяльність або заходи, зазначені вище в підпункті б).

Одним із важливих аспектів екологічної інформації є її просторова прив'язка, оскільки більшість екологічних даних стосується об'єктів, які є реальними фізичними сутностями (річки, водосховища, джерела скидів, викидів, відходів, місця видалення відходів, заповідники тощо) із певними географічними

ми координатами. Такі об'єкти ще називаються просторовими [1]. А їх характеристики, як правило, поділяють на атрибутивні (різні характеристики, стан тощо) та просторові (географічні координати та інша інформація, яка позиціонує об'єкт на карті) [1]. Світовий досвід довів, що для зберігання та обробки інформації про просторові об'єкти оптимальним є використання геоінформаційних систем (ГІС) та технологій. У той же час, більшість інформації про екологічні об'єкти формується та зберігається у різних форматах: текстова, бази даних, електронні таблиці тощо [2, 3]. Отже, актуальними є методи, технології та засоби поєднання електронних карт ГІС та різноформатної інформації в єдиній системі, яка дозволить зручно та швидко здійснювати пошук та обробляти цю інформацію [2, 3]. Однак, якщо подібні підходи вже існують (наприклад, з використанням онтологічних моделей та баз даних [2-6]), то методи автоматизованого або, краще, автоматичного формування та ідентифікації таких геоінформаційних баз даних ще не розроблені.

Таким чином, постає задача розробки підходів до формалізації за єдиними принципами та розробки інформаційної технології автоматизованої ідентифікації структури та наповнення геоінформаційної бази екологічної інформації на основі різноформатних даних, у в.т.ч. електронних карт ГІС.

### Розв'язання задачі

Існує багато підходів для формалізації різноформатних даних з метою їх подальшої обробки [4, 5]. Найбільш поширеним є застосування онтологічних баз даних [2-4, 6]. Також часто застосовують універсальні пошукові методи та засоби, які створюють індекси для кожного типу джерел даних та здійснюють пошук по створених індексах одночасно [7].

Ідея технології, яка пропонується, полягає, по-перше, в адаптації відомих методів та технологій формалізації різноформатної екологічної інформації шляхом їх автоматизованої прив'язки до просторових об'єктів, з урахуванням відношень між ними. По друге, у формуванні та ідентифікації комплексу із трьох взаємопов'язаних інформаційних моделей:

- модель  $X$  просторових різнотипних об'єктів з певним кодуванням;
- модель  $A_X$  атрибутивних характеристик (знань) цих об'єктів та відношень між ними у вигляді певних аналітичних залежностей та ін.;

- модель  $P_X$  просторових характеристик (знань) цих об'єктів та топологічних відношень між ними.

Такий поділ інформаційних моделей на окремі є подібним до поділу таблиць на окремі таблиці, відповідно до правил нормалізації, із приведенням їх до третьої нормальної форми [8].

У разі використання онтологічних баз даних для формалізації інформації та формування індексних масивів пропонується створювати окремо три бази даних:

База об'єктів та їх простих характеристик (назва, тип, шар карти, унікальні ідентифікатори та інше кодування, умовне позначення на карті тощо).

База просторових характеристик об'єктів (координати, глибина, довжина, геометричні розміри, площа тощо), яка ідентифікується по картах ГІС, та топологічних відношень між ними (об'єкт  $A$  знаходиться на об'єкті  $B$ , об'єкт  $A$  впадає в об'єкт  $B$ , від об'єкта  $A$  до об'єкта  $B$  22 км тощо).

База атрибутивних характеристик (рівень викидів в атмосферу, кількість опадів тощо) та аналітичних відношень між ними (характеристика  $A$  залежить від характеристики  $B$  як залежність  $A = F(B)$  тощо), яка ідентифікується по різноформатних джерелах даних.

Для прикладу розглянемо такі географічні об'єкти як «річка Південний Буг», «річка Соб» та підприємства-джерела стічних вод, які надходять у ці річки. У кожній із трьох баз може зберігатись така інформація:

У базі об'єктів: а) об'єкти із назвами «Південний Буг», «Соб», тип — «річка», їх закодовані унікальні ідентифікатори та умовне позначення у вигляді синьої тонкої лінії тощо; б) підприємства-джерела стічних вод, які здійснюють скиди у води вищезгаданих річок (їх назви, коди та умовні позначення).

У базі просторових характеристик: інформація про довжину обох річок, середню глибину, про те, яка з річок є притокою якої річки (або яка з річок впадає у яку), координати підприємств-джерел стічних вод та в яку річку вони здійснюють скид вод тощо.

У базі атрибутивних характеристик: інформація про рівень забруднення річок по роках чи місяцях, обсяг скидів по кожному джерелу стічних вод, певні аналітичні залежності, наприклад, залежність витрат вод у р. Південний Буг від витрат води (мало- чи повноводності) її притоки р. Соб у місці, де одна впадає в іншу, тощо.

Таким чином, модель геоінформаційної бази екологічної інформації  $I$ , яка може бути ідентифікована та наповнена на основі різноформатних даних, матиме вигляд:

$$I = D\{X, A_X, P_X\},$$

де  $D$  — деяка функція співвіднесення знань щодо атрибутивних  $A_X$  та просторових  $P_X$  характеристик із об'єктом  $X$  на карті ГІС.

Узагальнений алгоритм та етапи застосування інформаційної технології, яка пропонується, подано на рис. 1.

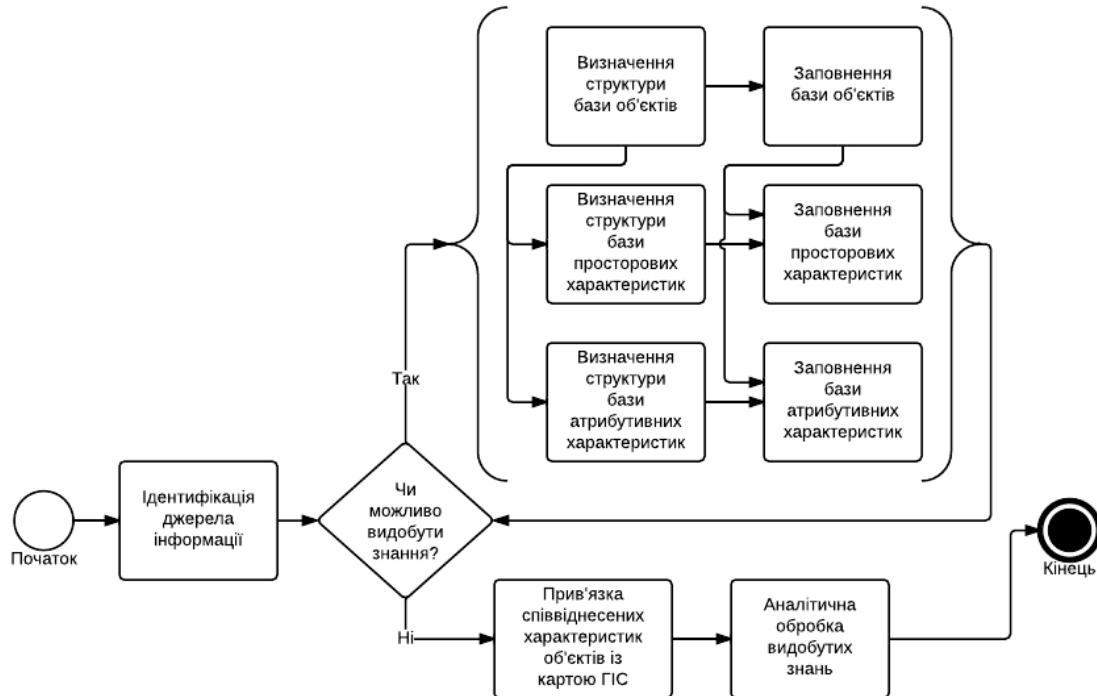


Рисунок 1 — Узагальнений алгоритм застосування інформаційної технології, яка пропонується

Основними етапами алгоритму, зображеному на рис. 1, є наступні:

Ідентифікація джерела інформації. На даному етапі виконується ідентифікація параметрів моделі, що використовується для видобування знань із джерела інформації.

Циклічна ідентифікація та наповнення бази об'єктів, бази просторових та бази атрибутивних характеристик. На даному етапі виконується циклічна перевірка «чи можливо видобути із джерела інформації нові (ще невідомі) знання?», та, за умови позитивної відповіді, виконується уточнення параметрів інформаційних моделей баз об'єктів, їх просторових та атрибутивних характеристик, а також наповнення баз новими видобутими знаннями. Наприклад, на першій ітерації виявляється об'єкт, на другій — ідентифікуються його параметри та топологічні співвідношення з іншими об'єктами, на третій — зв'язок його параметрів з параметрами інших об'єктів тощо.

Прив'язка співвіднесених характеристик до об'єктів карт ГІС. На даному етапі виконується співвіднесення та прив'язка отриманих характеристик із безпосередніми об'єктами карт ГІС, що дозволить використання інструментальних засобів ГІС для обробки цих знань.

Аналітична обробка видобутих знань. На даному етапі відбувається аналітична обробка знань, видобутих на етапі 2, засобами математичної статистики, інструментами ГІС тощо.

Важливо відмітити, що для ідентифікації запропонованих баз даних і знань слід використовувати тільки джерела із достовірною інформацією. Оскільки, потрапляння в систему недостовірних відомостей може суттєво вплинути на достовірність висновків системи в цілому.

Найкраще використовувати дані державної звітності та систематизовані за рік аналітичні доповіді, якими, наприклад, є Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища. В Україні як правило, вони розміщуються на сайтах Міністерства екології та природних ресурсів України (Національна доповідь) та його територіальних органів (регіональні доповіді).

Запропоновані підходи та технологія дозволить підвищити релевантність та обсяг результатів пошуку взаємопов'язаної екологічної інформації щодо об'єктів карт ГІС за рахунок використання трьох типів інформаційних моделей даних.

## Висновки

В роботі запропоновано нову інформаційну модель та нові підходи до створення інформаційної технології автоматизованої ідентифікації структури та наповнення геоінформаційної бази екологічної інформації на основі різноформатних даних. Охарактеризовано основні аспекти її застосування, з урахуванням географічної прив’язки об’єктів екологічного профілю до карт геоінформаційних систем. Наведено узагальнений алгоритм та етапи застосування технології, а також відзначено окремі аспекти її практичного застосування.

#### Список літератури

1. Комп’ютеризовані регіональні системи державного моніторингу поверхневих вод: моделі алгоритми програми : [монографія] / Мокін В. Б., Боцула М. П., Горячев Г. В. та ін.; під ред. В. Б. Мокіна. — Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. — 315 с. — ISBN 966-641-132-6.
2. Мокін В. Б. Новий метод пошуку різноформатної екологічної інформації на основі онтологічної бази даних та її XML-представлення / В. Б. Мокін, Ю. М. Коновалюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2009. — № 2. — С. 66—69.
3. Мокін В. Б. Розробка моделей вхідних даних для ітеративного методу пошуку різноформатної екологічної інформації / В. Б. Мокін, Ю. М. Коновалюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 5. — С. 44—47.
4. Симаков К. В. Модели и методы извлечения знаний из текстов на естественном языке: Автореферат дис. канд. техн. наук / К. В. Симаков; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана – М., 2008. — 16 с. — рус.
5. Kao, A., and Poteet, S. Natural Language Processing and Text Mining / A. Kao, S. Poteet — Springer, 2006. — 277 с.
6. Вороной А.С. Використання онтологій для підвищення якості пошуку інформації для поповнення баз знань інтелектуальних систем / А.С. Вороной // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Комп’ютерні науки і інженерія 2009» (Львів, 14 – 16 травня 2009 р.). – Львів, 2009. – С. 364-366.
7. Hatcher, E., Gospodnetic, O. Lucene in Action. / E. Hatcher, O. Gospodnetic. — Manning Publications, 2004. — 456 с. — ISBN 978-1932394283.
8. An Introduction to Database Systems. Русскоязычное издание: К. Дж. Дейт. Введение в системы баз данных. — 8-е изд. — М.: Вильямс, 2006. — 1328 с. — ISBN 0-321-19784-4

#### Відомості про авторів

**Мокін Віталій Борисович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп’ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. 59-82-91, e-mail: vbmokin@gmail.com.

**Богомолів Юрій Сергійович** — аспірант кафедри комп’ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. (0432) 43-77-22, e-mail: yuriy.bogomolov@gmail.com.

УДК 621.321

С. М. ПЕРВУНІНСЬКИЙ, О. В. ВОВЧЕНКО, П. Д. ЖУРАВЕЛЬ

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси

**ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ БІНАРНОГО АВТОКОРЕЛЯЦІЙНОГО ПРИЙМАЧА ШУМОВОГО СИГНАЛУ З N ЛІНІЯМИ ЗАТРИМКИ**

**Анотація.** Представлено результати теоретичного дослідження завадостійкості бінарного приймача шумового сигналу з  $n$  лініями затримки. Запропоновано модифікацію схеми бінарного автокореляційного приймача з метою підвищення завадостійкості системи передачі даних.

**Ключові слова:** шумові сигнали, пороговий пристрій, завадостійкість, невизначене значення.

**Аннотация.** Представлено результаты теоретического исследования помехоустойчивости бинарного приемника шумового сигнала с  $n$  линиями задержки. Предложено модификацию схемы бинарного автокорреляционного приемника с целью повышения помехоустойчивости системы передачи данных.

**Ключевые слова:** шумовые сигналы, пороговое устройство, помехоустойчивость, неизвестное значение.

**Abstract.** Represented results of theoretical research of noise immunity of binary noise signal receiver with  $n$  delay lines. Proposed modification of binary autocorrelation receiver circuit for improving noise immunity of data transmission.

**Key words:** noise signals, threshold device, noise immunity, undefined value.

**Вступ**

Застосування надширокопasmових систем передачі даних має ряд переваг, зокрема, скритність передачі інформації та використання смуг частот, зайнятих іншими користувачами. Розвиток елементної бази радіосистем і технологій обробки сигналів дозволяють по-новому розглянути можливості практичного застосування раніше запропонованих схем та перспективи їх удосконалення, зокрема, підвищення завадостійкості при збереженні скритності передачі даних [1,2].

**Актуальність** розгляду даного питання полягає в необхідності удосконалення надширокопasmових систем передачі даних, зокрема, підвищення їх завадостійкості.

**Аналіз стану досліджень та публікацій**

В патенті [3] описано систему передачі даних шумовими сигналами, схему якого подано на рис. 1.

На рис. 1 використані наступні позначення:  $\Gamma$  – генератор шумового процесу  $\xi(t)$ ; ЛЗ<sub>1</sub>, ЛЗ<sub>2</sub> – лінія затримки на час  $\tau_1$  та  $\tau_2$  відповідно;  $\alpha$  – джерело інформаційного повідомлення;  $I_1$ ,  $I_2$  – інтегратори; В – вирішувачий пристрій.

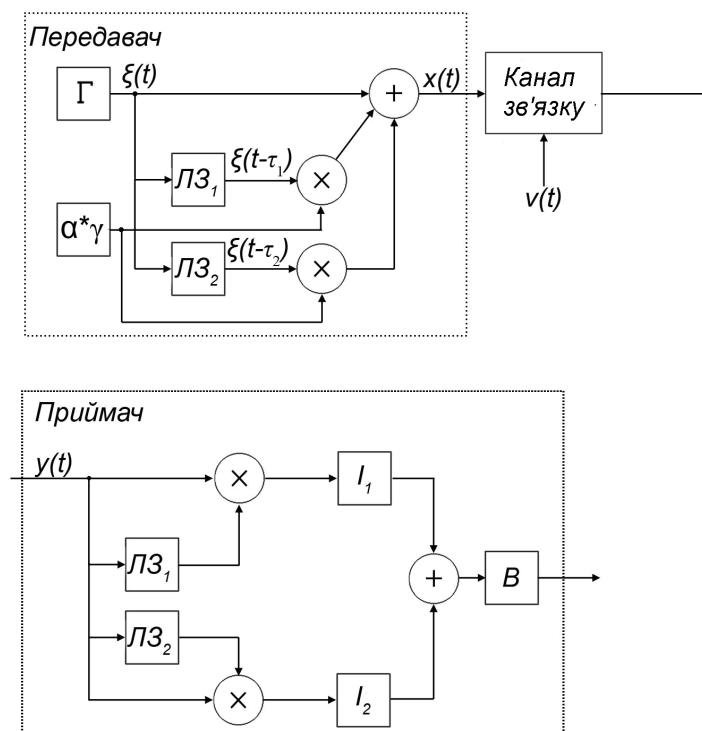


Рисунок 1 – Система передачі інформації шумовими сигналами з двома лініями затримки

На виході передавача на символному інтервалі довжиною  $T$  сигнал описується виразом:

$$x(t) = \xi(t) + \alpha \cdot \gamma(\xi(t - \tau_1) + \xi(t - \tau_2)), \quad t = [0; T] \quad (1)$$

де  $\alpha \in \{-1, +1\}$  - переданий інформаційний символ, що відповідає логічним бінарним сигналам «0» та «1»,  $\gamma$  - коефіцієнт масштабування складової сигналу.

На вхід приймача надходить сигнал виду:

$$y(t) = x(t) + v(t) = \xi(t) + \alpha \cdot \gamma \cdot (\xi(t - \tau_1) + \xi(t - \tau_2)) + v(t), \quad (2)$$

де  $v(t)$  - адитивна завада типу білого гауссового шуму, що додається до сигналу в каналі зв'язку.

Значення сигналу на вході вирішуючого пристрою визначається величиною:

$$\mathfrak{S} = \mathfrak{S}_1 + \mathfrak{S}_2 = \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} y(t) \cdot y(t - \tau_1) dt + \int_{\tau_2}^{T+\tau_2} y(t) \cdot y(t - \tau_2) dt. \quad (3)$$

Попередній аналіз такої системи дозволяє запропонувати її удосконалення з використанням принципів, застосованих у схемі пристрою для синхронізації в системах зв'язку з шумовими сигналами, наведену в [4]. В даному пристрої вихідний сигнал кожного інтегратора  $I_1, I_2$  поступає на окремий вирішуючий пристрій  $B_1, B_2$ . Значення сигналу на вході  $i$ -го вирішуючого пристрою визначається величиною:

$$\mathfrak{S}_i = \int_{\tau_i}^{T+\tau_i} y(t) \cdot y(t - \tau_i) dt, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (4)$$

За значеннями виходів вирішуючих пристроїв виконується тактова синхронізація приймача пристроєм синхронізації.

Застосуємо даний принцип обробки сигналу приймачем до пристрою, зображеного на рис. 1. Модифікована схема зображена на рис. 2. На даному рисунку використані наступні позначення:  $B_1, B_2, W$  - вирішуючий пристрій.

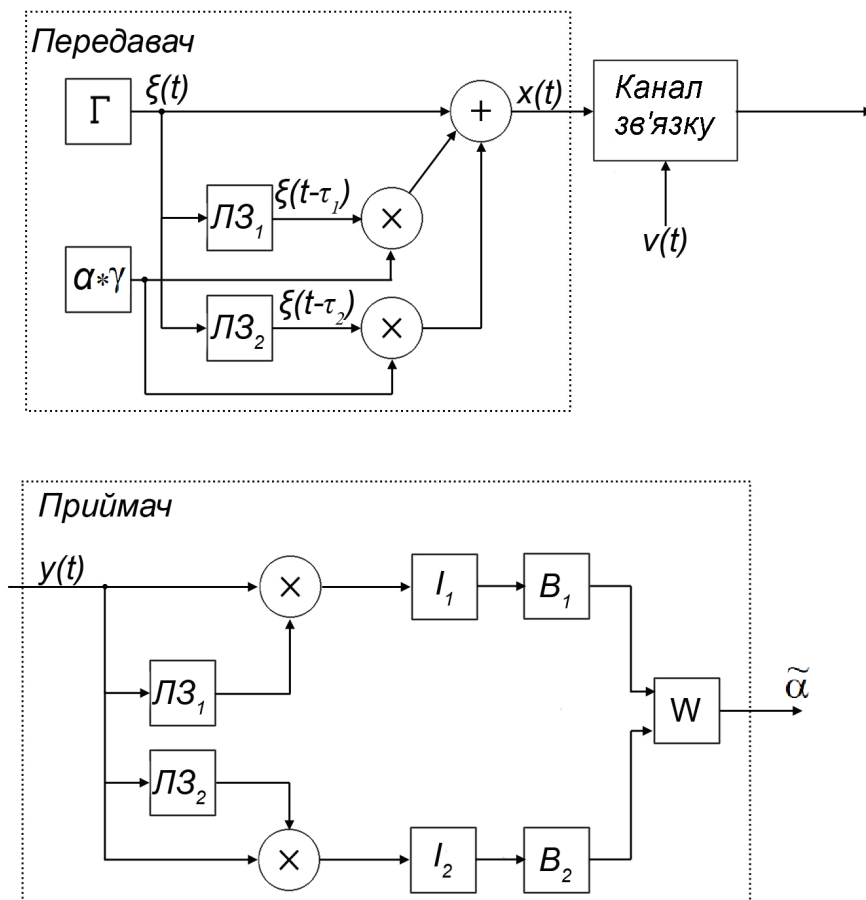


Рисунок 2 – Модифікована система передачі інформації шумовими сигналами з двома лініями затримки

По значенню величини  $\mathcal{G}_i$   $i$ -й пристрій прийняття рішень фіксує передачу символу (оцінку сигналу)  $\hat{\alpha}_i = 1$ , якщо сигнал на виході корелятора має додатне значення, або іншу оцінку  $\hat{\alpha}_i = -1$  у протилежному випадку. Сигнали  $\hat{\alpha}_i$ , поступають на вхід вирішуючого пристрою  $W$ , який фіксує та визначає кінцеве значення символу  $\tilde{\alpha}$ . Вирішуючий пристрій  $W$  може зафіксувати 3 ситуації:

- 1) Невірний прийом -  $\forall \hat{\alpha}_i \neq \alpha, i = \overline{1, n}$ .
- 2) Вірний прийом -  $\forall \hat{\alpha}_i = \alpha, i = \overline{1, n}$ .
- 3) Невизначеність -  $\exists (\hat{\alpha}_i \neq \alpha) \wedge (\hat{\alpha}_j = \alpha), i \neq j, i, j = \overline{1, n}$ .

Представляє інтерес розгляд питання щодо завадостійкості описаної системи у випадку, якщо кількість ліній затримки буде визначатись значенням  $n > 1$ .

**Метою даної роботи** є дослідження завадостійкості модифікованої системи передачі даних шумовими сигналами при наявності  $n$  ліній затримки і доцільності використання такої системи.

#### Викладення основного матеріалу

З урахуванням зазначеного вище узагальнення, вираз (1) набуде вигляду:

$$x(t) = \xi(t) + \alpha \cdot \gamma \cdot \sum_{i=1}^n \xi(t - \tau_i), \quad t = [0; T]. \quad (5)$$

Відповідно й вираз (4) можна переписати у вигляді:

$$\mathcal{G}_i = \int_{\tau_i}^{T+\tau_i} \left[ \xi(t) + \alpha \cdot \gamma \cdot \sum_{j=1}^n \xi(t - \tau_j) + v(t) \right] \times \left[ \xi(t - \tau_i) + \alpha \cdot \gamma \cdot \sum_{j=1}^n \xi(t - \tau_j - \tau_i) + v(t - \tau_i) \right] dt. \quad (6)$$

Очевидно, що у загальному випадку, тобто коли  $\tau_i \neq i \cdot \tau_1, i = \overline{1, n}$ , всі лінії затримки є симетричними і значення вихідних сигналів мають однакові математичне очікування та дисперсію. Тому для вирішення поставленого завдання достатньо визначити функцію щільності розподілу  $\mathcal{G}_1$  та ймовірність помилки першого вирішуючого пристрою  $B_1$ . Врахуємо також, що у випадку симетричного каналу зв'язку, аналіз завадостійкості одного субканалу системи достатньо розглянути, обмежившись випадком передачі бінарного символу «1», тобто коли  $\alpha = +1$ . Для цього випадку з виразу (5) для  $\mathcal{G}_1$  маємо:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_1 = & \eta_{11}(t, t - \tau_1) + \eta_{12}(t, t - \tau_1 - \tau_j) + \eta_{13}(t, t - \tau_1) + \\ & + \eta_{21}(t - \tau_1, t - \tau_j) + \eta_{22}(t - \tau_1, t - \tau_1 - \tau_j) + \eta_{23}(t - \tau_1, t - \tau_1) + \\ & + \eta_{31}(t, t - \tau_1) + \eta_{32}(t, t - \tau_1 - \tau_j) + \eta_{33}(t, t - \tau_1), \end{aligned} \quad (7)$$

де складові  $\mathcal{G}_1$  позначенні відповідно до загального вигляду:

$$\eta_{v,b}(s, k) = \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} v(s)b(k)dt. \quad (8)$$

Вважаємо випадкові процеси  $\xi(t)$  і  $v(t)$  незалежними, гауссовими, центрованими, дельта-корельованими і стаціонарними в широкому сенсі. Позначимо дисперсії випадкових процесів  $\xi(t)$  та  $v(t)$  як  $\sigma_\xi^2$  та  $\sigma_v^2$  відповідно. При цих припущеннях визначимо значення початкових моментів складових величини  $\mathcal{G}_1$  у (7). Так, враховуючи некорельованість та центрованість процесу  $\xi(t)$ , маємо:

$$m_1^{\eta_{11}} = M \left\{ \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t)\xi(t - \tau_1)dt \right\} = \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} M\{\xi(t)\}M\{\xi(t - \tau_1)\}dt = 0. \quad (9)$$

Відповідно можна знайти значення моментів решти доданків виразу (8):

$$\begin{aligned}
 m_1^{\eta_{12}} &= m_1^{\eta_{13}} = m_1^{\eta_{22}} = m_1^{\eta_{23}} = m_1^{\eta_{31}} = m_1^{\eta_{32}} = m_1^{\eta_{33}} = 0; \\
 m_1^{\eta_{21}} &= M \left\{ \gamma \sum_{j=1}^n \int_{\tau_i}^{T+\tau_i} \xi(t - \tau_i) \cdot \xi(t - \tau_j) dt \right\} = \\
 &= \gamma \cdot M \left\{ \int_{\tau_i}^{T+\tau_i} \xi^2(t - \tau_i) dt + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_{\tau_i}^{T+\tau_i} \xi(t - \tau_i) \cdot \xi(t - \tau_j) dt \right\} = \gamma \cdot \sigma_{\xi}^2 \cdot T.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Додаючи величини, представлені у виразах (9) та (10), маємо:

$$m_1^{\theta_1} = M\{\theta_1\} = \gamma \cdot \sigma_{\xi}^2 \cdot T. \tag{11}$$

Обчислення другого початкового моменту  $m_2^{\theta_1}$  пов'язане з розрахунком значення:

$$m_2^{\theta_1} = M\{\theta_1^2\} = M\{[\eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{13} + \eta_{21} + \eta_{22} + \eta_{23} + \eta_{31} + \eta_{32} + \eta_{33}]^2\}. \tag{12}$$

Знайдемо значення величини:

$$\begin{aligned}
 m_2^{\eta_{11}} &= M\{\eta_{11}^2\} = M\left\{ \left[ \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t) \xi(t - \tau_1) dt \right]^2 \right\} = M\left\{ \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t) \xi(t - \tau_1) dt \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(x) \xi(x - \tau_1) dx \right\} = \\
 &= \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} M\{\xi(t) \xi(x) \xi(t - \tau_1) \xi(x - \tau_1)\} dx dt.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Для моменту четвертого порядку спільно гауссових центрованих випадкових величин  $\xi(t)$ ,  $\xi(x)$ ,  $\xi(t - \tau_1)$ ,  $\xi(x - \tau_1)$  скористаємося наступною формулою [6]:

$$\begin{aligned}
 M\{\xi(t) \xi(x) \xi(t - \tau_1) \xi(x - \tau_1)\} &= M\{\xi(t) \xi(x)\} M\{\xi(t - \tau_1) \xi(x - \tau_1)\} + \\
 &+ M\{\xi(t) \xi(t - \tau_1)\} M\{\xi(x) \xi(x - \tau_1)\} + M\{\xi(t) \xi(x - \tau_1)\} M\{\xi(x) \xi(t - \tau_1)\}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Користуючись співвідношеннями (13) та (14) і припущенням про дельта корельованість процесу  $\xi(t)$ , одержимо:

$$\begin{aligned}
 m_2^{\eta_{11}} &= \sigma_{\xi}^2 \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} M\{\xi(t) \xi(x)\} \delta(t - \tau_1) dx dt + \sigma_{\xi}^4 \delta(\tau_1) \delta(\tau_1) \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} dx dt + \\
 &+ \sigma_{\xi}^4 \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \delta(t - x + \tau_1) \delta(t - x - \tau_1) dx dt,
 \end{aligned}$$

де  $\delta(x)$  – дельта-функція Дірака.

З урахуванням фільтруючої властивості дельта-функції маємо:

$$m_2^{\eta_{11}} = \sigma_{\xi}^4 T. \tag{15}$$

Аналогічно отримуємо:

$$\begin{aligned}
 m_2^{\eta_{12}} &= M\left\{ \left[ \gamma \cdot \sum_{j=1}^n \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t) \cdot \xi(t - \tau_1 - \tau_j) dt \right]^2 \right\} = \\
 &= \gamma^2 \cdot \sum_{j=1}^n M\left\{ \left[ \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t) \cdot \xi(t - \tau_1 - \tau_j) dt \right]^2 \right\} = n \cdot \gamma^2 \sigma_{\xi}^4 T.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Для  $\eta_{21}$  маємо:

$$\begin{aligned} m_2^{\eta_{21}} &= M \left\{ \left[ \gamma \sum_{j=1}^n \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t-\tau_1) \cdot \xi(t-\tau_j) dt \right]^2 \right\} = \\ &= M \left\{ \left[ \gamma \cdot \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi^2(t-\tau_1) dt + \gamma \cdot \sum_{j=2}^n \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t-\tau_1) \cdot \xi(t-\tau_j) dt \right]^2 \right\} = \quad (17) \\ &= \gamma^2 \cdot \sigma_\xi^4 (2T + T^2) + (n-1) \cdot \gamma^2 \cdot \sigma_\xi^4 \cdot T = \\ &= (n+1) \cdot \gamma^2 \cdot \sigma_\xi^4 \cdot T + \gamma^2 \cdot \sigma_\xi^4 \cdot T^2. \end{aligned}$$

Для моменту  $m_2^{\eta_{22}}$  отримуємо:

$$m_2^{\eta_{22}} = M \left\{ \left[ \gamma^2 \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \xi(t-\tau_1) \cdot \xi(t-\tau_k-\tau_1) dt \right]^2 \right\} = n^2 \cdot \gamma^4 \cdot \sigma_\xi^4 \cdot T. \quad (18)$$

Враховуючи незалежність дельта корельованих випадкових величин  $v(t)$ ,  $\xi(x)$  і фільтруючої властивості дельта-функції, можна знайти значення моментів  $m_2^{\eta_{13}}$ ,  $m_2^{\eta_{31}}$ :

$$m_2^{\eta_{13}} = m_2^{\eta_{31}} = \sigma_\xi^2 \cdot \sigma_v^2 \cdot T. \quad (19)$$

Таким же чином для  $m_2^{\eta_{23}}$ ,  $m_2^{\eta_{32}}$  отримуємо:

$$\begin{aligned} m_2^{\eta_{23}} &= M \left\{ \left[ \gamma \cdot \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} v(t-\tau_1) \cdot \sum_{j=1}^n \xi(t-\tau_1) dt \right]^2 \right\} = n \cdot \sigma_\xi^2 \cdot \sigma_v^2 \cdot T; \\ m_2^{\eta_{32}} &= M \left\{ \left[ \gamma \cdot \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} v(t) \cdot \sum_{j=1}^n \xi(t-\tau_j-\tau_1) dt \right]^2 \right\} = n \cdot \sigma_\xi^2 \cdot \sigma_v^2 \cdot T. \end{aligned} \quad (20)$$

Нарешті, для моменту  $m_2^{\eta_{33}}$  маємо:

$$m_2^{\eta_{33}} = \sigma_v^4 T. \quad (21)$$

Подвоєні парні добутки елементів, записаних у квадратних дужках виразу (12), дорівнюють нулю, що впливає з наступного виразу [14]:

$$M \{ 2\eta_{11} \cdot \eta_{13} \} = 2 \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} \int_{\tau_1}^{T+\tau_1} M \{ \xi(t)\xi(t-\tau_1)\xi(x)v(x-\tau_1) \} dt dx = 0. \quad (22)$$

Аналогічним чином розраховується значення решти подвоєних парних добутків.

Підсумовуючи наведені вище результати, можна записати:

$$m_2^{\mathcal{G}} = M \{ \mathcal{G}_1^2 \} = T \left[ \sigma_\xi^4 (1 + (2n+1)\gamma^2 + n^2\gamma^4) + \gamma^2 \sigma_\xi^4 T + 2\sigma_\xi^2 \sigma_v^2 (1 + n\gamma^2) + \sigma_v^4 \right]. \quad (23)$$

Маючи значення перших двох початкових моментів випадкової величини  $\mathcal{G}_1$ , визначимо її дисперсію:

$$D_2^{\vartheta_1} = m_2^{\vartheta_1} - (m_1^{\vartheta_1})^2 = T \left[ \sigma_{\xi}^4 (1 + (2n+1)\gamma^2 + n^2\gamma^4) + \gamma^2 \sigma_{\xi}^4 T + 2\sigma_{\xi}^2 \sigma_v^2 (1 + n\gamma^2) + \sigma_v^4 \right] - \gamma^2 \sigma_{\xi}^4 T^2 = T \left[ \sigma_{\xi}^4 (1 + (2n+1)\gamma^2 + n^2\gamma^4) + 2\sigma_{\xi}^2 \sigma_v^2 (1 + n\gamma^2) + \sigma_v^4 \right]. \quad (24)$$

У випадку, якщо  $T \gg \tau_i, i = \overline{1, n}$ , щільність розподілу значення сигналу  $\vartheta_1$  можна представити у вигляді гауссовго процесу. Тоді значення даного сигналу можна описати виразом [5]:

$$f(\vartheta_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_2^{\vartheta_1}}} \cdot \exp\left(-\frac{(\vartheta_1 - m_1^{\vartheta_1})^2}{2D_2^{\vartheta_1}}\right). \quad (25)$$

Ймовірність виникнення помилки на виході вирішуючого пристрою  $B_1$  визначається з виразу

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_2^{\vartheta_1}}} \int_{-\infty}^0 \exp\left(-\frac{(x - m_1^{\vartheta_1})^2}{2D_2^{\vartheta_1}}\right) dx, \quad (26)$$

а для симетричного каналу це визначає й завадостійкість будь-якого із  $n$  субканалів приймача.

Вираз (26) заміною змінної інтегрування може бути приведений до більш зручного для обчислень вигляду:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^G e^{-t^2} dt, \quad (27)$$

де величина

$$G = -\frac{m_1^{\vartheta_1}}{\sqrt{2D_2^{\vartheta_1}}} = -\frac{\gamma \cdot \sigma_{\xi}^2 \cdot T}{\sqrt{2T \left[ \sigma_{\xi}^4 (1 + (2n+1)\gamma^2 + n^2\gamma^4) + 2\sigma_{\xi}^2 \sigma_v^2 (1 + n\gamma^2) + \sigma_v^4 \right]}}. \quad (28)$$

Виразимо параметр  $\sigma_v^2$  з використанням перевищення енергії біта  $E_b$  над спектральною щільністю  $N_0$  завади:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{(1 + n\gamma^2) \cdot \sigma_{\xi}^2 \cdot T}{2\sigma_v^2}; \quad \sigma_v^2 = \frac{(1 + n\gamma^2) \cdot \sigma_{\xi}^2 \cdot T}{2(E_b / N_0)}. \quad (29)$$

З урахуванням (28) формула (27) набуде вигляду:

$$G = -\frac{\gamma \cdot \sqrt{T/2}}{\sqrt{1 + (2n+1)\gamma^2 + n^2\gamma^4 + \frac{T(1+n\gamma^2)^2}{(E_b/N_0)} + \frac{T^2(1+n\gamma^2)^2}{4(E_b/N_0)^2}}}. \quad (30)$$

Ймовірність помилки для системи в цілому, при наявності у даній системі  $n$  ліній затримки, буде рівна:

$$P_{ном} = \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^G e^{-t^2} dt \right)^n = P^n. \quad (31)$$

Ймовірність правильного прийому інформаційного сигналу для системи в цілому визначається як:

$$P_{np} = \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^G e^{-t^2} dt \right)^n = (1 - P)^n. \quad (32)$$

При використанні вказано принципу передачі даних можливе виникнення ситуації, коли на виходах вирішуючих пристроїв  $B_1, \dots, B_n$  з'являються різні значення. У цьому випадку неможливо однозначно ідентифікувати прийнятий символ.

Ймовірність появи такого результату визначається величиною:

$$P_{нев} = 1 - P_{ном} - P_{пр} = 1 - P^n - (1 - P)^n. \quad (33)$$

Оскільки,  $P_{нев}$  залежить від коефіцієнту масштабування, тому доцільно знайти оптимальне значення  $\gamma$ . Для цього знаходимо похідну  $\frac{dP(\gamma)}{d\gamma}$ , що в даному випадку визначається виразом:

$$\frac{dP(\gamma)}{d\gamma} = \frac{d}{d\gamma} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^G e^{-t^2} dt \right] = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-(G)^2} \cdot \frac{dG}{d\gamma}, \quad (34)$$

та прирівнюємо її до нуля:

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-(G)^2} \cdot \frac{dG}{d\gamma} = 0. \quad (35)$$

Оскільки величина  $\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-(G)^2} \neq 0$  для  $G \neq \infty$ , то задача зводиться до пошуку такого  $\gamma$ , при якому  $G$  набуває екстремального значення. Виконуючи пошук похідної від  $G$ , з використанням чисельних методів, можна показати, що оптимальне значення коефіцієнту  $\gamma$  визначається величиною  $\gamma \approx \frac{1}{\sqrt{n}}$ .

На рис. 3 наведено графік залежності завадостійкості системи передачі даних шумовими сигналами з  $n$  лініями затримки від відношення «сигнал/шум» ( $\gamma$  дБ) при  $T=100$ ,  $n=2, 3, 4$  відповідно, та  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{n}}$ .

Також на даному рисунку наведено залежність ймовірності появи невизначеного значення від відношення «сигнал/шум» при тих же вхідних параметрах.

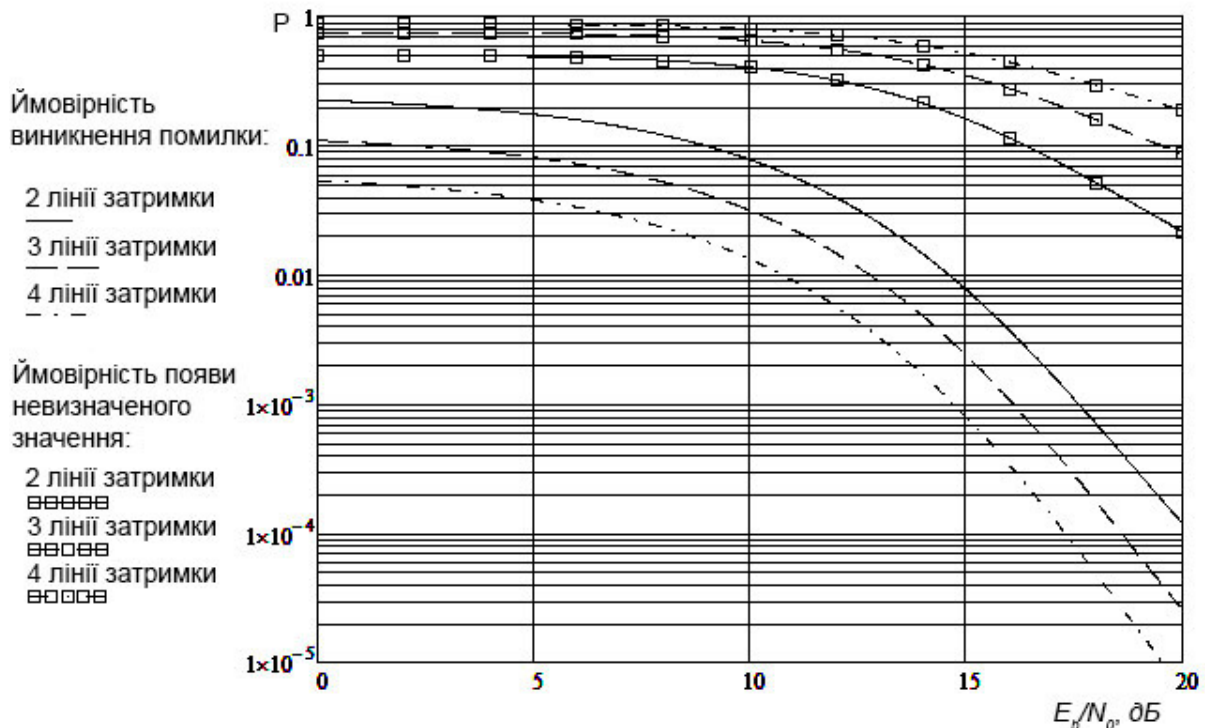


Рисунок 3 – Залежність ймовірності появи помилки від відношення «сигнал/шум» (дБ)

На рис. 4 показано графіки залежності ймовірності появи помилки від відношення «сигнал/шум» для розглянутої системи та системи, описаної в [3], при  $n=2$ . Вхідні параметри використано ті ж, що і для графіків на рис. 3.

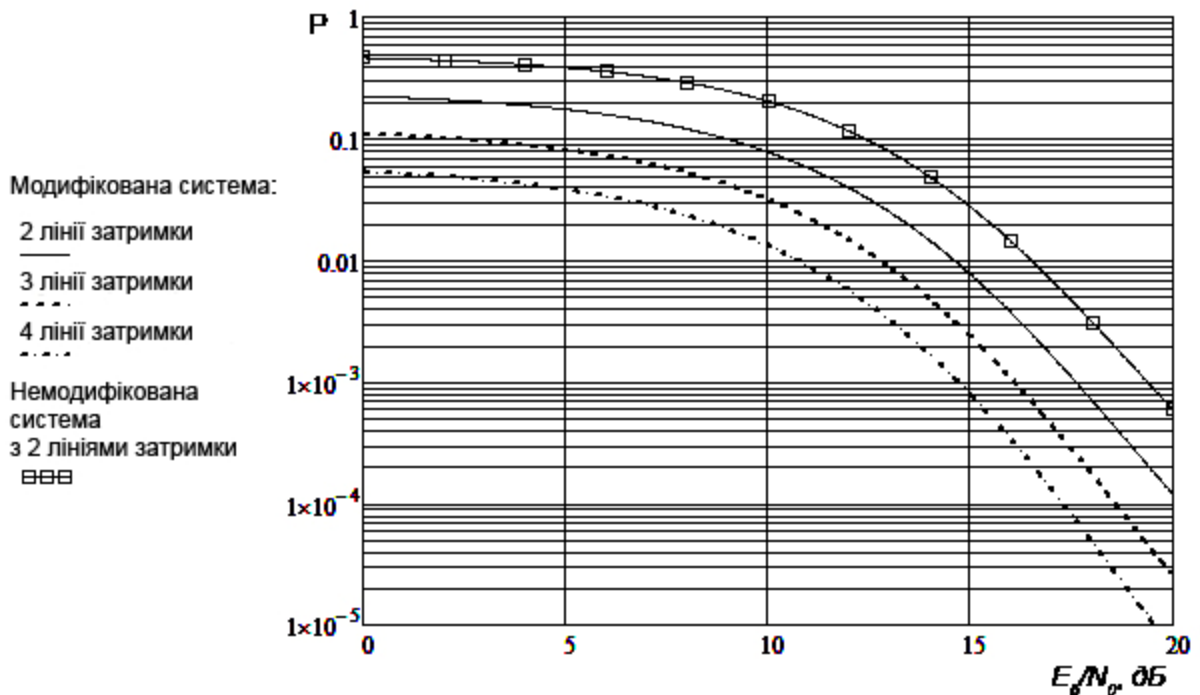


Рисунок 4 – Залежність ймовірності появи помилки від відношення "сигнал/шум" для різних систем передачі даних

Розглянуті результати аналітичного дослідження були перевірені за допомогою імітаційного моделювання. На рис.5 наведені графіки залежності ймовірності появи помилки від відношення "сигнал/шум" (дБ) для різної кількості ліній затримки, отримані за допомогою імітаційного моделювання та аналітичного розрахунку відповідно.

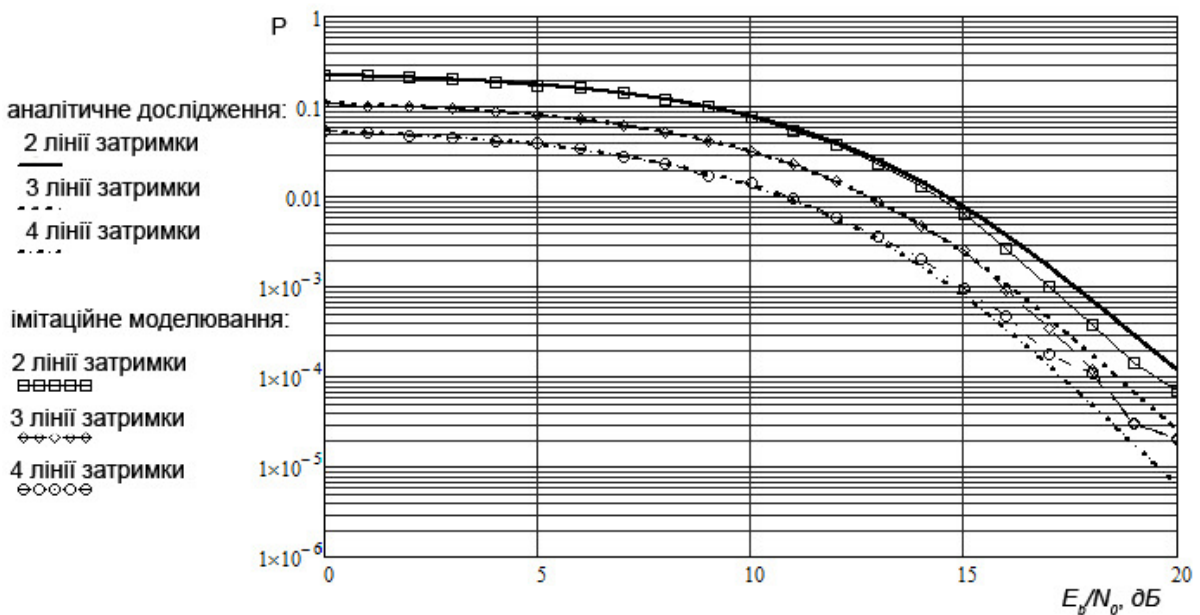


Рисунок 5 – Залежність ймовірності появи помилки від відношення "сигнал/шум" (аналітичне дослідження та імітаційне моделювання)

З рисунків 3-5 видно, що при збільшенні кількості ліній затримки заводстійкість системи передачі даних зростає і є більшою за заводстійкість системи, представленої на рис.1, проте водночас зростає і ймовірність невизначеного значення. Оскільки при появі невизначеного значення виконується повторний

запит на надсилання інформаційного символу, то хоча і не виникає помилкового прийому, але знижується загальна швидкість передачі.

#### Висновок

1. Модифікована система передачі даних з шумовими сигналами має більшу завадостійкість порівняно з прототипом [3]; наприклад, при застосуванні у модифікованій системі та двох ліній затримки при відношенні «сигнал-шум», рівному 20 дБ, ймовірність появи помилки зменшується у 4,96 разу. При цьому ймовірність появи невизначеного значення прийому переданого сигналу становить 2%. Завадостійкість модифікованої системи передачі даних шумовими сигналами зростає при збільшенні кількості ліній затримки з одночасним зниженням її загальної ефективності через зменшення швидкості передачі даних, за рахунок повторної передачі при появі невизначеності.

2. Можливим удосконаленням описаної системи може бути модифікація вирішуючого пристрою шляхом застосування мажоритарного принципу прийняття рішення. Подібну модифікацію системи планується розглянути в подальшому.

#### Література

1. Wai Tam, Francis Lau, Chi Tse, Digital communication with chaos. – N.Y.: Elsevier, 2006. – 256 p.
2. Дідковський Р.М. Підвищення рівня захищеності даних в системах зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу / Дідковський Р.М., Метелап В.В. / Вісник ЧДТУ, № 3. – 2010. с. 53-57.
3. Пат. 68639 Україна, МПК(2012.01) H04B 7/00. Пристрій для передачі інформації шумовими сигналами / Первунінський С.М., Журавель П.Д.; заявник та власник – Черкаський державний технологічний університет. - № 201107502; заявл. 14.06.11 ; опубл. 10.04.12, Бюл. № 7.
4. Пат. 67760 Україна, МПК(2012.01) H04L7/00. Пристрій синхронізації в системах зв'язку з шумовими сигналами / Первунінський С.М., Вовченко О.В.; заявник та власник Черкаський державний технологічний університет. - № 201107718; заявл. 20.06.11 ; опубл. 12.03.12, Бюл. № 5.
5. Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: «Радио и связь», 1991. – 608 с.
6. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям // Р. Н. Вадзинский. – СПб., Наука, 2001. – 295 с.

#### Відомості про авторів

**Первунінський Станіслав Михайлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Програмного забезпечення АС ЧДТУ, 18031, м. Черкаси, вул. Червоноармійська, 77., тел. (0472) 32-47-17, e-mail: cherkpervun@rambler.ru

**Вовченко Олександр В'ячеславович** – аспірант кафедри Програмного забезпечення АС ЧДТУ, 18000, м. Черкаси, вул. Чехова, 42, тел. (063) 469-94-92, e-mail: vovchenkoAlexandr@gmail.com

**Журавель Павло Дмитрович** – аспірант кафедри Програмного забезпечення АС ЧДТУ, 18030, Черкаси, вул. Подолинського, 24/к. 5, тел. (097) 432-67-34, e-mail: pzhuravel@gmail.com.

## КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.382.3

О. Д. АЗАРОВ, С. В. БОГОМОЛОВ, М. Ю. ТЕПЛИЦЬКИЙ, В. Є. ЯЦИК

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ВИСОКОЛІНІЙНИХ ДВОТАКТНИХ БУФЕРНИХ ПРИСТРОЇВ НАПРУГИ

**Анотація.** У статті розглядається запропонований метод підвищення навантажувальної здатності високолінійних двотактних буферних пристроїв напруги. Суть його полягає у застосуванні схемно-функціональної організації, яка поєднує надлінійне ядро буферного пристрою з широкопосмуговим двотактним підсилювачем струму. Наводяться оригінальні схеми спеціалізованих відбивачів струму, які складають основу як ядра, так і вказаного підсилювача. Аналізуються результати комп'ютерного моделювання статичних і динамічних характеристик.

**Ключові слова:** буферний пристрій, відбивачі струму, ДППС.

**Аннотация.** В статье рассматривается предложенный метод увеличения нагрузочной способности высоколинейных двухтактных буферов напряжения. Суть его состоит в использовании схемно-функциональной организации, которая объединяет сверхлинейное ядро буфера с широкополосным двухтактным усилителем тока. Приводятся оригинальные схемы специализированных отражателей тока, которые составляют основу, как ядра, так и указанного усилителя. Анализируются результаты компьютерного моделирования статических и динамических характеристик.

**Ключевые слова:** буферное устройство, отражатели тока, ДУПТ.

**Abstract.** The article describe the proposed method increases the load capacity highlinear broadband buffer voltage. It consists in the use of circuit-functional organization that unites superlinear kernel buffer with broadband push-pull current amplifier. Provided the original scheme of specialized current mirror, which are the basis of the buffer core and said amplifier. Analyzes the results of computer modeling of the static and dynamic characteristics.

**Key words:** buffer, current mirror, push-pull amplifier DC.

## Вступ

Буферні пристрої (БП) напруги [1] призначено для застосування в різноманітних електронних системах, зокрема, в каналах перетворення, де потрібно «розв'язати» малопотужний генератор вхідного сигналу (напруги) з низьким опором навантаження або сформувати вихідний струм у заданому діапазоні значень. При цьому коефіцієнт передачі напруги зі входу на вихід повинен якомога точніше дорівнювати одиниці.

## Актуальність

Поширеним шляхом побудови високоточних БП напруги є застосування операційних підсилювачів із глибоким зворотним зв'язком (ЗЗ) у режимі повторювача напруги [2]. Причому статичні похибки передатної характеристики, зокрема, масштабу і лінійності таких схем істотно залежать від значення коефіцієнту підсилення при розірваній петлі ЗЗ. Природно, що для мінімізації вказаних похибок треба виконувати багатокаскадні підсилювачі постійного струму з великим ( $10^5 - 10^7$ ) коефіцієнтом передачі струму або напруги. Відповідно швидкодія таких пристроїв буде зниженою.

Автори пропонують для побудови високолінійних швидкодіючих схем буферів напруги використовувати інший підхід. Суть його полягає в тому, що вказаний пристрій структурно розбивається на дві частини. Перша з них являє собою ядро, у вигляді надлінійного малопотужного швидкодіючого двотактного двополярного повторювача напруги [1, 3]. Друга частина є широкопосмуговим двотактним підсилювачем постійного струму (ДППС) із середнім коефіцієнтом підсилення ( $10^3 - 10^4$ ), вихід якого підключено до навантаження. Таким чином потужність, що віддається в навантаження забезпечується ДППС, який включено в контури ЗЗ між навантаженням і струмовими виходами ядра. Проведені теоретичні і практичні дослідження показують, що запропонований підхід є винятково вдалим і заслуговує на увагу розробників високоточної електронної апаратури. Водночас матеріали, що розкривають суть цього підходу практично відсутні в науково-технічній літературі, тому тема статті є актуальною.

## Мета

Аналіз запропонованого методу побудови високолінійних швидкодіючих двотактних двополярних схем буферів напруги, який на відміну від існуючих не вимагає застосування підсилювачів постійного струму з великими коефіцієнтами передачі і дозволяє досягати компромісу між високими статичними і динамічними характеристиками пристрою.

## Задачі

1. Розглянути запропонований метод структурно-функціональної організації високолінійного швидкодіючого двотактного двополярного буфера напруги з підвищеною навантажувальною здатністю, що дозволяє досягти високих статичних і динамічних характеристик.

2. Проаналізувати статичні і динамічні характеристики ядра двотактного двополярного БП, відмінною особливістю якого є застосування спеціалізованих відбивачів струму, що дозволяє реалізувати параметричну нейтралізацію негативних чинників, що викликають появу похибок схеми.

3. Дослідити потенційні можливості збільшення навантажувальної здатності високолінійного БП шляхом уведення активних ЗЗ у вигляді спеціалізованого підсилювача струму між парафазними проміжними і основним виходами ядра схеми.

### Розв'язання задач

Останнє десятиліття характеризується активним пошуком шляхів побудови високоточних швидкодіючих БП на базі двотактних структур [4 - 8]. Особливо слід відзначити результати, отримані науковцями Вінницького національного технічного університету й опубліковані в [1, 9]. Водночас, аналіз зробленого дозволив виявити нові можливості у цьому плані. Особливо, це стосується забезпечення потрібної навантажувальної здатності, а саме потрібного вихідного струму при заданій вихідній напрузі з мінімальними статичними похибками і збереженні високої швидкодії.

Суть запропонованого підходу можна продемонструвати на прикладі БП, узагальнену структурну схему якого зображено на рис. 1. Вона містить ядро двотактного БП, яке має вхід ( $V_x$ ) і вихід по напрузі ( $V_{\text{вих}}(U)$ ), а також два проміжних парафазних виходи по струму, відповідно,  $\tilde{I}'_{\text{вих}}$  та  $\tilde{I}''_{\text{вих}}$ . Виходи  $\tilde{I}'_{\text{вих}}$  та  $\tilde{I}''_{\text{вих}}$  підключено до парафазних струмових входів ширококутового ДППС. Вихід ядра БП з'єднано з виходом ДППС, а також опором навантаження  $R_n$ . Таким чином між навантаженням і ядром БП уведено два контури активного від'ємного ЗЗ, причому так, що формування вихідного струму  $I_{\text{вих}}$  покладається винятково на ДППС. Безумовно на виході ядра протікає невеликий різницевий струм  $\tilde{I}_{\text{вих}}$ , проте його значення дорівнює:

$$\tilde{I}_{\text{вих}} = \frac{I_{\text{вих}}}{K_i},$$

де  $K_i$  – коефіцієнт підсилення струму ДППС при розірваній петлі ЗЗ, і таким чином ядро істотно розвантажується.

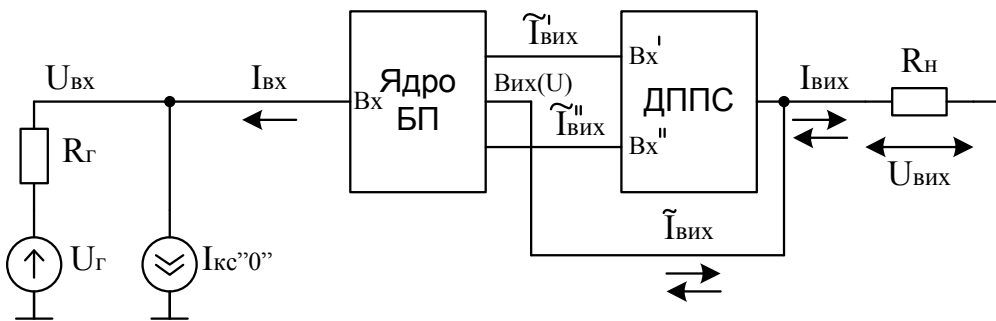


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема високолінійного швидкодіючого БП

Вхідний сигнал у вигляді напруги  $U_G (\pm U_{\text{вх}})$  подається на вхід ядра БП. Оскільки джерело  $U_G$  має внутрішній опір  $R_G$ , то наявність вхідного струму зсуву нуля  $I_0$  призведе до появи додаткової адитивної похибки  $\Delta U_0(I_0)$  по входу БП. Для її коригування у схемі передбачено застосування спеціального генератора компенсаційного струму  $I_{\text{кс}''0}$ .

Розглянемо реалізацію вузлів пристрою. Найвищі вимоги щодо мінімізації похибок статичних характеристик висуваються до ядра БП. Варіанти його побудови детально викладено в [1]. Проте заслуговує на увагу ще одна реалізація, спрощену принципову схему якої наведено на рис. 2. Вона містить: вхідний каскад на транзисторах  $T'$  і  $T''$ ; параметричні відбивачі струму ПВС' і ПВС''; каскоди з компенсаці-

єю базових струмів вихідних транзисторів каскодів  $K'_{сд}$  і  $K''_{сд}$ ; транзистори-балансувачі  $T'_д$  і  $T''_д$  у діодному вмиканні.

Особливу увагу слід звернути на те, що схему побудовано таким чином, щоб унеможливити появу зміни напруги на колекторних переходах транзисторів у діапазоні вхідного і вихідного сигналів (за винятком вихідних транзисторів каскодів). Причому, якщо  $R_H = \infty$ , то стабільними є і напруги на переходах транзисторів і струми, які протікають через них. Таким чином, між входом і виходом ядра БП формується різниця  $\Delta U_{вих} = U_{вих} - U_{вх}$ , значення якої буде постійним у діапазоні сигналів. Негативним впливовим чинником схеми є передача зміни колекторних напруг транзисторів  $K'_{сд}$  і  $K''_{сд}$  на балансувачі діоди і в кінцевому підсумку на вихід. Тому для мінімізації статичних похибок вихідні опори каскодів повинні бути максимальними, що і забезпечується їх відповідною схемотехнічною реалізацією [10].

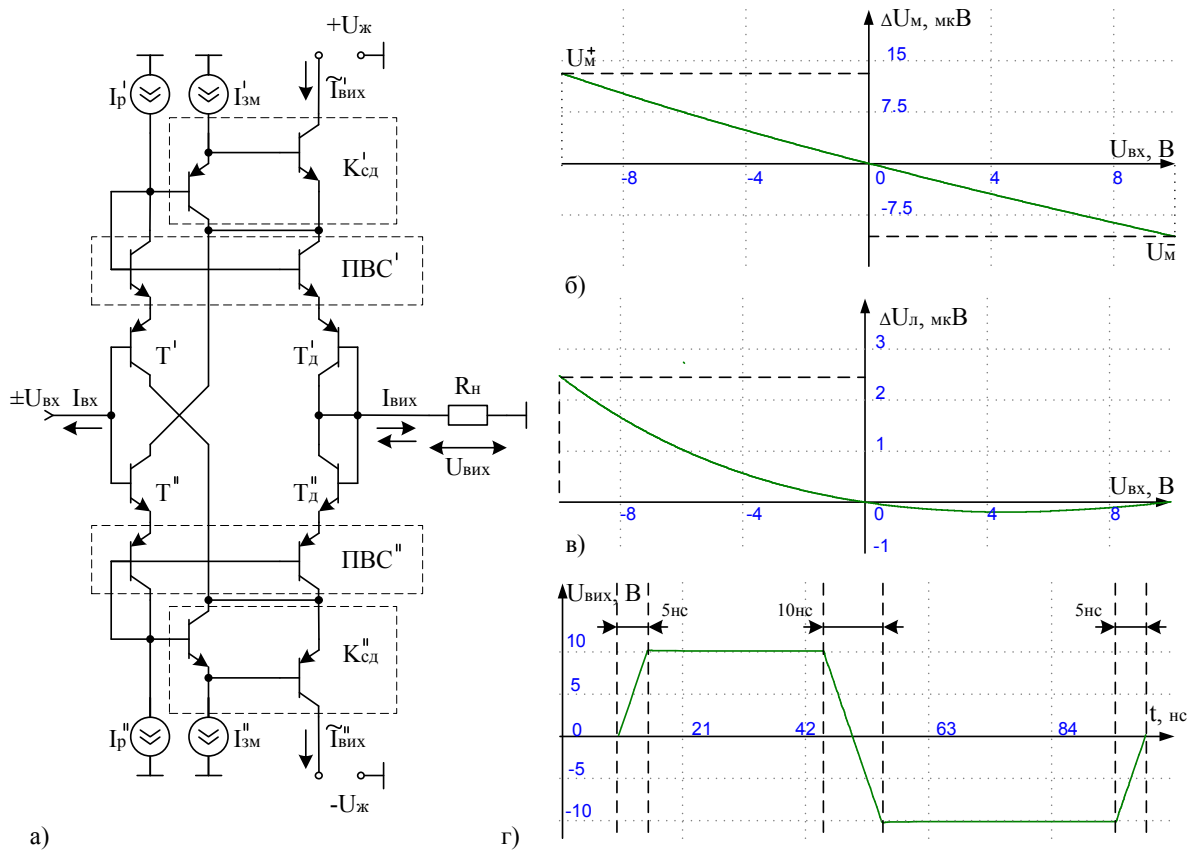


Рисунок 2 – Ядро БП: а) спрощена принципова схема; залежності: б)  $\Delta U_M = f(U_{вх})$ ; в)  $\Delta U_{л} = f(U_{вх})$ ; г) часова діаграма реакції на імпульсний сигнал

У загальному випадку статична похибка передачі  $U_{вих}$  на вихід визначається у вигляді:

$$\Delta U_{вих} = U_{вих} - U_{вх} = \Delta U_0 + \Delta U_M + \Delta U_{л},$$

де  $\Delta U_0$  – похибка зсуву нуля при  $U_{вх} = 0$ ,  $\Delta U_M$  – похибка масштабу, яка змінюється по діапазону  $U_{вх\max} \leq U_{вх} \leq U_{вх\min}$ ,  $\Delta U_{л}$  – похибка лінійності, що характеризується відхиленням залежності  $\Delta U_M = f(U_{вх})$  від прямої лінії.

Для забезпечення режиму по постійному струму схема містить генератори струмів робочих точок  $I'_p$  і  $I''_p$ , а також генератори струмів зміщення  $I'_{3M}$  і  $I''_{3M}$ . Слід зазначити, що їх опори повинні бути максимальними. У випадку побудови ядра БП на інтегральних транзисторах фірми INTERSIL і завдання  $I'_p = I''_p = I'_{3M} = I''_{3M} = 1 \text{ мА}$ ;  $+U_{ж} = 15 \text{ В}$ ;  $-U_{ж} = -15 \text{ В}$ ;  $R_H = \infty$  залежності  $\Delta U_M = f(U_{ВХ})$  і  $\Delta U_L = f(U_{ВХ})$  зображуються графіками, наведеними на рис. 2 б) і в) відповідно. Тут похибка масштабу по краях діапазону  $U_{ВХ} = 10 \text{ В}$  і  $-U_{ВХ} = -10 \text{ В}$  дорівнює відповідно  $-11 \text{ мкВ}$  і  $13 \text{ мкВ}$ . Різниця між цими значеннями може оцінюватися як похибка лінійності  $\Delta U_L = 2,5 \text{ мкВ}$ . Для отримання залежності змінення  $\Delta U_L = f(U_{ВХ})$  по діапазону, доцільно скористатися виразом  $\Delta U_{ВІХ} = U_{ВІХ} - \Delta U_0 - k^* \cdot U_{ВІХ}$ , де  $k^*$  – коригуючий коефіцієнт, що дозволяє вичленили  $\Delta U_M$ .

Припускаючи, що генератори  $I'_p$ ,  $I''_p$ ,  $I'_{3M}$ ,  $I''_{3M}$  є ідеальними, а  $R_H = \infty$ , можна вважати, що отримані похибки  $\Delta U_L$  і  $\Delta U_M$  є потенційними. При цьому при заданих значеннях вказаних струмів маємо такі малосигнальні параметри статичних характеристик: вхідний опір  $r_{ВХ} = 1,2 \text{ ГОм}$ ; вихідні опори:  $r_{ВІХ} = 30 \text{ Ом}$ ,  $\tilde{r}'_{ВІХ} = 190 \text{ МОм}$ ,  $\tilde{r}''_{ВІХ} = 110 \text{ МОм}$ .

Динамічні властивості схеми можна оцінити через перехідну характеристику, отриману шляхом комп'ютерного схемотехнічного аналізу за допомогою інтегрованого пакету MicroCAP 9.0 [11]. Графік цієї характеристики наведено на рис. 2 г). Швидкість зростання вихідного сигналу  $U_{ВІХ}$  тут досягає  $\sim 2000 \text{ В/мкс}$ , що свідчить про досить високу потенційну швидкодію.

Слід зазначити, що ядро БП само по собі має низьку навантажувальну здатність, яка характеризується вихідним опором на рівні  $r_{ВІХ} = 30 \text{ Ом}$ . При цьому постановка на виході схеми  $R_H$  із реальними значеннями ( $\sim 10^1 \text{ кОм}$ ) призведе до неприпустимо великих статичних похибок. Істотно покращити ситуацію можна уведенням до структури БП широкосмугового ДППС із двома парафазними входами. Його функціональну схему наведено на рис. 3.

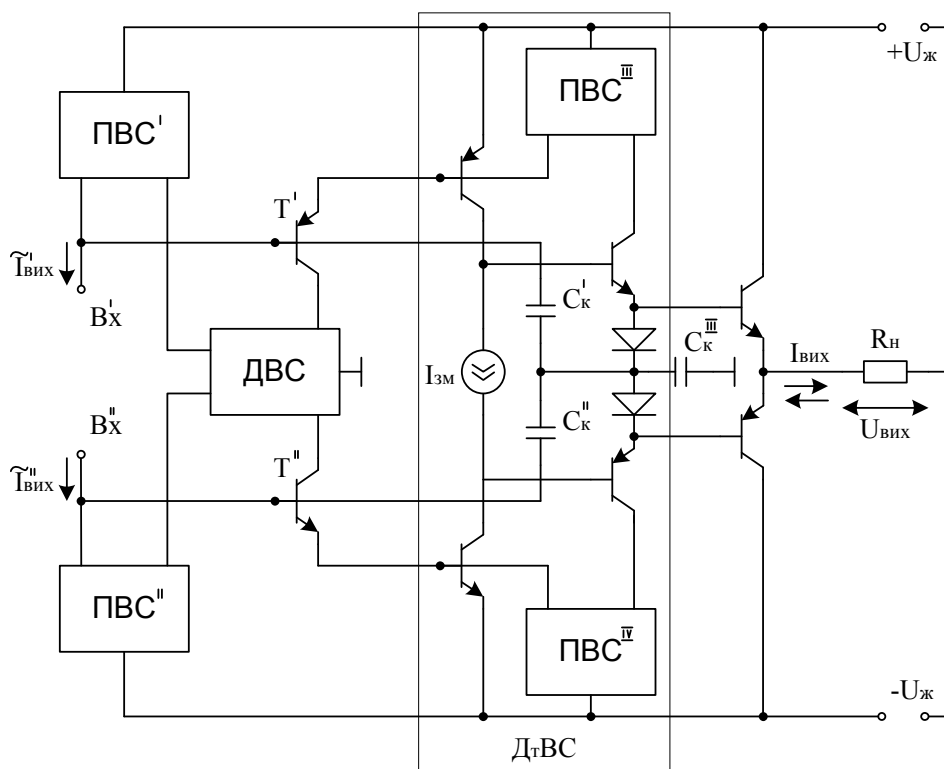


Рисунок 3 – Двотактний двовходовий підсилювач постійного струму

Вона містить: парафазні каскади проміжного підсилення на транзисторах  $T'$  і  $T''$ , двонаправлений відбивач струму (ДВС), двотактний відбивач струму із самобалансуванням (ДтВС), а також двотактний вихідний каскад. Сукупність блоків ДВС, ПВС', ПВС'', зв'язаних між собою, являє двоконтурний вибірковий ЗЗ, який балансує робочі точки  $T'$  і  $T''$ , а також симетрує коефіцієнти передачі проміжних каскадів підсилення [12]. Парафазні входи ДтВС є низькоомними ( $r_{вх} < 1 \text{ Ом}$ ), що сприяє розширенню смуги пропускання двотактного підсилювача [13]. Вихідний каскад збільшує коефіцієнт передачі ДППС до потрібного значення. Конденсатори  $C1, C2, C3$  забезпечують стійкість функціонування у діапазоні частот.

Наявність  $R_H$  на виході схеми викликає появу ненульового струму  $I_{вих}$  і відповідно розбалансу емітерних струмів  $T'_d$  і  $T''_d$ . Якщо ДППС у БП відсутній, то за законом Кірхгофа:

$$I_{вих} = I_e(T'_d) - I_e(T''_d).$$

За умови однаковості струмів  $I'_p = I''_p = I'_{зм} = I''_{зм}$  маємо  $I_e(T'_d) = \tilde{I}'_{вих}$  і  $I_e(T''_d) = \tilde{I}''_{вих}$ . Якщо  $I_{вих} = 0$ , то  $\tilde{I}'_{вих} = \tilde{I}''_{вих} = I_p$ . Проаналізуємо, як  $\tilde{I}'_{вих}$  і  $\tilde{I}''_{вих}$  залежать від  $I_{вих}$ .

При цьому слід зазначити, що виходячи з базових рівнянь [14] для p-n-переходів, маємо суму напруг:

$$\sum U_{p-n} = U_{T'_d} + U_{T''_d} = \phi_T \cdot \ln \frac{\tilde{I}'_{вих}}{I_T} + \phi_T \cdot \ln \frac{\tilde{I}''_{вих}}{I_T} = \phi_T \cdot \ln \frac{\tilde{I}'_{вих} \cdot \tilde{I}''_{вих}}{I_T^2}, \quad (1)$$

де  $I_T$  – початковий тепловий струм.

Потенціюючи (1) з урахуванням  $I_{вих}$ , отримаємо:

$$\tilde{I}'_{вих} \cdot (\tilde{I}'_{вих} + I_{вих}) = I_T^2 \cdot e^{\frac{\sum U_{p-n}}{\phi_T}}. \quad (2)$$

Підставляючи у (2) вираз (1) для  $\sum U_{p-n}$  і, здійснюючи перетворення, маємо:

$$\tilde{I}'_{вих} \cdot (\tilde{I}'_{вих} + I_{вих}) = I_p^2.$$

Звідси знайдемо:

$$\tilde{I}'_{вих} = -\frac{1}{2} \cdot I_{вих} + \sqrt{\frac{I_{вих}^2}{4} + I_p^2}. \quad (3)$$

Аналогічно отримаємо:

$$\tilde{I}''_{вих} = \frac{1}{2} \cdot I_{вих} + \sqrt{\frac{I_{вих}^2}{4} + I_p^2}. \quad (4)$$

Графіки залежностей (3) і (4) наведено на рис. 4. Аналіз їх показує, що пропорційне (лінійне) змінення  $\tilde{I}'_{вих}$  і  $\tilde{I}''_{вих}$  має місце лише в околі нуля. Таким чином для підвищення лінійності передатної характеристики БП треба знижувати вихідний струм ядра до мінімуму. Це можливо зробити використовуючи ДППС, як показано на рис. 1.

Для схеми ДППС, наведеної на рис. 3, коефіцієнти передачі по парафазних виходах можна оцінити, спираючись на викладки, наведені в [12]. Нехай малосигнальні коефіцієнти передачі по верхньому і нижньому каналах ДППС визначаються, відповідно, у вигляді:

$$K'_i = \frac{\Delta I_{\text{ВИХ}}}{\tilde{I}'_{\text{ВИХ}}}, \quad K''_i = \frac{\Delta I_{\text{ВИХ}}}{\tilde{I}''_{\text{ВИХ}}}.$$

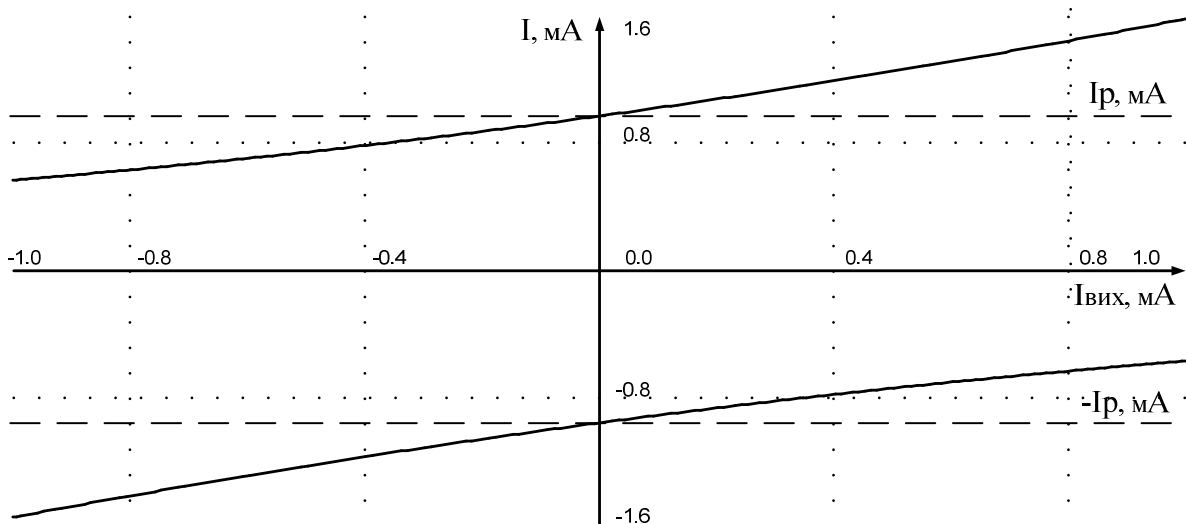


Рисунок 4 – Залежності  $\tilde{I}'_{\text{ВИХ}} = f(I_{\text{ВИХ}})$  і  $\tilde{I}''_{\text{ВИХ}} = f(I_{\text{ВИХ}})$

При цьому завдяки дії вибіркового ЗЗ маємо:

$$K'_i \approx K''_i = 2 \cdot \frac{(\beta')^2 \cdot (\beta'')^2}{(\beta' + \beta'')^2}.$$

Для вибраних транзисторів  $\beta' = 64$ ,  $\beta'' = 100$ .

Таким чином  $K'_i \approx K''_i \approx 3050$ . Загальний коефіцієнт передачі з виходу ядра БП на вхід ДППС дорівнює:

$$K_i \approx 2 \cdot K'_i \approx 2 \cdot K''_i \approx 6100,$$

що добре узгоджується з результатами комп'ютерного моделювання.

Слід зазначити, що критичним чинником, що впливає на статичні характеристики БП, є внутрішні опори генераторів струму,  $I_p$  і  $I_{3M}$ , які повинні бути значно (на порядок) більше, ніж  $r_k$  для схеми із загальною базою. Для їх реалізації доцільно використовувати підходи, розглянуті в [10, 13].

Досить задовільні результати має схема, наведена на рис. 5 а). Внутрішні опори такого генератора при застосуванні біполярних інтегральних транзисторів фірми INTERSIL серії HFA3046/3096 та польових n-канальних транзисторів серії 2N3070 і р-канальних 2N2608 мають такі значення:  $r'_p = r'_{3M} \approx 20$  ГОм,  $r''_p = r''_{3M} \approx 9$  МОм. Це є достатнім і практично не знижує статичні характеристики ядра БП.

Генератор компенсації струму зсуву нуля  $I_{\text{КС}} "0"$  може бути реалізованим за допомогою схеми, наведеної на рис. 5 б). Застосування такого рішення на практиці дозволяє знизити  $I_{\text{ВХ}}$  у 20-50 разів і обмежується рівнем ідентичності статичних характеристик інтегральних біполярних транзисторів.

БП, реалізований із застосуванням запропонованих схемних рішень при  $I_p = I_{зм} \approx 1 \text{ мА}$ , має такі характеристики:

Діапазон вхідної і вихідної напруги	- ± 10 В;
Вхідний опір	- 30 МОм;
Напруга зсуву нуля	- 2 мВ;
Струм зсуву нуля	- 150 нА;
Максимальний вихідний струм у навантаженні ( $R_n=2 \text{ кОм}$ )	- 5 мА;
Абсолютна похибка масштабу	- ± 20 мкВ;
Абсолютна похибка лінійності	- 1 мкВ;
Час усталення вихідної напруги (±10 В) на рівні $0,95 U_{\text{max}}$	- 40 нс;
Напруга живлення	- ± 20 В.

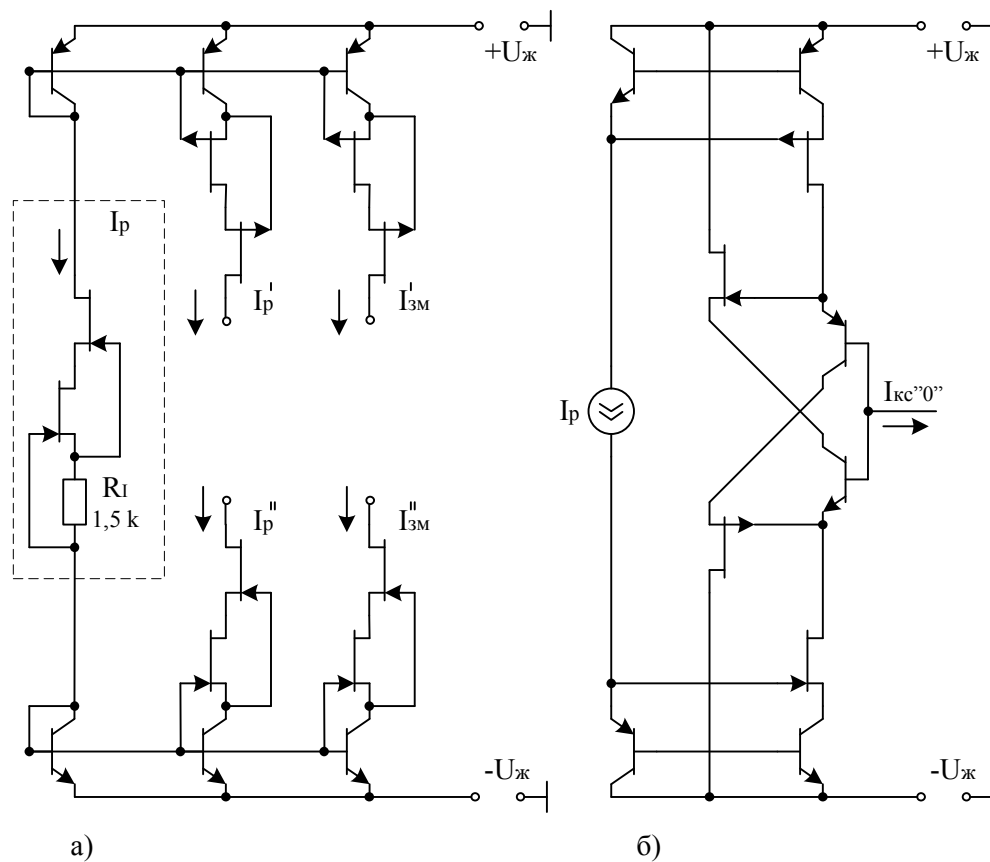


Рисунок 5 – Схеми генераторів струму: а) двонаправлений генератор  $I_p$  і  $I_{зм}$ ; б) генератор  $I_{кc}''0''$

Отримані метрологічні характеристики свідчать про те, що вказаний пристрій може застосовуватися у прецизійних електронних системах, зокрема, у багаторозрядних ( $n \geq 16$  дв. розрядів) аналого-цифрових системах вимірювання, перетворення і реєстрування високої продуктивності.

При цьому слід зазначити, що напруга живлення пристрою може бути знижена на декілька вольт за умови реалізації генераторів  $I_p$  і  $I_{зм}$  на біполярних транзисторах. Це можливо, наприклад, застосовуючи методи, наведені у [10], проте схемотехніка таких генераторів ускладниться.

### Висновки

Показано, що запропонований метод підвищення навантажувальної здатності двотактних БП напруги суть якого полягає в поєднанні надвисоколінійного ядра з широкосмуговим ДППС, дозволяє отримати значно кращі статичні і динамічні характеристики, порівняно з реалізацією БП на основі операційного підсилювача.

Проаналізовано вплив негативних чинників, які можуть спотворювати передатну характеристику схеми. Доведено, що застосування спеціальної схемотехніки, зокрема, із веденням спеціалізованих відби-

вачів струму, а також широкосмугових ДППС дозволяє нейтралізувати дію цих чинників і досягти потрібних параметрів схеми.

Доведено, що уведення у схему активного ЗЗ у вигляді спеціалізованого ДППС дозволяє розвантажити високолінійне ядро БП і істотно (на порядок) підвищити навантажувальну здатність пристрою.

#### Список літератури

1. Азаров О. Д. Прецизійні буферні пристрої на базі двотактних симетричних структур / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №3 (22). – С. 4-12. – ISSN 1999-9941.
2. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : монографія / Азаров О.Д. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 257 с.
3. Азаров О. Д. Високолінійні аналогові пристрої для багаторозрядних аналого-цифрових систем / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів. // Проблеми інформатизації та управління. Національний авіаційний університет. – 2011. – №4 (36). – С. 6-18. – ISSN 2073-4751.
4. Toumazou C. Novel Current-Mode Instrumentation Amplifier / C. Toumazou, F. J. Lidgey // – Electron. Lett. – 1985. – №21(15). – 640-642 p.
5. Toumazou C. Extending Voltage-Mode op-amps to Current-Mode Performance / C. Toumazou, F. J. Lidgey, S.A. Makris // – IEE Proc. – 1990. №137(2). – 116-130 p. – ISSN 0018-9219.
6. Toumazou C. Novel Current-Mode Instrumentation Amplifier / C. Toumazou, F. J. Lidgey // – Electron. Lett. – 1989. – №25(3). – 228-230 p.
7. Bruun E. Current-conveyor Based EMG Amplifier with Shutdown Control / E. Bruun, E. U. Haxthausen // – Electron. Lett. – 1990. – №27(23). – 2172-2174 p. – ISSN 0013-5194.
8. Yodprasit U. High-precision CMOS current conveyor / U. Yodprasit // – Electron. Lett. – 2000. – vol.36, №27(23). – 609-610 p. – ISSN 0013-5194.
9. Пат. на корисну модель 51014 Україна, МПК (2009) Н 03 К 5/22, G 05 В 1/00. Буферний каскад / Азаров О. Д., Дудник О. В., Богомолів С. В., Кадук О. В. ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u201000934 ; заявл. 29.01.10 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
10. Азаров О. Д. Методи покращення статичних характеристик відбивачів струму. / О. Д. Азаров, В. Є. Яцик. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – №1 (23). – С. 31-39. – ISSN 1999-9941.
11. Амелина М. А., Програма схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. / Амелина М. А., Амелин С. А. – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. – 617 с., ил.
12. Азаров О.Д. Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються : монографія / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 156 с. – ISBN 978-966-641-435-2
13. Азаров О. Д. Відбивачі струму для аналогових пристроїв із покращеними статичними і динамічними характеристиками. / О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, В. Є. Яцик. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – №2 (24). – С. 48-55. – ISSN 1999-9941.
14. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники : учебное пособие для вузов. [2-е изд. перераб. и доп.] / Степаненко И. П. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с., ил. – ISBN 5-932208-045-0.

#### Відомості про авторів

**Азаров Олексій Дмитрійович** – д.т.н., проф., завідувач кафедри обчислювальної техніки ВНТУ, [azarov2@vntu.edu.ua](mailto:azarov2@vntu.edu.ua).

**Богомолів Сергій Віталійович** – асистент, кафедра ОТ ВНТУ, [bogomolovsergiy@rambler.ru](mailto:bogomolovsergiy@rambler.ru).

**Теплицький Михайло Юхимович** – аспірант кафедри ОТ ВНТУ, [michaeltepl@gmail.com](mailto:michaeltepl@gmail.com).

**Яцик Володимир Євгенійович** – студент, кафедра ОТ ВНТУ, [yatsyk.ve@gmail.com](mailto:yatsyk.ve@gmail.com).

УДК 004.056.055

В. А. ЛУЖЕЦЬКИЙ, А. В. ОСТАПЕНКО

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

## АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ СИМЕТРИЧНОГО БЛОКОВОГО ШИФРУВАННЯ

**Анотація.** Проведено аналіз алгоритмів симетричного блокового шифрування з точки зору способу реалізації перетворення вхідних даних у шифротекст. Сформульовано рекомендації для вибору перетворень, що забезпечать підвищення швидкості шифрування.

**Ключові слова:** симетричні блокові шифри (СБШ), криптографія, шифр, шифрування.

**Аннотация.** Проведен анализ алгоритмов симметричного блочного шифрования с точки зрения способа реализации преобразования входных данных в шифротекст. Сформулированы рекомендации для выбора преобразований что обеспечат повешение скорости шифрования.

**Ключевые слова:** симметричные блочные шифры (СБШ), криптография, шифр, шифрование.

**Abstract.** We analyzed the symmetric block cipher algorithms, depending on the method of converting input data into ciphertext. We proposed recommendations for selection of transformations that will provide increasing speed of encryption.

**Key words:** symmetric block cipher, cryptography, cipher, encryption.

## Вступ

Кожний вид інформації має свої специфічні особливості, що суттєво впливають на вибір методів її шифрування. Велике значення відіграють об'єм та необхідна швидкість передачі даних. Потреба вирішення проблеми захисту електронної інформації обумовлює актуальність розробки шифрів, як одного із видів криптографічних перетворень, що використовують для захисту інформації в комп'ютерних системах та мережах.

## Актуальність

На сьогоднішній день переважна більшість стійких криптосистем реалізована на основі симетричних блокових шифрів (СБШ). Алгоритми шифрування СБШ реалізують принцип, який полягає в тому, що багатократно виконується перетворення блоку даних з використанням секретного ключа шифрування. За підходами до реалізацій цього перетворення виділяють блокові шифри побудовані на основі мереж Фейстеля, чергування процедур перестановок і підстановок (SP-мереж), структури «квадрат» (Square) [1] та операцій за модулем [2]. Оскільки всі вони мають майже однакові характеристики швидкості шифрування, стійкості до відомих атак, тому важливо вибрати блоковий шифр, який найбільш повно враховує наявні у розробників систем захисту програмні та апаратні засоби.

## Мета

Метою статті є аналіз сучасних симетричних блокових шифрів для вибору перетворень, що забезпечать підвищення швидкості шифрування.

## Постановка задач

Як правило, алгоритми зашифрування та розшифрування СБШ є ітераційними і складаються з послідовності перетворень (рис. 1).

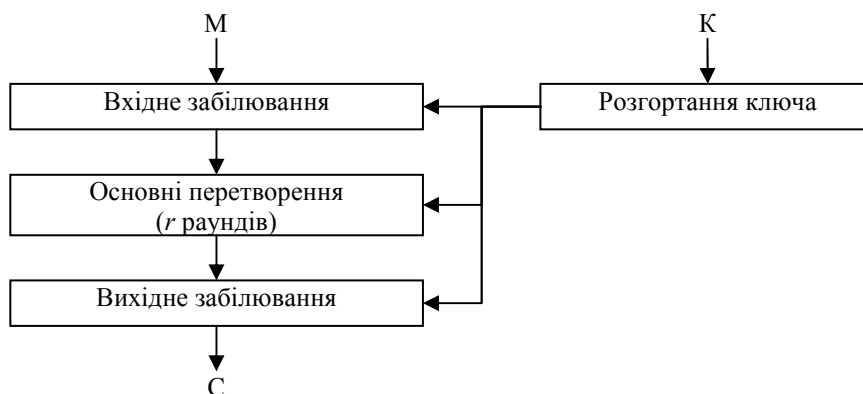


Рисунок 1 – Загальна схема перетворення даних у СБШ

В кожному раунді використовується окремий раундовий ключ, який отримується як результат процедури розгортання секретного ключа. Задачею даної процедури є формування необхідної кількості раундових ключів із секретного ключа, обмеженого розміру. Найпростіша її реалізація передбачає розбиття ключа на частини, які по черзі використовуються у раундах. Для зменшення розміру ключа дана процедура будується як складне багатоетапне перетворення, що модифікує секретний ключ [1]. Процедури

вхідного та вихідного заплівання змішують вхідні дані  $M$  і результат перетворення після  $r$ -го раунду з ключовою інформацією, шляхом використання операцій побітового додавання, XOR.

Основні перетворення СБШ можуть бути представлені певною кількістю послідовних використань слабкого блокового шифру, що називається раундом перетворення. Ці перетворення описуються однією і тією ж функцією, але в якості аргументів якої використовуються результат попереднього перетворення і відповідний раундовий ключ. Узагальнена схема раундового перетворення СБШ представлена на рис. 2, де  $k_i$  – раундовий ключ;  $m_i$  – блок вхідного повідомлення;  $F$  – функція раундового перетворення;  $c_i$  – блок криптограми після  $i$ -го раунду перетворення.

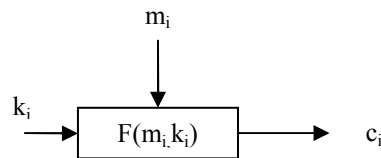


Рисунок 2 – Узагальнена схема раундового перетворення СБШ

В загальному випадку, функція раундового перетворення є послідовністю залежних від ключа нелінійних замінів, «міксуючих» перестановок та циклічних зсувів [3].

Відповідно до способів комбінування секретних систем [4] для отримання нової секретної системи, основні перетворення даних у СБШ можуть бути представлені як добуток секретних систем:

$$S = \prod_{i=1}^n T_i, \quad (1)$$

де  $S$  – комбінована секретна система;  $T_i$  –  $i$ -а секретна система (раунд перетворення) з набору  $n$  секретних систем.

Тобто, використання сукупності слабких раундів утворюють стійкий шифр [4]. Оскільки набір і послідовність виконання операцій в раундах є незмінними, криптографічна стійкість розглянутих СБШ залежить від розміру секретного ключа, складності виконуваних операцій або кількості раундів перетворення, у разі використання простих операцій. Такий спосіб побудови перетворень СБШ значно полегшує як їх реалізацію (апаратну та програмну), так і їх криптографічний аналіз, що дозволяє будувати атаки на меншу кількість раундів, згодом розширюючи їх [1].

Незалежно від способу реалізації основних перетворень сучасні СБШ, мають задовольняти таким загальноприйнятим вимогам:

1. Знання алгоритму не повинно зменшувати криптостійкість шифру (правило Керкоффа) [4].
2. Стійкість алгоритму шифрування повинна залежати тільки від секретного ключа [4].
3. Використання довжини блоку не менше 128 біт ( $2 \times 64$  біт) [1]. Хоча розмір блоку 64 біт є на сьогоднішній день безпечним, але зважаючи на швидкий ріст можливостей елементної бази, вже в недалекому майбутньому можливі вдалі реалізації певних видів атак.
4. Можливість використання різного розміру секретного ключа (128, 192, 256 біт) [1].

Недоліки алгоритмічної реалізації основних перетворень СБШ можуть призводити до зменшення їх криптографічної стійкості та зменшення швидкості процедур зашифрування, розшифрування. Тому постає задача аналізу СБШ з точки зору способу реалізації перетворення вхідних даних у шифротекст для вибору перетворень, що забезпечать підвищення швидкості шифрування. У переважній більшості СБШ основні перетворення побудовані на основі мереж Фейстеля, чергування процедур перестановок і підстановок (SP-мереж), структури «квадрат» та операцій за модулем. Розглянемо детальніше ці підходи.

#### Блокові шифри на основі мереж Фейстеля

Відомі мережі Фейстеля з двома [1] та чотирма гілками [5]. В мережі Фейстеля на дві гілки оброблюваний блок розбивається на два підблоки  $L$ ,  $R$ . Для кожного раунду обчислюється:

$$L_i = R_{i-1} \oplus F(L_{i-1}, k_{i-1}), R_i = L_{i-1}.$$

Результатом виконання  $r$  раундів є блоки  $L_r$ ,  $R_r$  зашифрованої інформації. На рис. 3 наведено типову схему раунду перетворення на основі мережі Фейстеля з двома гілками.

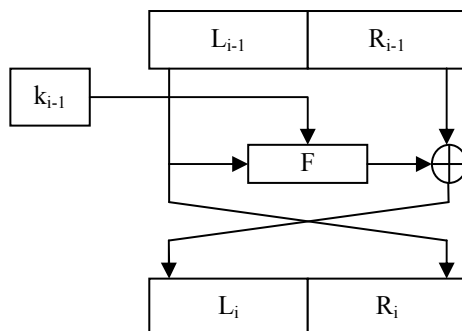


Рисунок 3 – Схема раунду перетворення на основі мережі Фейстеля з двома гілками

Основні кількісні характеристики сучасних СБШ на основі мережі Фейстеля з двома гілками [1] представленні в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики СБШ на основі мережі Фейстеля з двома гілками

Алгоритм	Кількість раундів $r$	Довжина ключа $K$ (біт)	Розмір блоку $W$ (біт)
<a href="#">Blowfish</a>	16	32-448	64
<a href="#">Camellia</a>	18	128	128
	24	192/256	
<a href="#">CAST-128</a>	12	40/64/80	64
	16	128	
<a href="#">CAST-256</a>	48 (12×4)	128/160/192/224/256	128
<a href="#">DEAL</a>	6	128/192	128
	8	256	
<a href="#">DES</a>	16	56	64
<a href="#">DFC</a>	8	128/192/256 (або 0-256)	128
ГОСТ-28147-89	32	256	64
E2	12	128/192/256	128
<a href="#">FEAL-N</a>	4-32	64	64
Сімейство HPC	8	Без обмеження	Без обмеження
ICE	16	64	64
<a href="#">KASUMI</a>	8	128	64
<a href="#">Khufu</a>	8-64 (кратне 8)	64-512 (кратне 64)	64
<a href="#">LOKI97</a>	16	128/192/256	128
<a href="#">Lucifer</a> (4)	16	128	128
<a href="#">MAGENTA</a>	6	128/192	128
	8	256	
<a href="#">MISTY1</a>	4× $n$ (8)	128	64
<a href="#">RC5</a>	1-255	0-2040	32/64/128
<a href="#">TEA</a>	64	128	64
<a href="#">XTEA</a>	64	128	64

Аналіз табл. 1 дозволяє виділити такі особливості СБШ побудованих на основі мереж Фейстеля з двома гілками. У більшості шифрів задані конкретні фіксовані значення кількості раундів, довжини ключа та розміру блоку (DES, ICE, KASUMI, TEA та ін.), але в деяких (Blowfish та ін.) значення одного або декількох параметрів можуть бути без обмежень (Сімейство HPC) або варіюватись в межах кратності певному значенню (Khufu, MISTY1). Кількість раундів мінімально можлива від 4-х, 8-и і максимально до 32-х, 64-х. Шифр RC5 має діапазон можливих значень кількості раундів від 1 до 255 (рекомендований мінімум 4 раунди). Значення заданої довжини ключа від 40-64 до 512 біт, причому використання більшої довжини ключа також збільшує необхідну кількість раундів (Camellia, CAST-128, DEAL, MAGENTA). Преважна більшість СБШ передбачають використання блоків по 64 та 128 біт, лише Сімейство HPC не накладає обмежень на довжину блоку та шифр RC5 підтримує мінімальну довжину блоку 32 біт.

У кожному СБШ використовується деяка фіксована множина операцій, на базі якої і будується раундова функція, причому конкретний набір операцій суттєво впливає на швидкість процедур шифрування. Тому, проаналізуємо набір базових операції для СБШ, побудованих на основі мережі Фейстеля з двома гілками (табл. 2).

Таблиця 2 – Базові операції для СБШ на основі мережі Фейстеля з двома гілками

Алгоритм	Бієктивні математичні функції		Побітові циклічні зсуви (змінні/фіксовані)		Логічні		Таблична заміна	Перестановка (керована/таблична)
	Дод. за $\text{mod}2^N$	Множ. за $\text{mod}2^N$	Вліво	Вправо	« $\ll$ »	« $\gg$ »		
<a href="#">Blowfish</a>	( $N=32$ )						4 табл.	
<a href="#">Camellia</a>			( $\phi=1$ )		+	+	4 табл.	(т)
<a href="#">CAST-128</a>	( $N=32$ )	( $N=32$ )	(з)				4 табл.	
<a href="#">CAST-256</a>	( $N=32$ )	( $N=32$ )	(з)				4 табл.	
<a href="#">DEAL</a>							8 табл.	(т)
<a href="#">DES</a>							8 табл.	(т)
<a href="#">DFC</a>	( $N=64$ )	( $N=64$ )					+	
ГОСТ-28147-89	( $N=32$ )		( $\phi=11$ )				8 табл.	
E2		( $N=32$ )	( $\phi=1$ )			+	+	(т)
<a href="#">FEAL-N</a>	( $N=8$ )		( $\phi=2$ )					
Сімейство HPC	( $N=64$ )		(з/ $\phi=2,8,12,22,32$ )	(з/ $\phi=4,5,11,17,23$ )	+			
ICE							4 табл.	(к,т)
<a href="#">KASUMI</a>			( $\phi=1$ )		+	+	2 табл.	
<a href="#">Khufu</a>			( $\phi=8,24,16$ )				1-8 табл.	
<a href="#">LOKI97</a>	( $N=64$ )						2 табл.	(к,т)
<a href="#">Lucifer (4)</a>							2 табл.	(т)
<a href="#">MISTY1</a>					+	+	2 табл.	
<a href="#">RC5</a>	( $N=16-64$ )		(з)					
<a href="#">TEA</a>	( $N=32$ )		( $\phi=4$ )	( $\phi=5$ )				
<a href="#">XTEA</a>	( $N=32$ )		( $\phi=4$ )	( $\phi=5$ )				

Так серед бієктивних математичних функцій значно вживанішою є операція додавання за модулем  $2^N$  причому значення  $N$  варіюється від 8 (FEAL-N) до 128 (RC5). Найбільш поширеними є побітові циклічні зсуви вліво на фіксовану кількість біт, лише шифри Сімейства HPC, TEA, XTEA використовують циклічний зсув вправо. Група шифрів для побудови раундової функції не використовує операції табличних замін та перестановок, при цьому шифруючи дані комбінацією бієктивних математичних функцій та операцій циклічного зсуву (FEAL-N, Сімейство HPC, RC5, XTEA). Найбільша кількість таблиць замін передбачена в шифрах DEAL, DES, ГОСТ-28147-89 та Khufu у разі виконання 64 раундів. Найменший набір базових операцій використаний у шифрах FEAL-N та RC5, а найбільший  $\square$  у шифрах Camellia та E2. Операції парної перестановки та XOR є незмінними базовими операціями мереж Фейстеля (рис. 3), тому вони за замовчуванням присутні в усіх представниках даного виду і не були внесені в табл. 2. Побітові циклічні зсуви можуть бути як з фіксованим значенням (Camellia, ГОСТ-28147-89 та ін.), так і з змінними значеннями, що залежать від ключа (RC5, CAST-256 та ін.). Аналогічно і з операцією перестановки яка може бути заданою таблицею (Camellia, Lucifer (4) та ін.), або ж бути залежною від певних параметрів (ICE, LOKI97). В шифрах CAST-128, CAST-256, TEA, XTEA та в Сімействі HPC використовується додавання і віднімання за  $\text{mod} 2N$ . Шифр E2 виконує операції (зсуву, заміни та перестановки) над байтами. Окрім циклічного зсуву в деяких шифрах (TEA, XTEA) виконується арифметичний зсув біт. У DES виконується розширююча перестановка, що розширює вхідне значення з 32 до 48 біт. Khufu для кожних 8 раундів передбачає генерування нової таблиці замін, а в LOKI97 таблиці замін обробляють вхідні дані різної розрядності (11 та 13 біт). В алгоритмі Lucifer(4) виконується керована секретним ключем операція табличної заміни, що визначає яка із двох таблиць замін буде використана у відповідному раунді. БШ MAGENTA не увійшов до табл. 2 оскільки його перетворення побудовані на комбінації лише операції піднесення до степеня твірного елемента поля GF(28) та XOR.

Більшість сучасних СБШ використовують мережу Фейстеля з двома гілками в якості основи [1]. Основні перетворення побудовані за допомогою даної мережі є оберненими, а процедури зашифрування та розшифрування відрізняються лише порядком використання раундових ключів, для шифрів з однаковою функцією шифрування, або порядком використання функцій шифрування при використанні гетеро-

генної структури (MARS, CAST-128, CAST-256). Це дозволяє легко реалізувати шифри як на програмному, так і на апаратному рівні, використовуючи один фрагмент апаратної схеми чи програмного коду, що забезпечує максимально компактну реалізацію і широкі можливості застосування [1].

Є три типи мереж Фейстеля на чотири гілки, що покладені в основу побудови СБШ (рис. 4), де  $X_1...X_4$  – блоки вхідного повідомлення,  $Y_1...Y_4$  – блоки шифротексту [1, 5].

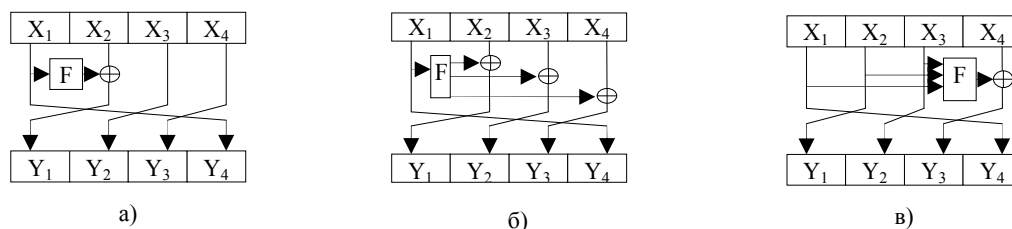


Рисунок 6 – Схема раунду перетворення на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками:  
а) тип 1; б) тип 2; в) тип 3

Кількісні характеристики СБШ на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками [1] наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики СБШ на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками

Алгоритм	Кількість раундів $r$	Довжина ключа $K$ (біт)	Розмір блоку $W$ (біт)	Тип структури
<a href="#">CLEFIA</a>	18	128	128	1
	22	192		
	26	256		
<a href="#">IDEA</a>	8+1	128	64	2
<a href="#">MacGuffin</a>	32	128	64	3
<a href="#">MARS</a>	32	128-1248	128	2
NUSH	36	128	64	3
	68	192	128	
	132	256	256	
<a href="#">RC2</a>	16+2	8-1024	64	3
<a href="#">RC6</a>	20	128/192/256	128	1
<a href="#">SPEED</a>	>32 (кратне 4)	64-256 (кратне 16)	64/128/256	3
<a href="#">Skipjack</a>	32	80	64	1
<a href="#">Twofish</a>	16	128/192/256	128	1

Проаналізувавши табл. 3 можна відзначити такі особливості. Всі представники СБШ на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками передбачають розбиття блоку вхідного повідомлення на 4 підблоки окрім шифру SPEED, що обробляє 8 підблоків. Переважна більшість використовує перший та третій тип структури, лише IDEA, MARS побудовані за принципом структури типу два. Кількість раундів зазвичай є фіксованим значенням, що збільшується відповідно до збільшення довжини ключа (CLEFIA, NUSH), лише в SPEED передбачено використання змінної кількості раундів у кількості не менше 32 (кратній 4). При чому шифр SPEED єдиний серед розглянутих у табл. 3 СБШ підтримує змінний розмір блоків. Максимальну довжину ключа дозволяють використовувати шифри MARS (1248 біт) та RC2 (1024 біт), мінімальну RC2 та SPEED 8 та 64 біт відповідно. Основний набір базових операцій для СБШ побудованих на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками представлений в табл. 4. У шифрі Twofish також передбачено використання операції множення на матрицю даних, отриманих після операцій табличних замінів. Шифр IDEA використовує множення за модулем (216+1). Операція побітового циклічного зсуву у шифрі NUSH виконується на змінну кількість біт, значення яких задано в таблиці і залежить від номеру раунда, також за схожим принципом по чергово використовуються, в залежності від відповідної таблиці, логічні операції «І» та «АБО». Шифр RC2 в функції раундового перетворення використовує логічну операцію «НІ» (інверсія підблоку), та циклічний зсув вліво на змінну кількість біт, значення яких задано таблицею від 1 до 5. Конкретні значення  $N$  в операції додавання за модулем  $2^N$  та фіксованого циклічного зсуву вправо у шифрах SPEED, NUSH залежать від розміру блоку, що обробляється. Аналіз табл. 4 дозволяє стверджувати, що найчастіше в СБШ побудованих на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками використовується операція додавання за модулем  $2^N$ , при цьому використання множення передбачено лише в RC6. Найбільша кількість базових операцій використовується в шифрах MARS, Twofish, а найменшу у IDEA.

Таблиця 4 – Базові операції для СБШ на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками

Алгоритм	Бієктивні математичні функції		Побітові циклічні зсуви (змінні/фіксовані)		Логічні		Таблична заміна	Перестановка (керована/таблична)
	Дод. за $\text{mod}2^N$	Множ. за $\text{mod}2^N$	Вліво	Вправо	« $\ll$ »	«АБО»		
<a href="#">IDEA</a>	( $N=16$ )	+						
<a href="#">MacGuffin</a>							8 табл.	(т)
<a href="#">MARS</a>	( $N=32$ )		( $z/\phi=13,5$ )	( $\phi=8$ )			3 табл.	
NUSH	( $N=16-64$ )			( $z$ )	+	+		
<a href="#">RC2</a>	( $N=16$ )		( $z=1-5$ )		+			(т)
<a href="#">RC6</a>	( $N=32$ )	( $N=32$ )	( $z,\phi=5$ )					
<a href="#">SPEED</a>	( $N=8/16/32$ )			( $z,\phi=3/7/15$ )	+			
<a href="#">Skipjack</a>	( $N=10$ )						+	
<a href="#">Twofish</a>	( $N=32$ )		( $\phi=1,8$ )	( $\phi=1$ )			4 табл.	

В роботі [5] були наведені ряд переваг СБШ побудованих на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками. Так домінування незмінної частини (тип 3) дозволяє ускладнити характер залежності значення функції  $F$  від своїх аргументів, при цьому розмір зашифрованої частини є малим, тому для досягнення заданого рівня криптостійкості необхідно збільшити кількість ітерацій (NUSH), що впливає на швидкість шифрування. Коли ж відбувається домінування змінної частини (тип 1, 2) функція  $F$  залежить від меншої за розміром частини блоку, тому для неї спрощується процес встановлення закономірностей. Але після кожного раунда змінюється більша частина блоку, що ускладнює перетворення та компенсує цей недолік. При цьому стійкість СБШ побудованих на основі мереж Фейстеля з чотирма гілками до лінійного криптоаналізу більша ніж в СБШ побудованих на основі мережі Фейстеля з двома гілками [5].

СБШ на основі мереж Фейстеля мають такі недоліки:

1. Відносно невисока швидкість процедур зашифрування, розшифрування, оскільки один раунд обробляє лише половину (для мережі на дві гілки) або частину (для мереж на чотири гілки) блоку вхідного повідомлення, що вимагає збільшення кількості ітерацій [1,5].
2. Низькі оцінки стійкості до статистичних методів криптоаналізу [5].
3. Потреба в енергонезалежній пам'яті при використанні великої кількості таблиць заміни (CAST-128, LOKI97, MacGuffin та ін.).

### Блокові шифри на основі SP-мереж

У блокових шифрах побудованих на основі SP-мереж обробка даних зводиться, в основному, до заміни (коли, наприклад, фрагмент вхідного блоку замінюється іншим фрагментом відповідно до таблиці заміни  $S$ , яка може залежати від значення ключа) і перестановок  $P$ , залежних від ключа [1]. Узагальнена схема раунду основних перетворень наведена на рис. 5.

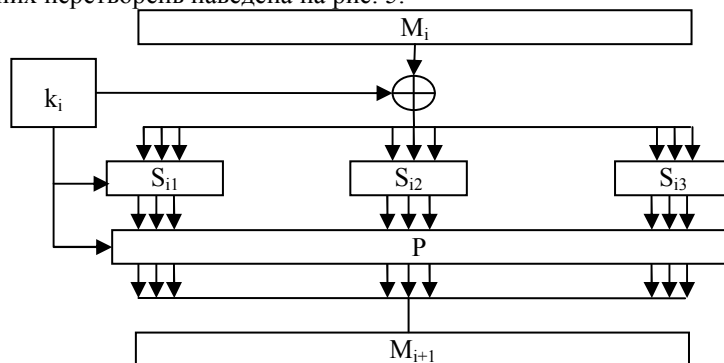


Рисунок 5 – Схема раунду перетворення на основі SP-мережі

Чим більше S-блок, тим важче знайти статистичні залежності для розкриття методами криптоаналізу. Більшість випадкових S-блоків нелінійні і характеризується високою стійкістю до лінійного криптоаналізу, причому із зменшенням кількості вхідних бітів стійкість знижується достатньо повільно [6]. P-блоки реалізують операції перестановки, за допомогою яких маскуються взаємозв'язки між відкритим текстом, шифротекстом і ключем. Особливість перестановки полягає в використанні таких перетворень, які виключають можливість відновлення взаємозв'язку статичних властивостей відкритого та зашифро-

ваного повідомлення [6]. Основні кількісні характеристики сучасних СБШ, побудованих на основі SP-мереж [1], представленні в табл. 5.

Таблиця 5 – Характеристики СБШ на основі SP-мереж

Алгоритм	Кількість раундів $r$	Довжина ключа $K$ (біт)	Розмір блоку $W$ (біт)
3-Way	11	96	96
ARIA	12/14/16	128,192,256	128
CS-Cipher	8	8-128	64
Diamond2	10-15	8-65536	128
Hierocrypt-L1	6	128	64
Khazad	8	128	64
SAFER+	8/12/16	128/192/256	128
Serpent	32	128/192/256	128
SC2000	7	128	128
	8	192/256	
Threefish	72	256/512	256/512/1024
	80	1024	

Аналіз табл. 5 показує, що більшість СБШ використовують в середньому 8-16 раундів, що значно менше порівняно з СБШ побудованими на основі мереж Фейстеля. Максимальна кількість раундів 80 виконується в шифрі Threefish для блоку 1024 біт і ключа 1024 біт відповідно, який оперує простими операціями. Найбільший діапазон значень ключа заданий в шифрі Diamond2 8-65536 біт. Значення розміру блоку в СБШ варіюється від 64 (CS-Cipher, Khazad) до 1024 біт (Threefish).

Проаналізуємо набір базових операцій для СБШ побудованих на основі SP-мереж (табл. 6).

Таблиця 6 – Базові операції для СБШ на основі SP-мереж

Алгоритм	Дод. за $\text{mod}2^N$	Побітові циклічний зсув вліво (змінні/фіксовані)	Логічні операції	Таблична заміна	Перестановка	Множ. на матрицю
ARIA				4 табл.		+
CS-Cipher		( $\phi=1$ )	«I»/«HI»	/+	+	
Hierocrypt-L1				+		+
Khazad				+		+
SAFER+	+				+	+
Serpent		( $\phi=1,3,5,7,13,22$ )		8 табл.	+	
SC2000			«I»	3 табл.	+	+
Threefish	( $N=64$ )	( $z$ )			+	

Операція XOR присутня у всіх розглянутих СБШ тому не винесена в табл. 6. Шифр ARIA використовує різну комбінацію таблиць заміни для парних та непарних раундів. У CS-Cipher передбачена можливість виконання або табличної заміни або обчислення функції, значення якої можна визначити за таблицею чи обчислити, в залежності від наявних ресурсів. У шифрах SC2000, CS-Cipher виконується додаткове накладання констант на блок даних. Шифр Hierocrypt-L1 передбачає використання двох матриць  $4 \times 4$  та  $8 \times 8$ . Усі операції SAFER+ виконуються за модулем 256. Таблиці заміни Serpent згенеровані з таблиць DES. Також його лінійне перетворення може реалізовуватись у вигляді табличної заміни або ж як ряд обчислень (побітова циклічний зсуви вліво та XOR). Аналізуючи табл. 6 можна сказати про масове використання СБШ побудованими на основі SP-мереж операції множення на матрицю. Табличні заміни можуть бути реалізовані у вигляді таблиць, або ж як ряд операцій (CS-Cipher, Serpent, ARIA). Перестановки є фіксованими і задаються таблично (SAFER+, Serpent та ін.). Операція додавання за модулем використовується лише у Threefish, структура якого не передбачає S-блок.

СБШ, побудовані на основі SP-мереж, є стійкими до різних видів криптоаналізу, завдяки високому степеню нелінійності основних перетворень [6]. В загальному випадку процедури зашифрування та розшифрування суттєво відрізняються, що збільшує складність їх апаратної та програмної реалізації. Використання табличних заміни суттєво впливає на швидкість процедур зашифрування та розшифрування та вимоги шифрів до енергонезалежної пам'яті [1]. Вищенаведені недоліки сповільнюють процес розробки та дослідження СБШ даного типу.

#### Блокові шифри на основі структури «квадрат» (Square)

Для структури «квадрат» характерним є представлення блоку у вигляді двовимірного байтового масиву. Криптографічні перетворення можуть виконуватись над окремими байтами масиву, а також над

його стовпчиками та рядками [1]. Основні кількісні характеристики сучасних СБШ побудованих на основі структури «квадрат» [1, 7] наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Характеристики СБШ на основі структури «квадрат»

Алгоритм	Кількість раундів $r$	Довжина ключа $K$ (біт)	Розмір блоку $W$ (біт)
AES (Rijndael)	10	128	128
	12	192	192
	14	256	256
Anubis	$8+K[32]$	128-320 (кратне 32)	128
CRYPTON	12	8-256 (кратне 8)	128
Grand Cru	10	128	128
Noekon	16	128	128
Q	8/9	128/192/256	128
SQUARE	8	128	128

Аналіз табл. 7 показує, що для СБШ побудованих на основі структури «квадрат» характерним є представлення блоку 128 біт у вигляді масиву (4×4) байт, лише шифр Noekon оперує блоком представленим у вигляді 4-х рядків по 32 біт. Можлива кількість раундів від 8 (SQUARE) до 18 (Anubis), причому змінну кількість підтримує лише шифр Anubis та Q залежно від довжини ключа. Більшість представників передбачають використання заданого розміру ключа або змінний 8-320 біт (CRYPTON, Anubis). У зв'язку з своєрідним представленням блоку даних специфічними є і операції, що використовуються для СБШ даного типу, оскільки вони можуть виконуватись над рядками, стовпчиками, байтами та бітами блоку. Вхідне та вихідне забілювання зазвичай виконує комбінацію декількох операцій основного перетворення (SQUARE, Grand Cru та ін.).

Набір базових операцій для СБШ побудованих на основі структури «квадрат» наведено в табл. 8.

Таблиця 8 – Базові операції для СБШ на основі структури «квадрат»

Алгоритм	Циклічні зсуви (байт/біт)	Таблична заміна (байт)	Перестановка (байт/біт)	Множення на матрицю
AES (Rijndael)	(байт)	+		
Anubis		+	(байт)	+
CRYPTON		5 табл.	(біт, байт)	
Grand Cru	(біт)	+	(байт)	+
Noekon	(біт)	+		
Q	(байт)	3 табл.		
SQUARE		+	(байт)	

У шифрі AES використовується операція множення стовпців. У CRYPTON для табличних заміни використовуються 4 (різні для парних та непарних раундів) таблиці, а для перестановки біт використовуються маскуючі константи та логічна операція «І». Для вхідного забілювання у Grand Cru байти блоку послідовно додаються із значеннями таблиці заміни (взята з AES). Також, значення циклічного зсуву вправо біт рядка залежить від ключа, а операція додавання виконується за модулем 256. У шифрі Q використовується однаковий ключ для всіх раундів шифрування та запозичені таблиці заміни, з шифру AES, а інші із Serpent, при цьому передбачено використання циклічного зсув вгору у стовпчику на змінну кількість байт. Шифр SQUARE реалізує лінійне перетворення над рядком шляхом множення байт за модулем 28. У шифрі Noekon усі операції виконуються над бітами рядку. Аналіз базових операцій для СБШ побудованих на основі структури квадрат (табл. 8) дозволяє зробити висновки про специфіку використання цих операцій. Так циклічні зсуви можуть виконуватись не лише вліво та вправо оперуючи бітами та байтами але і вгору в стовпчику (Q). Таблична заміна байт передбачена використанням всіх розглянутих СБШ даного типу. Найбільшу кількість таблиць (5) використовує шифр CRYPTON, причому основною є одна таблиця, а чотири інші генеруються з неї за допомогою операції циклічного зсуву вліво. Операція перестановки замінює  $i$ -й рядок і  $i$ -й стовпчик, лише у шифрі CRYPTON додатково присутня перестановка біт. Найбільшу кількість базових операцій використано у шифрі Grand Cru, а найменшу у Anubis та Noekon.

Проведені дослідження у роботі [7] свідчать про високу стійкість цього класу блокових шифрів. Використання байт-орієнтованої структури дозволяє забезпечити ефективну реалізацію на 8-бітних мікроконтролерах [1, 3]. Проте, використання табличних заміни байт суттєво позначаються на швидкості шифрування блокових шифрів на основі структури Square.

#### Блокові шифри на основі арифметичних операцій за модулем

Основні перетворення даних СБШ передбачають використання операцій множення та додавання за модулем [2]. Характеристики таких СБШ, представлених в табл. 9.

Таблиця 9 – Характеристики СБШ на основі операцій за модулем

Алгоритм	Кількість раундів $r$	Довжина ключа $K$ (біт)	Розмір блоку $W$ (біт)
ABC	17	512	256
Caligo	6	128	128
		256	256
MMB	6	128	128
MultiSwap	12	374	64
xmx	8	256	256
		512	512
	12	768	768
	16	1024	1024

Аналізуючи табл. 9 можна відзначити, що максимальну кількість раундів ( $r=17$ ) для СБШ, побудованих на основі операцій за модулем, використовує шифр ABC, а мінімальну ( $r=6$ ) – шифри MMB та Caligo. Значення довжини ключа шифрування варіюється від 128 біт (MMB) до 1024 біт (xmx), і залежить від розміру блоку (xmx, Caligo, MMB). Мінімальним розміром блоку оперує шифр MultiSwap (64 біт), а максимальним – xmx (1024 біт). У шифрах ABC [8] та MMB [2] операція множення за модулем використовується як функція побітового перемішування. У СБШ Caligo [9] виконується множення за модулем. Процес зашифрування одного блоку даних СБШ MultiSwap [10] складається з 12 раундів, з яких на 5 і 11 раундах виконується додавання підблоку даних за модулем 232 з ключем, а на решті раундів виконується множення підблоку даних за модулем 232 з відповідним ключем. Основні перетворення блокового шифру xmx [11] базуються на операціях множення за модулем та XOR. Спочатку здійснюється побітове додавання  $n$ -бітного блоку даних з секретним ключем  $A$ , отриманий результат множиться на теж саме значення  $A$  за модулем  $2^n - 1$ . В процесі розшифрування в якості множника використовують обернене мультиплікативне  $A$  за модулем  $m$ , що обчислюється з використанням розширеного алгоритму Евкліда. У роботі [12] запропоновано СБШ, який оперує з  $n$ -бітними блоками даних і  $n$ -бітними ключем. Процес зашифрування блоку даних виконують з використанням таких перетворень:

$$Y = f'((X \oplus K_1) \cdot K_2 \bmod 2^n) \cdot K_3 \bmod 2^n,$$

де  $K_1, K_2, K_3$  – підключі ( $K_1, K_3$  – непарні);  $f'(\cdot)$  – функція дзеркальної перестановки і бітних підблоків  $n$ -бітного блоку даних. Процес розшифрування обернений по відношенню до зашифрування і вимагає пошук обернених мультиплікативних за модулем  $2^n$ .

СБШ на основі операцій за модулем мають недоліки з точки зору необхідності використання платформ, що підтримують операції множення, додавання (32, 64 біт), для досягнення необхідної швидкості шифрування. Використання одного і того самого ключа для двох різних груп операцій на всіх раундах шифрування (xmx, MultiSwap) і відкритого значення модуля не забезпечує достатній рівень криптографічної стійкості шифру, проти атак, з використанням мультиплікативних диференціалів [13].

#### Висновки

Наведений аналіз відомих СБШ дозволяє сформулювати рекомендації для вибору перетворень, що забезпечать підвищення швидкості шифрування:

1. Використання великої кількості табличних замінів збільшує вимоги шифру до енергонезалежної пам'яті (Camellia, CAST-128, E2, LOKI97 та ін.). Тому для підвищення швидкості шифрування необхідно передбачити можливість реалізації табличної заміни як таблиці або певною послідовністю алгебраїчних операцій, для вибору у конкретній системі.

2. Масове використання операцій орієнтованих на певний вид платформ (DFC, NPC, RC6, та ін.) суттєво зменшує швидкість шифрування СБШ на інших платформах, що обмежує можливості їх використання.

3. Використання складних багатоетапних процедур розгортання секретного ключа значно зменшують швидкість шифрування (Blowfish, Twofish, Hierocrypt-L1), але і використання елементарної процедури розгортання ключа (MAGENTA, TEA, Noekeon та ін.) збільшує можливість успішної атаки на зв'язаних ключах (Related-key attack). Отже, для збільшення швидкості шифрування процедура розгортання секретного ключа повинна бути реалізована максимально просто з можливістю розпаралелення обчислень в багатопроцесорних системах.

4. В багатьох СБШ (FEAL-N, SPEED) збільшення рівня криптографічної стійкості досягається шляхом збільшення кількості раундів шифрування, що значно зменшує швидкість шифрування. Тому, стійкість шифру не повинна досягатись лише виключно збільшенням кількості ітерацій перетворення.

5. Використання складної функції раундового перетворення з великою кількістю базових операцій (Twofish, MARS, SC2000 та ін.) суттєво впливає на швидкість шифрування. До того ж ускладнює можливість детального аналізу стійкості шифру та унеможливує доведення відсутності прихованих вразливо-

стей. Тому, структура основних перетворень СБШ повинна бути максимально зрозумілою та прозорою для її аналізу та дослідження.

6. Використання однорідних структур перетворень може призвести до того, що закономірність одного раунду може бути розповсюджена на весь ланцюжок основних перетворень, полегшуючи тим самим криптоаналіз. Тому, в останній час деякі автори криптоалгоритмів використовують неоднорідну (гетерогенну) структуру, в якості основи для СБШ. При цьому різні раунди шифрування можуть мати вразливості різних типів, але в сукупності забезпечувати високу стійкість перетворення.

Для підвищення основних характеристик блокових шифрів, рядом дослідників пропонуються альтернативні шляхи побудови перетворення даних одним з яких є використання принципів псевдодетермінованих алгоритмів [14]. Можливість створення ними великої кількості модифікацій алгоритму шифрування теоретично робить неможливим попередні статистичні дослідження, які є базовими для найпопулярніших сучасних методів криптографічного аналізу. Оскільки стійкість алгоритмів таких шифрів забезпечується, на відміну від існуючих, не складністю функції перетворення, а невизначеним порядком їх застосування (з точки зору злоумисника) та змінною структурою оброблюваної інформації, тому зникає потреба у використанні складних обчислень. Перетворення будуються на базі елементарних операцій, які найбільш просто та швидко реалізуються в сучасних мікропроцесорах, що обумовлює швидкість їх виконання.

### Список літератури

1. Панасенко С. П. Алгоритмы шифрования. Специальный справочник / С. П. Панасенко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 576 с.
2. Daemen J. Block ciphers based on modular arithmetic / J. Daemen, R. Govaerts // In Proceedings of the 3rd symposium on State and Progress of Research in Cryptography, W. Wolfowicz (ed.), Fondazione Ugo Bordoni, 1993. – pp. 80-89.
3. Винокуров А. Ю. Новые подходы в построении блочных шифров с секретным ключом / А. Ю. Винокуров. – Режим доступу до статті: <http://www.enlight.ru/crypto/index.htm>
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон ; пер. с англ. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 830 с.
5. Schneier B. Unbalanced Feistel Networks and Block-Cipher Design / B. Schneier, J. Kelsey // Counterpane Systems. – Режим доступу до статті: <http://www.schneier.com/paper-unbalanced-feistel.pdf>
6. Kam J. Structured design of substitution-permutation encryption networks / J. Kam, G. Davida // IEEE Transactions on Computers. – 1979. – Vol. 28, №10. – P. 747.
7. Knudsen L. The block cipher SQUARE / L. Knudsen, J. Daemen, V. Rijmen // Computer Science. – Springer-Verlag, 1997. – Vol. 1267. – pp. 149-165. – Режим доступу до статті: <http://citeseerx.ist.psu.edu>
8. Schmidt D. ABC – A Block Cipher / D. Schmidt // Cryptology ePrint Archive. – 2002. – P. 50 – Режим доступу до статті: <http://eprint.iacr.org/2002/062>.
9. Machado A. Caligo, an Extensible Block Cipher and CHash, a Caligo Based Hash / A. Machado // Cryptographic Hash Algorithm Competition, 2006. – P. 11. – Режим доступу до статті: <http://csrc.nist.gov>
10. Screamer B. Microsoft's digital rights management scheme-technical details / B. Screamer. – 2001. – Режим доступу до статті: <http://cryptome.org/ms-drm.htm>.
11. M'Raihi D. MX: A Firmware-Oriented Block Cipher Based on Modular Multiplications / D. M'Raihi and others // Lecture Notes in Computer Science. – 1997. – Vol. 1267. – pp. 166-171.
12. Сокирук В. В. Побудова статистично безпечного БСШ на основі арифметичних операцій за модулем / В. В. Сокирук, В. А. Лужецький // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – В.: ВНТУ, 2006. – №1. – С. 158-163
13. Borisov N. Multiplicative differentials / N. Borisov, M. Chew, R. Johnson // Fast Software Encryption: 9th International Workshop on table of contents. – 2002. – Vol. 2365. – pp. 17-33.
14. Лужецький В. А. Блочний шифр на основі псевдодетермінованих послідовностей криптопримітивів / В. А. Лужецький, А. В. Остапенко, // Наукові праці ВНТУ. – № 4 (2010). – Режим доступу до статті: <http://www.nbu.gov.ua>.

### Відомості про авторів

**Лужецький Володимир Андрійович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри Захисту Інформації. Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

**Остапенко Аліна Василівна** – аспірант кафедри захисту інформації. Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, e-mail: [asja87@gmail.com](mailto:asja87@gmail.com)

УДК 004.383, 004.4'24

В. А. МЕЛЬНИК

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

**ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОГО ГЕНЕРУВАННЯ  
ПРОГРАМНИХ МОДЕЛЕЙ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПРОЦЕСОРІВ  
У САМОКОНФІГУРОВНІЙ КОМП'ЮТЕРНІЙ СИСТЕМІ**

**Анотація.** В статті запропоновано структуру і розроблено принципи функціонування та алгоритм роботи засобів автоматичного генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів, що входять до складу самоконфігуровної комп'ютерної системи.

**Ключові слова:** Самоконфігуровна комп'ютерна система, засоби генерування програмних моделей процесорів, програмні моделі спеціалізованих процесорів.

**Аннотация.** В статье предложена структура и разработаны принципы функционирования и алгоритм работы средств автоматического генерирования программных моделей специализированных процессоров, входящих в состав самоконфигурируемой компьютерной системы.

**Ключевые слова:** Самоконфигурируемая компьютерная система, средства генерирования программных моделей процессоров, программные модели специализированных процессоров.

**Abstract.** This paper proposes specialized processors IP Cores automatic generation facilities: their structure, principles of work and algorithm of functioning. Proposed facilities are intended to be used in the self-configurable computer system.

**Key words:** Self-configurable computer system, IP Cores generation facilities, specialized processors IP Cores..

**Вступ**

На протязі останнього десятиліття відбулися значні зміни в галузі проектування та мікроелектронного виробництва комп'ютерних засобів. Отримала подальший розвиток технологія проектування програмних моделей обчислювальних пристроїв [1], яка описує процес розробки архітектури обчислювальних пристроїв на рівні міжрегістрових передач з використанням мов опису апаратних засобів (VHDL [2], Verilog [3], ін.) і їх реалізації в мікросхемах програмовної логіки, найчастіше – програмовних логічних інтегральних схемах (ПЛІС).

Покращення технічних характеристик ПЛІС та їх невисока вартість посприяли відновленню інтересу до напрямку розробки реконфігурованих комп'ютерних систем (РККС), в яких універсальні комп'ютери об'єднані з реконфігурованим середовищем на основі мікросхем програмовної логіки. Об'єднання універсального комп'ютера з реконфігурованим середовищем в єдину систему дозволяє виконувати обчислювальні завдання значно швидше, ніж без нього, що забезпечується створенням в цьому середовищі спеціалізованих процесорів для апаратного виконання найбільш обчислювально складних частин завдань. Наявність на ринку реконфігурованих прискорювачів – пристроїв, які містять реконфігуроване середовище і засоби взаємодії з хост-комп'ютером через один або декілька стандартних інтерфейсів, робить можливою реалізацію РККС на базі довільного універсального, у тім числі й персонального комп'ютера.

Поряд з високою продуктивністю, яка забезпечується реконфігурованими комп'ютерними системами (РККС), є й ряд проблем, пов'язаних з їх застосуванням. Це, зокрема, значні часові затрати на виконання розподілу обчислювального навантаження, часта відсутність необхідних для реалізації в реконфігурованому середовищі РККС програмних моделей спеціалізованих процесорів, що викликає необхідність розробки цих моделей від початку, та високі додаткові вимоги до кваліфікації користувачів РККС, оскільки вони, крім моделювання і програмування, повинні виконувати системний аналіз та розподіляти обчислювальне навантаження, розробляти архітектуру спеціалізованих процесорів, здійснювати їх синтез та реалізацію в реконфігурованому середовищі.

**Аналіз останніх досліджень**

Реконфігуровні комп'ютерні системи, їх будову та організацію функціонування на різних рівнях висвітлено в роботі [4]. В результаті аналізу цієї роботи можна зробити висновок про значну інертність таких систем, що є наслідком необхідності виконання їх конфігурування / реконфігурування перед використанням. В роботі [5] запропоновано концепцію побудови самоконфігурованих прискорювачів, а в роботі [6] – метод їх самоконфігурування, згідно з якими всі кроки із здійснення конфігурування виконуються комп'ютерною системою автоматично.

Запропоновано в роботі [5] концепцію взято за основу при побудові самоконфігуровної комп'ютерної системи, яка позбавлена проблем застосування, притаманних РККС. Самоконфігуровна комп'ютерна система (СККС) – це комп'ютерна система, яка містить універсальний комп'ютер, реконфігуроване середовище, побудоване на основі ПЛІС або інших типів інтегральних схем програмовної логіки, а також програмні засоби, які автоматично розподіляють обчислювальне навантаження між універсальним комп'ютером і реконфігурованим середовищем та самостійно виділяють з комп'ютерної програми фрагменти, виконання яких в реконфігурованому середовищі прискорює роботу комп'ютерної системи, самостійно створюють в цьому середовищі пристрої (спеціалізовані процесори) для виконання виділених фрагментів програми та самостійно організують їх функціонування та взаємодію з універсальним процесом

ром. Проблема інертності, притаманна РККС і викликана витратами часу на їх конфігурування, в СККС знімається завдяки зміні способу опрацювання нею інформації.

#### Постановка завдання

Однією з компонент СККС є система генерування, функцією якої є автоматичне створення програмних моделей спеціалізованих процесорів на основі опису виконуваних ними обчислювальних алгоритмів мовою програмування високого рівня. Під програмною моделлю спеціалізованого процесора розуміють його представлення у вигляді програми мовою опису апаратних засобів на рівні міжрегістрових передач або нижчому.

Сьогодні існує значна кількість методів та програмних засобів генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів. На ринку наявні засоби автоматичної генерації програмних моделей [7, 8], бібліотеки програмних моделей [9], а також системи високорівневого проектування програмних моделей спеціалізованих процесорів на основі опису алгоритмів їх роботи мовою високого рівня [10–12]. В роботі [13] сформовано вимоги до системи генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів, на основі яких можна провести аналіз особливостей існуючих засобів генерування на предмет ефективності їх застосування в СККС. Разом з тим, питання розроблення структури цієї системи та методики її функціонування досі не розглядалися. Саме ці питання і є предметом наукового дослідження, висвітленого в даній статті.

#### Функція системи генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів

Система генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів (далі – система генерування) є одним з базових програмних засобів, що входять до складу СККС і надають їй властивості самоконфігуровності. Функцією системи генерування в СККС є автоматичне створення програмної моделі процесора для виконання обчислювальних алгоритмів, отриманих від іншої компоненти СККС – системи розподілу обчислювального навантаження. Функцію системи генерування можна описати наступним виразом:

$$PMSP(A_i, i = \overline{1 \dots z}) = GS(PR^{SCCS}(A_i, i = \overline{1 \dots z})) \quad (1)$$

де  $GS$  – система генерування;  $PR^{SCCS}$  – подана деякою мовою програмування програма, що описує обчислювальні алгоритми  $A_i, i = \overline{1 \dots z}$ , які має виконувати реалізований в реконфігурованому середовищі СККС спеціалізований процесор (далі – програма спеціалізованого процесора (СП));  $PMSP$  – програмна модель спеціалізованого процесора для виконання обчислювальних алгоритмів  $A_i, i = \overline{1 \dots z}$ ;  $z$  – кількість обчислювальних алгоритмів.

#### Типи засобів генерування програмних моделей обчислювальних пристроїв

Сьогодні на ринку присутні наступні типи програмних засобів, які виконують функцію автоматичного створення програмних моделей обчислювальних пристроїв:

1. генератори на основі конфігурованих програмних моделей процесорів [7, 8];
2. генератори на основі бібліотек програмних моделей процесорів та процесорних компонент [9];
3. системи автоматизованого проектування програмних моделей процесорів з мови високого рівня [10 – 12].

Генератором програмних моделей процесорів називають програмну систему, яка містить конфігуровану програмну модель процесора та засоби автоматичного виконання її конфігурування. Генератори автоматично створюють програмні моделі процесорів, виходячи з значень вхідних конфігураційних параметрів. Кількість генерованих програмних моделей процесорів залежить від кількості  $k$  конфігураційних параметрів  $P_i, i = \overline{1 \dots k}$ , розрядності  $n_{CCP_i}$  конфігураційного коду кожного параметра, яка рівна  $\lceil \log_2 N_{P_i} \rceil$ , де  $N_{P_i}$  – кількість значень цього параметра,  $\lceil \rceil$  – більше ціле значення, та кількості взаємовиключних комбінацій між параметрами. Результатом роботи генератора є програмні моделі процесорів, представлені однією або кількома мовами опису апаратних засобів, системи тестування програмних моделей процесорів, командні скрипти для виконання їх компіляції, симуляції та синтезу, документація користувача та ін.

Принципи побудови генератора програмних моделей процесорів та його реалізація можуть бути різними. Найпростішим є створення програмних моделей цифрових елементів на основі їх конфігурованих програмних моделей мовами VHDL або Verilog. Саме таким способом реалізовано системи IP Core Generator фірми Aldec [7] та CORE Generator System фірми Xilinx [8]. Разом з тим, ефективність

цього підходу зменшується з підвищенням складності обчислювального пристрою. Тому для генерації складних пристроїв використовують інші, ефективніші підходи, зокрема, підхід на основі бібліотек програмних моделей процесорів та їх компонент.

Генератор на основі бібліотеки програмних моделей процесорів [9] складається з бібліотеки програмних моделей, описаних мовою опису апаратних засобів, та засобів керування бібліотекою. Засоби керування бібліотекою отримують від користувача конфігураційні коди, що задають параметри програмної моделі процесора, та вибирають з множини наявних в бібліотеці програмних моделей процесорів таку модель, яка відповідає заданим параметрам.

Генератори на основі бібліотеки процесорних компонент [9] «конструюють» програмну модель, використовуючи для цього розміщені в бібліотеці компоненти, представлені на певному рівні деталізації процесора. В таких генераторах присутні засоби конфігурування, які, крім вибирання потрібних компонент з бібліотеки, виконують їх компоновку і генерують файли опису верхнього рівня мовою опису апаратних засобів для кожного з рівнів ієрархії.

Середовища проектування, які дозволяють автоматично створювати програмні моделі потрібних процесорів з мови високого рівня, в більшості реалізацій використовують підхід виконання компіляції високорівневого опису алгоритму роботи обчислювального пристрою в код опису його архітектури мовою опису апаратних засобів. Для створення високорівневого опису алгоритму роботи обчислювального пристрою більшість засобів використовує модифікований варіант мови C, наприклад Mentor Graphics використовує IEEE standard System C, Celoxica – Handle C, Nallatech – DIME C, Impulse – Impulse-C, Mitronics – Mitrion-C, деякі засоби використовують ANSI C.

#### **Особливості застосування засобів автоматичного генерування програмних моделей обчислювальних пристроїв в СККС**

Відповідно до результату досліджень, висвітлених в роботі [13], засоби системи генерування в СККС повинні задовольняти вимогам а) в частині функціональної повноти системи генерування; б) в частині технічних характеристик генерованих системою генерування програмних моделей процесорів; та в) в частині архітектури генерованих системою генерування програмних моделей процесорів.

Як показали дослідження, єдиним типом засобів генерування програмних моделей процесорів, які характеризуються функціональною повнотою, є системи автоматизованого високорівневого проектування. Більше того, цей тип засобів є єдиним, де функціональні характеристики генерованого процесора задаються описом алгоритму його роботи на мові програмування високого рівня, що є необхідною умовою застосування в СККС. Тому як головний елемент системи генерування доцільно використовувати систему автоматизованого високорівневого проектування. Разом з тим, цей тип засобів генерування в більшості не відповідає вимогам в частині архітектури та в частині технічних характеристик процесорів; цим вимогам відповідають генератори на основі бібліотек та конфігурованих програмних моделей.

З огляду на це при побудові системи генерування доцільно використовувати декілька типів засобів генерування, що дасть можливість досягти максимального задоволення вимог до неї, зберігаючи при цьому її ортогональність. Крім того:

1. для виконання часто вживаних та критичних за часом виконання обчислень та прикладних алгоритмів доцільно використати наперед розроблені, добре оптимізовані програмні моделі процесорів, які можуть бути отримані з використанням генераторів на основі бібліотек;
2. програмні моделі процесорів в бібліотеках доцільно представляти на рівні файлів конфігурації ПЛІС реконфігурованого середовища СККС;
3. використання генераторів на основі конфігурованих програмних моделей процесорів не виглядає доцільним з огляду на те, що вони не мають жодних переваг над генераторами на основі бібліотек процесорних компонент, але поступаються їм ефективністю механізмів конфігурування;
4. оскільки функціональні характеристики процесорів для генераторів на основі бібліотек програмних моделей процесорних компонент задаються не програмою, а конфігураційними кодами, взаємодію такого генератора з системою розподілу обчислювального навантаження необхідно організувати шляхом прямої передачі команд від користувача до системи генерування.

#### **Структура засобів генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів**

Виходячи з наведених вище міркувань, можна визначити основні компоненти системи генерування спеціалізованих процесорів, яка відповідає сформованим в роботі [13] вимогам. Цими компонентами є:

1. система проектування програмних моделей процесорів з мови високого рівня;
2. генератор на основі бібліотек програмних моделей процесорів, представлених на рівні файлів конфігурації ПЛІС реконфігурованого середовища СККС;
3. генератор на основі бібліотек програмних моделей процесорних компонент;
4. блок аналізу коду програми.

Структуру такої системи генерування наведено на рис. 1. В наведеній структурі генератор  $G_{LPPM}$  на основі бібліотек програмних моделей процесорів містить множину бібліотек  $LPPM_i$ ,  $i = \overline{1..n}$ , де  $n$  – кількість бібліотек, а кожна  $i$ -та бібліотека складається з множини програмних моделей процесорів  $PPM_j$ ,  $j = \overline{1..z}$ , де  $z$  – кількість програмних моделей процесорів в бібліотеці, причому  $z = k$  при  $i = 1$ ;  $z = l$  при  $i = n$ , тобто:

$$\begin{aligned} G_{LPPM} &= \left\{ \left\{ LPPM_i, i = \overline{1..n} \right\}, SEM \right\}, \\ LPPM_i &= \left\{ PPM_j, j = \overline{1..z} \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $SEM$  – засоби пошуку і вибірки відповідної вхідним конфігураційним кодам програмної моделі процесора з бібліотеки. Кожна з програмних моделей  $PPM_j$  представлена у вигляді файлу конфігурації ПЛІС реконфігуровного середовища СККС.

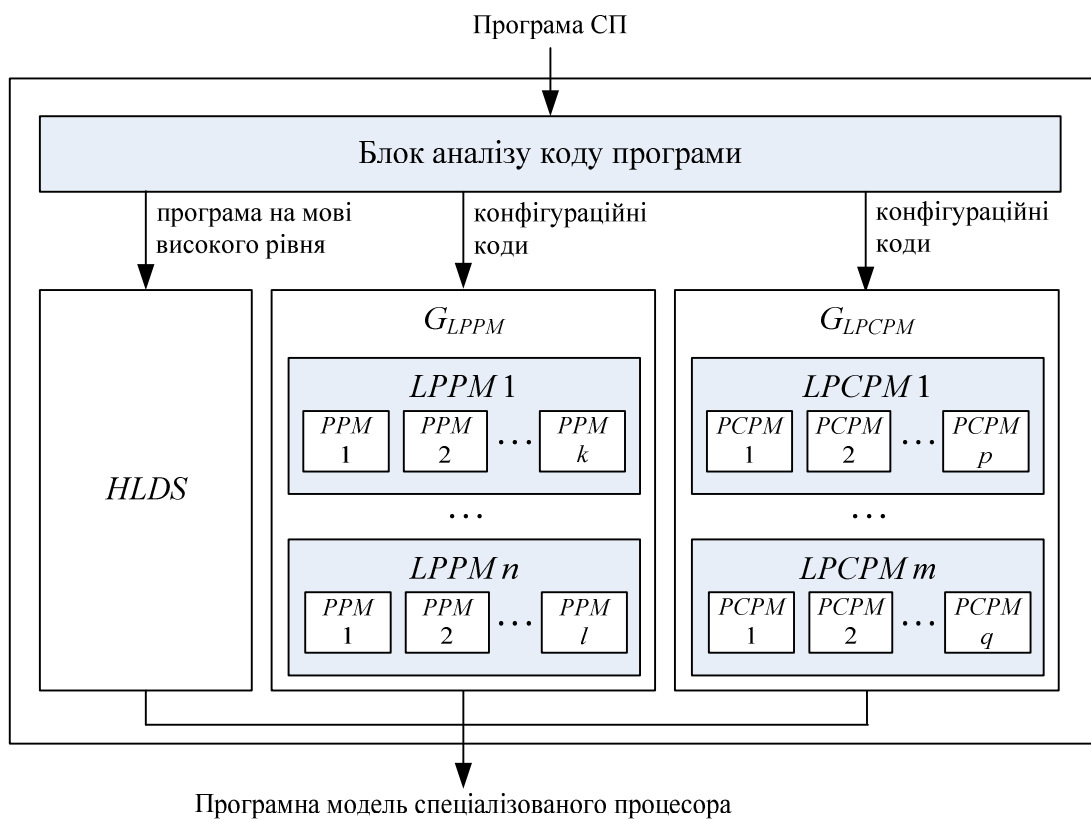


Рисунок 1 – Структура засобів генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів в самоконфігуровній комп'ютерній системі

Аналогічно, генератор  $G_{LPCPM}$  на основі бібліотек програмних моделей процесорних компонент містить множину бібліотек  $LPCPM_r$ ,  $r = \overline{1..m}$ , де  $m$  – кількість бібліотек, а кожна  $r$ -та бібліотека складається з множини програмних моделей процесорних компонент  $PCPM_s$ ,  $s = \overline{1..w}$ , де  $w$  – кількість програмних моделей процесорних компонент в бібліотеці, причому  $w = p$  при  $r = 1$ ;  $w = q$  при  $r = m$ , тобто:

$$\begin{aligned} G_{LPCPM} &= \left\{ \left\{ LPCPM_r, r = \overline{1..m} \right\}, SETLGM \right\}, \\ LPCPM_r &= \left\{ PCPM_s, s = \overline{1..w} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

де *SETLGM* – засоби пошуку і вибірки відповідних вхідним конфігураційним кодам програмних моделей процесорних компонент з бібліотеки та генерації файлів опису верхнього рівня процесора. Кожна з програмних моделей процесорних компонент  $PCPM_s$  представлена мовою опису апаратних засобів.

### Методика функціонування системи автоматичного генерування програмних моделей спеціалізованих процесорів

Запропонована система автоматичного генерування функціонує під керуванням блоку аналізу коду. Цей блок визначає, котра з компонент системи генерування буде генерувати програмну модель. Алгоритм функціонування блоку аналізу коду можна описати у вигляді блок-схеми, представленої на рис. 2.

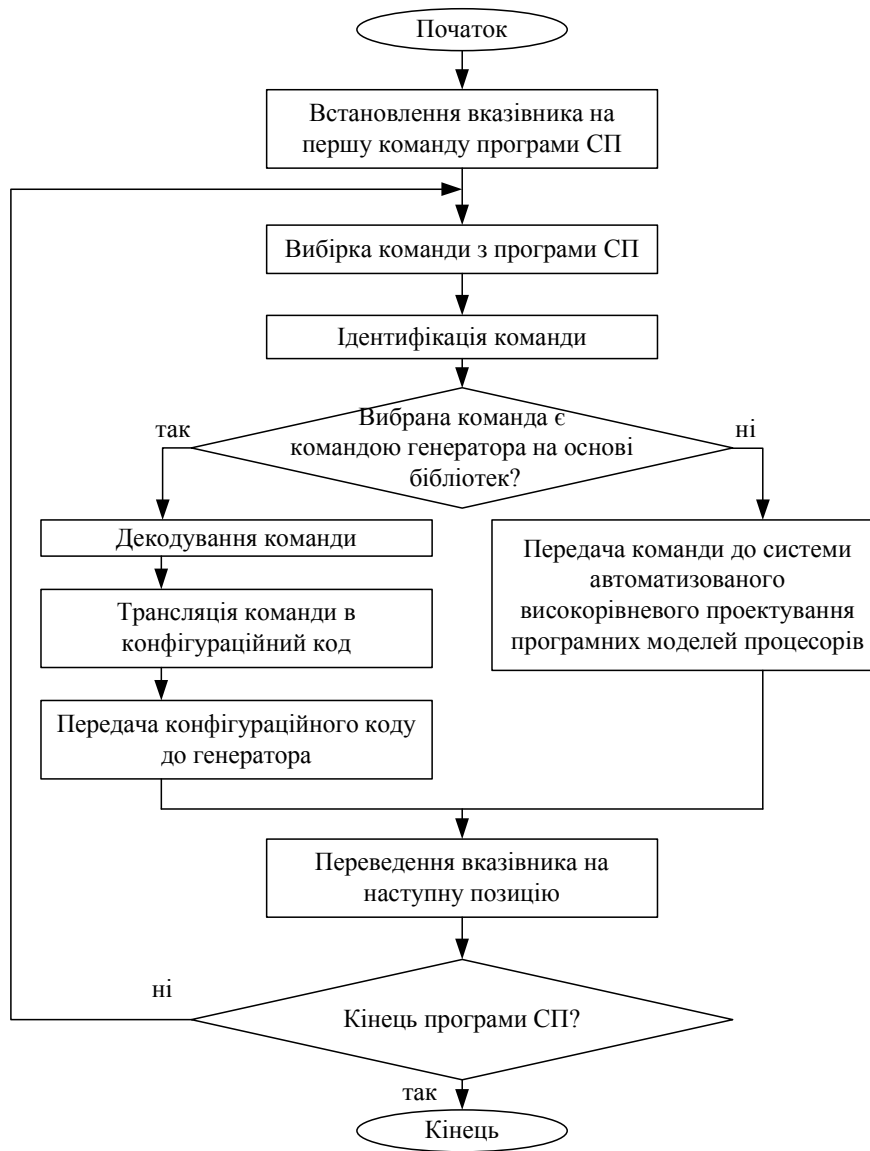


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму роботи блоку аналізу коду

Згідно з запропонованим алгоритмом, команди вибираються з програми СП по черзі. На початку роботи системи вказівник, який вказує поточну позицію, встановлюється на першу команду програми СП. Після вибірки команди виконується її ідентифікація, тобто визначення, чи належить дана команда до команд генераторів на основі бібліотек. В позитивному випадку виконується декодування команди, її трансляція в конфігураційний код та передача до відповідного генератора. В іншому випадку вважається, що дана команда представлена мовою програмування високого рівня, тому вона передається на входи системи автоматизованого високорівневого проектування програмних моделей процесорів. Після закін-

чення опрацювання поточної команди вказівник переводиться на наступну команду програми СП. Таким чином опрацюються всі команди програми СП.

#### Висновки

На основі аналізу особливостей функціонування засобів високорівневого проектування програмних моделей процесорів запропоновано структуру і розроблено принципи функціонування та алгоритм роботи системи генерування, до складу якої включено декілька типів засобів, а саме – генератори на основі бібліотек програмних моделей процесорів та процесорних компонент та систему автоматизованого високорівневого проектування програмних моделей процесорів з мови високого рівня. Застосування цих засобів в системі генерування при побудові самоконфігуровної комп'ютерної системи забезпечує її відповідність вимогам в частині функціональної повноти, в частині технічних характеристик моделей процесорів, та в частині архітектури моделей процесорів.

#### Список літератури

1. Keating M. «Reuse Methodology Manual for System-On-a-Chip Design» / M. Keating, P. Bricaud, Kluwer Academic Publishers, 1999, - 224 p.
2. IEEE, Standard VHDL Language Reference Manual. Standard 1076-1993, New York, NY: IEEE, 1993.
3. IEEE, Standard Verilog Hardware Description Language Reference Manual. Standard 1364-1995, New York, NY: IEEE, 1996
4. DeHon A. Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA-Based Computation / S.Nauk, A.DeHon // Morgan Kaufmann, 2008. – 944 p.
5. Мельник В. Самоконфігуровні апаратні прискорювачі обчислень в комп'ютерах / В. Мельник, З. Сарайрех // Вісник Національного університету „Львівська політехніка” «Комп'ютерні системи та мережі». - №688, Львів, 2010. -С.163 – 171.
6. Мельник В. Метод самоконфігурування апаратного прискорювача / Віктор Мельник, Зіад Сарайрех // Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених “Комп'ютерні науки та інженерія 2011” (CSE-2011), 24-26 листопада 2011, Україна, Львів. - С. 126-127.
7. A Proven EDA Solutions Provider makes all the difference. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <http://www.aldec.com/en>.
8. Xilinx Core Generator. Xilinx Inc. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: [http://www.xilinx.com/ise/products/coregen\\_overview.pdf](http://www.xilinx.com/ise/products/coregen_overview.pdf) - 2005.
9. Мельник В. Організація бібліотек ядер стандартизованих та замовних комп'ютерних пристроїв для високопродуктивних реконфігурованих прискорювачів / А. Мельник, В. Мельник // IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Комп'ютерні технології: наука і освіта», Україна, м.Луцьк, 9-11 жовтня 2009 р., Луцький інститут розвитку людини Університету «Україна», - С. 113-117.
10. Genest G. Programming an FPGA-based Super Computer Using a C-to-VHDL Compiler: DIME-C / G. Genest, R. Chamberlain, R. Bruce // Adaptive Hardware and Systems, 2007. AHS 2007. Second NASA/ESA Conference, 5-8 Aug. 2007. - P. 280 – 286.
11. Chameleon – the System-Level Design Solution. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: [http://intron-innovations.com/?p=sld\\_chame](http://intron-innovations.com/?p=sld_chame).
12. ANSI-C to VHDL Compiler. [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <http://www.nallatech.com/FPGA-Development-Tools/dimetalk.html>.
13. Мельник В. А. Вимоги до системи генерування моделей процесорів самоконфігуровного апаратного прискорювача / В. Мельник, З. Сарайрех // Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання» (ASCN-2011). – Львів, 2011. – С. 255 – 258.

#### Відомості про автора

**Мельник Віктор Анатолійович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Безпека інформаційних технологій» Національного університету "Львівська політехніка"; 79013, м. Львів, вул. Бандери 12; Тел: (032) 235-83-23, (067) 7631345; електронна пошта: [wiktor.melnyk@gmail.com](mailto:wiktor.melnyk@gmail.com).

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 519.233:331.546:159.91(045)

Є.Т. ВОЛОДАРСЬКИЙ, О.В. БУЛИГІНА

Національний технічний університет України "КПІ", м.Київ

СТАТИСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ ОПЕРАТОРІВ  
ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ВИДІВ ДІЯЛЬНОСТІ

**Анотація.** В роботі запропоновано статистичний підхід оцінювання професійної придатності операторів екстремальних видів діяльності. На основі введеного коефіцієнта енергетичної стійкості проаналізовано вплив особистих біоритмів та умов професійної діяльності на здатність виконувати цільову функцію. За результатами фізичного моделюючого експерименту визначено допустиме розсіювання коефіцієнта енергетичної стійкості. Введено тріступеневий критерій для оцінювання професійної придатності, в якому, в якості норми, прийнято розсіювання коефіцієнта енергетичної стійкості в екстремальних умовах.

**Ключові слова:** сигнали біоритмів, електроенцефалограми, психофізіологічний стан, кора головного мозку, дисперсія відтворюваності, енергетична стійкість, тріступеневий критерій.

**Аннотация.** В работе предложен статистический подход оценки профессиональной пригодности операторов экстремальных видов деятельности. На основе введенного коэффициента энергетической устойчивости проанализировано влияние личных биоритмов и условий профессиональной деятельности на способность выполнять целевую функцию. По результатам физического моделирующего эксперимента определены допустимое рассеяние коэффициента энергетической устойчивости. Введено трехступенчатый критерий для оценки профессиональной пригодности, в котором в качестве нормы принято рассеяние коэффициента энергетической устойчивости в экстремальных условиях.

**Ключевые слова:** сигналы биоритмов, электроэнцефалограммы, психофизиологическое состояние, кора головного мозга, дисперсия воспроизводимости, энергетическая устойчивость, трёхступенчатый критерий.

**Abstract.** This work presents a statistical approach of evaluating the proficiency of the operators of extreme kinds of activities. Based on the entered coefficient of the energetic stability has been done analysis of the influence of personal biorhythms and condition of professional work on the ability to perform objective function. According to the results of physical modeling of experiment it has been determined allowable dissipation of coefficient of energetic stability. Inputted three-level criteria to assess proficiency, in which the coefficient of energy stability in extreme conditions was taken as a norm.

**Keywords:** signals of biorhythms, electroencephalogram, physiological condition, cerebral cortex, the dispersion of reproducibility, energy stability, three-level criteria.

## Вступ та постановка проблеми

Ефективність виробничої діяльності оператора, в першу чергу, залежить від професійної придатності. В цьому сенсі професійна придатність - це відповідність моральних якостей, психофізіологічних показників і інтересів певного виду трудової діяльності. Професійна придатність багато в чому залежить від трудової мотивації і схильностей оператора реалізувати свої потенційні можливості і здібності у галузі. Для визначення рівня професійної придатності доцільно визначити психофізіологічний стан оператора.

На сьогоднішній день правила профвідбору операторів базуються, в основному, на оцінюванні фізичних можливостей за категорією «фізично здоровий». Однак, як показує практика, для групи людей, які відносяться до операторів екстремальних видів діяльності, не завжди оцінка фізіологічного рівня здоров'я є достатньою. Тому, на ряду з оцінкою фізіологічних можливостей оператора, необхідно дослідити його психологічний стан. Особливо це важливо для операторів екстремальних видів діяльності – людей, для яких виконання функціонального призначення залежить більше не від його фізіологічних даних, а від його психологічного стану, стійкості до стресових та емоційних навантажень (вміння оперативно приймати рішення). При вирішенні поставленої задачі, особливе значення має відповідність психологічних особливостей профілю роботи. Найчастіше для визначення професійної придатності використовують такі тести: інтелектуальні, здібностей, психомоторні, особистісні тести і тести інтересів. Як показує практика, ефективність цих методів недостатня.

У сучасній фізіології основою при діагностуванні психологічного стану є аналіз сигналів електричної активності мозку, які вимірюються методами електроенцефалографії [1,2]. Отримані таким чином сигнали (електроенцефалограми, ЕЕГ) широко використовуються як в клінічній практиці (наприклад, для діагностики захворювань), так і в дослідницькій роботі, оскільки, без сумніву, вони відображають фундаментальні процеси, що відбуваються в мозку. При аналізі ЕЕГ особливу увагу необхідно приділяти дослідженню психофізіологічного стану (ПФС) головного мозку оператора. При дослідженні ПФС головного мозку вирішальне значення набувають методи виявлення кількісних змін в експериментальних даних та способи формалізації цих змін. Таким чином, одним із засобів комплексного оцінювання психофізіологічного стану оператора є використання електроенцефалограм, які отримують при вимірюванні сигналів біоритмів головного мозку. Такі сигнали можуть забезпечити кількісну оцінку психофізіологічного стану головного мозку при використанні підходу «по збудженню». Так як для операторів екстремальних видів діяльності важливі їх психічний стан і реакція при переході з «спокійного» (фонового) стану до «збудженого» (стресового) дослідження доцільно проводити в обох цих станах.

## Мета дослідження

Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання професійної придатності операторів екстремальних видів діяльності за рахунок введення статистичного критерію оцінювання їх придатності до діяльності.

### Основний матеріал

Традиційно операторів поділяють за їх психоемоційними властивостями на категорії темпераменту: холерики, сангвініки, меланхоліки і флегматики. Кожна з зазначених категорій операторів відповідає визначеній сукупності психофізіологічних характеристик і параметрів, починаючи з рівня інтелекту і закінчуючи значеннями антропометричних параметрів. Однак оператори однієї і тієї ж категорії темпераменту мають широкий діапазон розбіжностей як по психофізіологічним характеристикам, так і по психофізіологічним параметрам. Тому при проведенні досліджень потенційного рівня можливостей організму оператора визначеної професійної орієнтації для кожної категорії темпераменту необхідно здійснювати інтеграцію операторів, об'єднавши у класи тих операторів, у яких медико-біологічний стан організму відповідає однаковим (близьким) за значенням психофізіологічним характеристикам і параметрам. Такий підхід дозволяє сформувати окремі класи операторів, для яких притаманний один і той же склад психофізіологічних характеристик і параметрів, але які для кожного класу відрізняються своїми кількісними показниками. Це забезпечує чисельне оцінювання професійної придатності операторів. Був введений критерій - рівень цільової виробничої функції  $[F_y(t)]$ . Зазначений критерій ототожнює такі якості оператора як амбіційність, самокритичність та схильність до мотивації. Таким чином всі оператори були попередньо поділені за своїми психоемоційними властивостями. В подальшому в експериментальних дослідженнях розглядався клас, який умовно назвали «суперсильний» відповідно до психоемоційних властивостей.

Відібрані групи піддавались випробуванням для визначення ознак, що характеризують специфіку їх професійної придатності. У якості інформативного беруться сигнали, що отримані за допомогою електроенцефалографу. Практично ЕЕГ здійснює вимірювання в основному  $\alpha$ -ритму, який найбільш активно проявляється майже у всіх ділянках головного мозку. Максимальне значення  $\alpha$ -ритму спостерігається в потиличній частині головного мозку. Тому при проведенні експериментальних досліджень розглядалися зазначені сигнали. Сигнали біоритмів представляють собою стохастичний сигнал, обробка якого вимагає застосування спеціальних методів. Одним з відомих методів обробки сигналів являється швидке перетворення Фур'є [3]. Сутність експериментальних досліджень полягає в тому, що за допомогою ЕЕГ вимірюються та аналізуються сигнали біоритмів в спокійному стані оператора і в збудженому стані. При цьому фіксуються миттєві значення сигналів, за якими обчислюються їх параметри. До таких параметрів відносяться амплітуда та частота. Ці параметри традиційно застосовуються в якості інформативних параметрів сигналів. Їх сукупність відображає та дозволяє надати якісну, а не інтегральну оцінку прояву ознак збудженості або енергетичної стійкості при випробуваннях на професійну придатність. На рис. 1,2 показані фрагменти вихідних сигналів  $\alpha$ -ритму у стані спокою та у збудженому стані відповідно для оператора, попередньо віднесеного до категорії темпераменту «суперсильний». По осі абсцис відкладено час в секундах, а по осі ординат-напруга в мкВ.

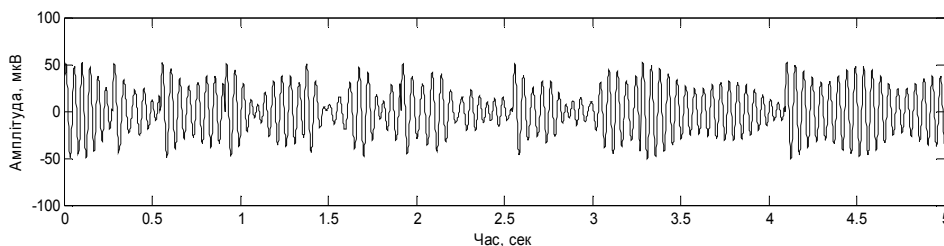


Рисунок 1 – Сигнали  $\alpha$ -ритму в стані спокою

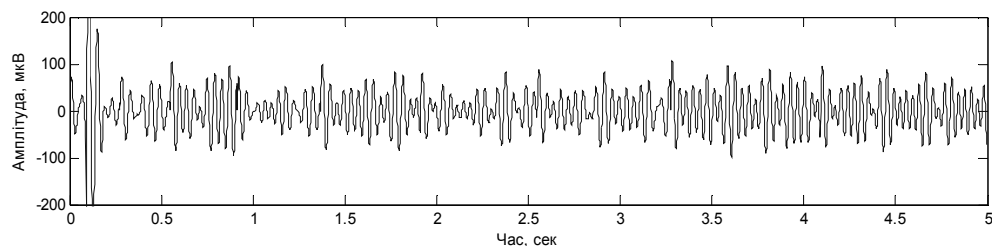


Рисунок 2 – Сигнали  $\alpha$ -ритму у стані збудження

Як видно з наведених на рис. 1, 2 сигналів  $\alpha$ -ритму в спокійному і збудженому стані суттєво різняться. Але за ними можна лише проводити оцінку в якісному вигляді. Тому пропонується для оцінки емоційного стану в якості інформативного параметру використовувати спектральну щільність сигналів біоритмів головного мозку. Співвідношення спектральних щільностей потужностей фонового та збудженого станів дозволить оцінити стійкість(зміну) психологічного стану, здібність мобілізувати та зберігати фізіологічний потенціал. На рис. 3 та рис.4 представлені отримані результати спектральної потужності  $\alpha$ -ритму біосигналу у стані спокою та збудженому в межах одного дня для 20 циклів.

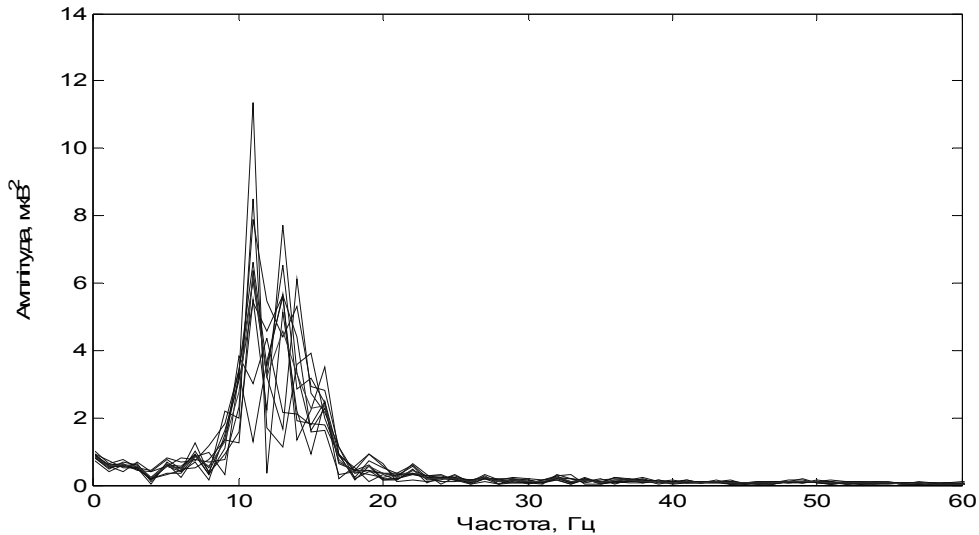


Рисунок 3 – Результати аналізу спектральної потужності  $\alpha$ -ритму біосигналу у стані спокою

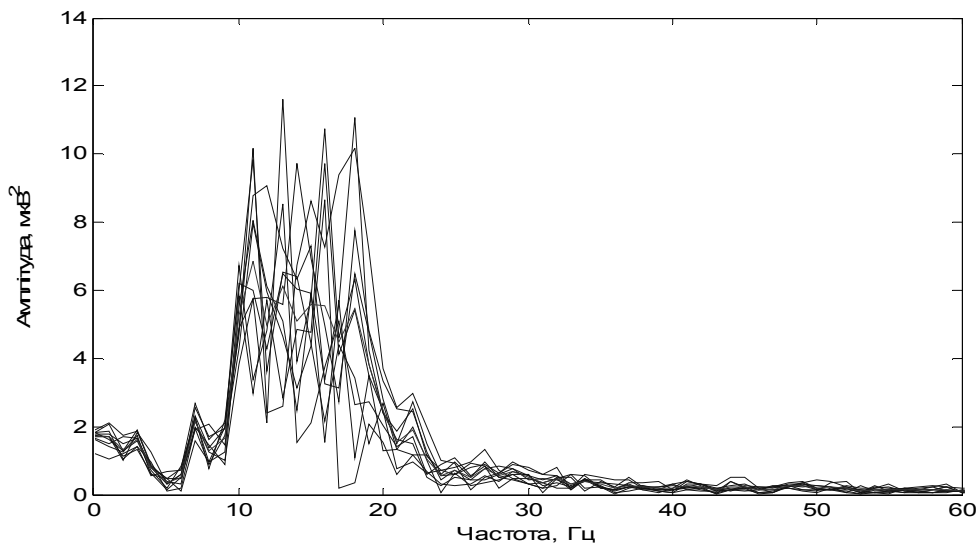


Рисунок 4 – Результати аналізу спектральної потужності  $\alpha$ -ритму біосигналу у стані збудження

Як видно з графіків, наведених на рис 3, 4 цей показник дозволяє, наприклад, за площею оцінити стан оператора.

Для оцінки психофізіологічного стану введено коефіцієнт енергетичної стійкості  $\theta$ , який визначається співвідношенням

$$\theta = \frac{S_{\phi}}{S_{зб}}, \text{ при цьому в ідеальному випадку } \theta \rightarrow 1, \quad (1)$$

Де  $S_{\Phi}$  - площа під огинаючою спектральної щільності сигналу біоритму знятого у фоновому (спокійному) режимі,  $S_{36}$  - площа під огинаючою спектральної щільності сигналу біоритму знятого у збудженому режимі (світлове подразнення). Дослідження розбиті на окремі цикли. Під циклом будемо розуміти результати отримані в обох послідовних режимах ( $S_{\Phi}$ ,  $S_{36}$ ).

Для проведення експериментальних досліджень в якості вихідної була взята модель багаторівневого дисперсійного аналізу. На першому (нижньому) рівні визначали розсіювання для кожного оператора на протязі одного дня, що обумовлено впливом власних біоритмів операторів. На другому рівні визначалося розсіювання результатів для одного оператора за  $N_2$  днів, яке обумовлено впливом добових біоритмів та зміною параметрів навколишнього середовища. На найвищому рівні визначалось розсіювання, обумовлене індивідуальними властивостями  $N_3$  операторів, які вже задіяні у даній професійній діяльності. Виходячи з цього можливо, отримавши середнє на кожному рівні, оцінити цей вплив. Для дослідження було проведено  $N_1$  циклів випробувань.

Вихідними даними дисперсійного аналізу є значення параметру, який характеризує енергетичну стійкість  $\theta$  психофізіологічного стану оператора.

На рис.5 наведено план проведення експериментальних досліджень з використанням дисперсійного аналізу для  $i$ -го ( $i = \overline{1, N_3}$ ) оператора.

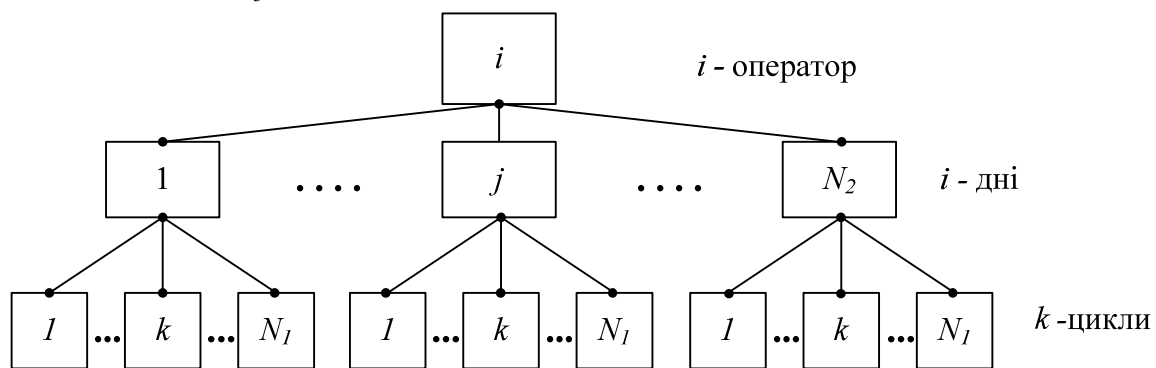


Рисунок 5 – Зображення плану проведення експериментальних досліджень ДА

Відповідно до плану в експериментальних дослідженнях приймали участь  $N_3$  операторів ( $i = \overline{1, N_3}$ ) попередньо віднесені до психотипу «суперсильної» категорії темпераменту. Для кожного оператора за допомогою медиків-фахівців на протязі кожного з  $j$ -днів ( $j = \overline{1, N_2}$ , де  $N_2$  - кількість днів) проводились  $k$  -циклів випробувань ( $k = \overline{1, N_1}$ , де  $N_1$  - кількість циклів). Результати, що отриманні за один цикл, використовуються для визначення площин спектральної щільності  $S_{\Phi}$  і  $S_{36}$ , які використовуються для розрахунку енергетичної стійкості  $\theta_{ijk}$ .

Розрахунки проводилися відповідно етапам проведення експерименту. Кожний етап було спрямовано на визначення впливу відповідної величини при оцінюванні професійної придатності.

1 етап. Визначення впливу зміну біоритмів оператора на протязі дня на величину  $\theta_{ijk}$ . Вихідним є масив значень  $\theta_{ijk}$ , отриманих на протязі дня за  $N_1$  цикл випробувань ( $k = \overline{1, N_1}$ ). За наявними даними можна оцінити варіацію значень  $\theta_{ijk}$  для  $i$ -го оператора, що були отримані на протязі  $j$ -го дня. Ця варіація обумовлена зміною емоціонально-психологічного стану під впливом діючих випадкових величин.

$$Var(\theta_{ijk}) = \frac{\sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{ijk} - \bar{\theta}_{ij})^2}{(N_1 - 1)}, \quad (2)$$

де  $\bar{\theta}_{ij} = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} \theta_{ijk}$  - середнє значення коефіцієнта енергетичної стійкості, отриманих на протязі  $j$ -того дня за  $N_1$  циклів випробувань.

2 етап. На цьому етапі виявляється розсіювання коефіцієнта енергетичної стійкості, обумовлене впливом кліматичних умов, електромагнітного поля Землі, інтенсивності сонячного випромінювання і т.п. Для цього експеримент проводився  $N_2$  дні, і кожного дня здійснюється  $N_1$  цикл випробувань.

$$Var(\bar{\theta}_{ij}) = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} (\bar{\theta}_{ij} - \bar{\theta}_i)^2}{(N_2 - 1)}, \quad (3)$$

де  $\bar{\theta}_i = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} \bar{\theta}_{ij}$  – середнє значення коефіцієнта енергетичної стійкості, обчислене для  $N_2$  днів експерименту ( $j = 1, N_2$ ).

3 етап спрямовано на встановлення розсіювання емоційно-психологічного стану операторів, віднесених до одного класу, але кожний з них має свої індивідуальні властивості. Так як до експерименту було залучено  $N_3$  операторів, то

$$Var(\bar{\theta}_i) = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} (\bar{\theta}_i - \bar{\theta})^2}{(N_3 - 1)}, \quad (4)$$

де  $\bar{\theta} = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} \bar{\theta}_i$  – середнє значення коефіцієнта енергетичної стійкості, обчисленого за даними, що були отримані під час всього експерименту (з усіма операторами).

Основною ознакою професійної придатності операторів даної категорії вибрана їх емоційна (енергетична стійкість), тобто на скільки змінюється їх психофізіологічний стан, а не просто рівень їх стану (потенційних можливостей), яке характеризується середнім. Тому необхідно оцінювати можливі зміни стану при психофізіологічних навантаженнях. Об’єктивною характеристикою цього може служити не знаходження середнього значення показника в деякому інтервалі із заданою ймовірністю, а розсіювання показника при переході з одного режиму роботи (навантаження) в інший. Так як дана категорія операторів у своїй сукупності характеризується деякою варіацією (дисперсією), то об’єктивно і статистично надійною оцінкою оператора при його функціональному відборі є встановлення із заданою ймовірністю факту, що СКВ його показника є свідомством того, що даний оператор професійно придатний.

За результатами експерименту, що проводиться з сукупністю операторів, які професійно виконують свої функції в цьому виді діяльності, можна оцінити дисперсію одиночного значення  $\theta_{ijk}$  коефіцієнта енергетичної стійкості по відношенню до центру розкидів його значень  $\theta$ .

$$\sigma_o^2(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{ijk} - \bar{\theta})^2}{(N_1 N_2 N_3 - 1)}, \quad (5)$$

При великій кількості результатів отриманих даних оцінка може бути прийнята за нормоване значення допустимої варіації коефіцієнта енергетичної стійкості для даної категорії операторів, з яким зіставляється оцінка варіації коефіцієнта оператора, професійна придатність якого оцінюється.

Для визначення чи впливає день проведення випробувань на достовірність прийняття рішення про професійну придатність, треба оцінити наскільки статистично суттєва дисперсія, яку вносить зміна характеристик оточуючого оператора середовища. Тобто на скільки критична оцінка професійної придатності від дня випробувань.

Для цього необхідно з загального розсіювання, яке обчислюється за виразом (5), виділити складові результатів моделюючого експерименту, обумовлені впливом випадкових факторів на зміни біоритмів, та характеристик оточуючого середовища (для проведення випробувань). Зробимо математичне перетворення чисельника виразу (5)

$$Q_o^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\theta_{ijk} - \bar{\theta})^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} \left[ (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}) + (\bar{\theta}_{ij} - \bar{\theta}_i) + (\theta_{ijk} - \bar{\theta}_{ij}) \right]^2, \quad (6)$$

Так як складові в правій частині (6) не корельовані, то можна записати

$$Q_o^2 = Q_{on}^2 + Q_{\partial n}^2 + Q_{\text{цк}}^2,$$

де  $Q_{on}^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\bar{\theta}_i - \bar{\theta})^2$  – розсіювання сукупності результатів, обумовлене можливими значеннями

коефіцієнту енергетичної стійкості операторів, які зайняті даним видом діяльності. Чисельне значення цієї величини залежить від кількості  $N_3$  і властивостей конкретних операторів, які були залучені до фізичного моделюючого експерименту.

Особливою вимогою є те, що оператори вже мають досвід у визначених екстремальних умовах і процес вибору їх є випадковим;

$$Q_{\partial n}^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\bar{\theta}_{ij} - \bar{\theta}_i)^2 = N_1 \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} (\bar{\theta}_{ij} - \bar{\theta}_i)^2 \quad (7)$$

- розсіювання сукупності результатів отриманих при проведенні досліджень, обумовлені впливом випадкових величин і можливим впливом для проведення випробувань (змінюю оточуючих оператора умов);

$$Q_{\text{цк}}^2 = \sum_{i=1}^{N_3} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_1} (\bar{\theta}_{ijk} - \bar{\theta}_{ij})^2 \quad (8)$$

- розсіювання сукупності експериментальних результатів, обумовлене впливом тільки випадкових величин (коливанням біоритмів на протязі дня). Поділив  $Q_{\partial n}^2$  та  $Q_{\text{цк}}^2$  на число степенів свободи  $\nu_{\partial n} = N_3 N_1 (N_2 - 1)$ ;  $\nu_{\text{цк}} = N_3 N_2 (N_1 - 1)$ , отримаємо дисперсію коефіцієнтів енергетичної стійкості, обумовлену впливом випадкових величин і можливим впливом зміни навколишніх умов, в яких повсякденно працює оператор

$$\widetilde{\sigma}_{\partial n}^2(\theta) = \frac{Q_{\partial n}^2}{\nu_{\partial n}}.$$

Дисперсія, причиною якої є випадкові величини, що впливають на оператора, буде

$$\widetilde{\sigma}_{\text{цк}}^2(\theta) = \frac{Q_{\text{цк}}^2}{\nu_{\text{цк}}}.$$

Для визначеності суттєвості впливу навколишніх умов на коефіцієнт енергетичної стійкості, скористаємося критерієм Фішера. Обчислимо значення коефіцієнта та  $F_p = \frac{\widetilde{\sigma}_{\partial n}^2(\theta)}{\widetilde{\sigma}_{\text{цк}}^2(\theta)}$  і порівняємо його з табличним значенням  $F_T$  для імовірності  $P=0,95$  і числа степенів свободи  $\nu_{\partial n}$  та  $\nu_{\text{цк}}$ .

Якщо  $F_p \leq F_T$ , то з імовірністю 95% можна стверджувати, що проведення профорієнтації можна здійснювати за один будь який день. Коли ж ця нерівність не виконується, то треба проводити випробування декілька днів за приведеною схемою. Для статистичної надійності результатів число днів повинно бути не менше 3, тобто  $N_2 \geq 3$  [3]. Знайдене за  $N_2$  днів значення дисперсії коефіцієнта енергетичної стійкості конкретного претендента на оператора даної професійної орієнтації статистично оцінюється до

норми  $\widetilde{\sigma}_{\text{он}}^2$ , значення якої було знайдено при очікуючому експерименті, що здійснювався за схемою, наведеною на рис.1.

Таким чином, за результатом спільного фізичного моделюючого експерименту отримано норму професійної придатності за стійкістю до емоціональних стресових екстремальних ситуацій  $\widetilde{\sigma}_o^2$ , яке характеризує відтворюваність характеристик властивостей операторів даної категорії та дві проміжні форми розсіювання коефіцієнта енергетичної стійкості, а саме попереднього оцінювання  $\widetilde{\sigma}_{\text{цк}}^2(\theta)$ , що дозволяє перевірити експертну оцінку придатності оператора до роботи в екстремальних умовах, та проміжне оцінювання з використанням дисперсії  $\widetilde{\sigma}_{\text{он}}^2(\theta)$ .

Для співставлення з цими нормами використовуємо критерій статистичної значущості хі-квадрат. З теорії математичної статистики відомо[4,5], що сума квадратів нормально розподілених випадкових величин з математичним сподіванням, що дорівнює нулю ( $MX=0$ ), та одиночною дисперсією, що дорівнює одиниці ( $\sigma^2=1$ ), має розподіл Пірсона  $\chi^2$ . Будемо допускати, що  $\sigma_i^2(\theta)$ ,  $\widetilde{\sigma}_{\text{он}}^2(\theta)$  та  $\widetilde{\sigma}_{\text{оє}}^2(\theta)$  асимптотично наближені до значення дисперсії для генеральної сукупності екстремальних операторів даної категорії, а оцінки дисперсій, що розраховані при проведенні випробувань професійного відбору конкретного оператора, є вибірковими з генеральної сукупності. Прийmemo до уваги, що випадкова величина

$$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sigma^2(x)} = \chi^2 \text{ має розподіл хі-квадрат з } \nu = (n-1) \text{ степенями свободи,}$$

де  $x_i$  – експериментальні дані, а  $\bar{x}$  їх середнє значення.

Тоді, виходячи з того що оцінка дисперсії вибірки випадкової величини є

$$S^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)},$$

можна записати, що

$$\frac{S^2(x) \cdot \nu}{\sigma^2(x)} = \chi^2(\nu) \tag{9}$$

За виразом (9) пропонується триступенева процедура професійного відбору операторів екстремальної діяльності, де на кожному ступені використовується відповідне значення  $\widetilde{\sigma}_{\text{цк}}^2(\theta)$ ,  $\widetilde{\sigma}_{\text{он}}^2(\theta)$  та  $\sigma_i^2(\theta)$ . Це дозволяє суттєво підвищити достовірність безпомилкового професійного відбору шляхом застосування статистичних критеріїв значущості. При цьому, при відборі використовується не будь-який середній показник і навіть не довірчий інтервал для нього, а саме розсіювання коефіцієнта енергетичної стійкості, яке і характеризує енергетичну стійкість екстремальних навантажень.

#### Висновки

В основу оцінювання придатності оператора до роботи в екстремальних умовах використовуються статистичні критерії оцінювання розсіювання його енергетичної стійкості по відношенню до нормованих значень, отриманих за результатами фізичного моделюючого експерименту. Це дозволяє на трьох послідовних рівнях оцінювати придатність оператора і тим самим підвищити методичну достовірність вірного відбору та зменшити об'єм випробувань.

#### Список літератури

1. Koronovskii A.A., Kuznetsova G.D., Midzyanovskaya I.S., Sitnikova E.Yu., Trubetskov D.I., Hramov A. E. Regularities of alternate behavior in spontaneous nonconvulsive seizure activity in rats // Doklady Biological Sciences. 2006. Vol. 409. P. 275.
2. Stam N.J. Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: Review of emerging field // Clinical Neurophysiology. 2005. Vol. 116. P. 2266.

3. Сахаров В.Л., Андреев А.С. / Методы математической обработки электроэнцефалограмм: Учебное пособие. – Таганрог: «Антон», 2000.-44 с.

4. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистике для технических приложений.- М.:Наука, 1969.-512с.

5. Володарський Є.Т., Кошева Л.О. Статична обробка даних: Навчальний посібник.-К.:НАУ, 2008.-308 с.

#### **Відомості про авторів**

**Володарський Євген Тимофійович**, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”.

**Булигіна Олена Вячеславівна**, асистент кафедри біомедичні і технічні апарати і системи інституту аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету.

УДК 62-50+681.3(06)+51.7+519.6

Т. М.ДИВАК

Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль

## ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ІНТЕРВАЛЬНОГО РІЗНИЦЕВОГО ОПЕРАТОРА НА ПРИКЛАДІ МАКРОМОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ВОЛОГОСТІ У ЛИСТІ ГІПСОКАРТОНУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО СУШІННЯ

**Анотація.** Розглянуто в загальному вигляді задачу параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді різницевого оператора на основі аналізу інтервальних даних. Запропоновано для її розв'язування поєднати метод випадкового пошуку із застосуванням направляючого конуса та метод поділу вибірки інтервальних даних на основну та перевірочну частини. Наведено приклад параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді інтервального різницевого оператора для прогнозування розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння.

**Ключові слова:** параметрична ідентифікація, макромодель, інтервальний різницевий оператор.

**Анотация.** Рассмотрено в общем виде задачу параметрической идентификации макромодели в виде разностного оператора с использованием интервальных данных. Для решения этой задачи предложено комплексное применение двух методов: случайного поиска с применением направляющего конуса; метод деления выборки интервальных данных на основную и проверочную. Приведен пример параметрической идентификации макромодели в виде интервального разностного оператора для прогнозирования распределения влаги в листе гипсокартона в процессе его сушки.

**Ключевые слова:** параметрическая идентификация, макромодель, интервальный разностный оператор.

**The Abstract.** The task of parametric identification of macromodel in form of a difference operator with interval data are considered. To solve this task, are developed application which based on two methods: directing cone random search method; method of dividing interval data with primary and verification parts. Example of parametric identification task in the form of interval difference operator to predict the distribution of humidity in the sheet of drywall in the process of drying are provided.

**Keywords:** parametric identification, macromodel, interval difference operator

### Вступ

Задача забезпечення якості продукції та управління процесами при виробництві гіпсокартону, де основним процесом є контроль розподілу вологості на завершальній стадії його виготовлення, вимагає побудови математичної моделі розподілу вологості у листі гіпсокартону, залежно від чинників технологічного процесу [1]. Створення математичної моделі суттєвим чином знижує витрати на дослідження технологічного процесу і забезпечує зниження відсотка бракованої продукції.

### Актуальність

Переважно для побудови математичних моделей розподілу вологості у деякому середовищі використовують диференціальні рівняння в частинних похідних із необхідністю детального опису середовища, у якому відбуваються процеси дифузії. Для отримання розв'язку таких рівнянь застосовують чисельні методи, попередньо апроксимували диференціальні рівняння різницевиими схемами, наприклад, за схемою Кранка-Ніколсона [2]. Проте детермінований підхід не придатний у зазначеному випадку, оскільки передбачає суттєве ускладнення моделі при потребі адекватно відобразити процеси дифузії в неоднорідному середовищі та за умов неоднорідного температурного поля в сушильній камері. Концентруючи увагу на фізичних властивостях середовища, його неоднорідності, досліднику доводиться суттєво ускладнювати математичну модель, незважаючи на те що на практиці співставити результати моделювання із реальними даними, отриманими за умов, що відповідають умовам моделювання є достатньо складно. У першу чергу це пов'язано зі складністю вимірювального експерименту та великими витратами на його проведення для значної кількості продукції.

За цих умов доцільно будувати математичну макромодель на основі невеликої вибірки результатів експерименту, яка б відображала залежність розподілу вологості у листі гіпсокартону від технологічних чинників на стадії його сушіння. Зважаючи на фізичні властивості процесу, макромодель доцільно будувати у вигляді дискретного аналога деякого диференціального рівняння в частинних похідних – різницевої схеми (різницевого оператора) на основі аналізу результатів експерименту [2]. Щодо точності макромоделі, то вона повинна визначатися точністю вимірювання вологості та бути в межах допустимого рівня, який забезпечує прийнятну якість продукції. Таким чином результати експерименту із урахуванням умов допустимих меж вологості у листі гіпсокартону можуть бути представлені в інтервальному вигляді, а для побудови макромоделі у вигляді різницевого оператора доцільно використати методи аналізу інтервальних даних [3].

### Мета

Зважаючи на вище зазначене, метою праці є розробка методу параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді різницевого оператора на основі аналізу інтервальних даних і застосування зазначеного методу для побудови макромоделі для прогнозування розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння.

**Постановка задачі параметричної ідентифікації в загальному вигляді.**

Розглядаємо задачу параметричної ідентифікації лінійного різницевого оператора у такому загальному вигляді [4]:

$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T (v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \vec{g}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K, \quad (1)$$

де  $\vec{f}^T(\bullet)$  - вектор відомих базисних функцій, з допомогою яких виконують перетворення значень модельованої характеристики об'єкта, а також вхідних змінних у дискретних точках простору та для певних часових дискрет;  $v_{i,j,h,k}$  - модельована характеристика (відносна вологість) у точці з дискретно заданими просторовими координатами  $i = 1, \dots, I$ ,  $j = 1, \dots, J$ ,  $h = 1, \dots, H$  та на часовій дискреті  $k = 1, \dots, K$ ;  $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$  - вектори вхідних змінних (управлінь) у точках з дискретно заданими просторовими координатами  $i = 1, \dots, I$ ,  $j = 1, \dots, J$ ,  $h = 1, \dots, H$  та на часовій дискреті  $k = 0, \dots, K$ ;  $\vec{g}$  - вектор параметрів різницевого оператора.

У подальшому, будемо приймати структуру різницевого оператора відомою, або знайденою виходячи із фізичних міркувань чи за допомогою методів самоорганізації [5].

Для реалізації різницевої схеми необхідно задати початкові умови, тобто значення кожного елемента із набору  $v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$  для певних дискрет при відомих значеннях компонент вектора  $\vec{g}$  параметрів. Отже актуальною є задача налаштування параметрів різницевого оператора (1) у такий спосіб, щоб забезпечити максимальне узгодження модельованої характеристики об'єкта з експериментально отриманими значеннями цієї характеристики. Така задача називається задачею параметричної ідентифікації [6].

Важливою проблемою є забезпечення певної точності макромоделі. Будемо її задавати в межах точності вимірювання вологості приладами та в межах допустимого рівня, який забезпечує прийнятну якість продукції. Зважаючи на зазначені умови, результати експерименту доцільно представляти у вигляді інтервалів можливих значень характеристики, що моделюється:

$$[z_{i,j,h,k}^-, z_{i,j,h,k}^+], \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K, \quad (2)$$

де  $z_{i,j,h,k}^-, z_{i,j,h,k}^+$  - відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень вимірної вологості у точці з дискретно заданими просторовими координатами  $i = 1, \dots, I$ ,  $j = 1, \dots, J$ ,  $h = 1, \dots, H$  та часовою дискретою  $k = 1, \dots, K$ .

Тоді вектор оцінок  $\hat{\vec{g}}$  параметрів  $\vec{g}$  у різницевому операторі (1) можемо отримати на основі аналізу інтервальних даних [4]. Підставляючи вектор оцінок параметрів  $\hat{\vec{g}}$  різницевого оператора замість вектора їх істинних значень  $\vec{g}$  у вираз (2) разом із заданими початковими інтервальними значеннями кожного елемента із набору  $[\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}], [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}]$  та заданими векторами вхідних змінних  $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$  отримуємо інтервальну оцінку модельованої характеристики  $[\hat{v}_{i,j,h,k}]$ :

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] = [\hat{v}_{i,j,h,k}^-, \hat{v}_{i,j,h,k}^+] = \vec{f}^T ([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}], [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \hat{\vec{g}}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K, \quad (3)$$

Отже математичну модель розподілу вологості в межах допустимого рівня, який забезпечує прийнятну якість продукції в задачі управління процесами при виробництві гіпсокартону описуватимемо різницевим оператором у загальному вигляді (3). Враховуючи, що усі обчислення у виразі (3) проводять із використанням інтервальної арифметики, різницевий оператор (3) будемо називати інтервальним різницевим оператором (ІРО) [7].

Сформулюємо математично задачу параметричної ідентифікації ІРО на основі аналізу інтервальних даних. Спираючись на вимоги забезпечення точності математичної моделі в межах точності вимірювального експерименту та в межах допустимого рівня, який забезпечує прийнятну якість продукції в задачі управління процесами при виробництві гіпсокартону, умови узгодження експериментальних даних, представлених в інтервальному вигляді (2), із даними отриманими на основі математичної моделі у вигляді різницевого оператора (3) сформулюємо у такому вигляді:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}^-, \hat{v}_{i,j,h,k}^+] \subset [z_{i,j,h,k}^-, z_{i,j,h,k}^+], \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad \forall j = 1, \dots, J, \quad \forall h = 1, \dots, H, \quad \forall k = 1, \dots, K. \quad (4)$$

Підставимо у вирази (4) замість інтервальних оцінок  $[\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+]$  модельованої характеристики її інтервальні значення, обчислені на основі ІРО (3) разом із урахуванням заданих початкових інтервальних значень кожного елементу із набору

$$[\hat{v}_{0,0,0,0}] \subseteq [z_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}] \subseteq [z_{0,0,h-1,0}],$$

$$[\hat{v}_{i-1,0,0,0}] \subseteq [z_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}] \subseteq [z_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}] \subseteq [z_{i-1,j-1,h-1,k-1}] \quad (5)$$

та заданими векторами вхідних змінних  $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$ , у загальному вигляді отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{v}_{0,0,0,0}^-; \hat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, [\hat{v}_{i-2,j-2,h-2,k-2}^-; \hat{v}_{i-2,j-2,h-2,k-2}^+] \subseteq [z_{i-2,j-2,h-2,k-2}^-; z_{i-2,j-2,h-2,k-2}^+] \\ [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}] = \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}], [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-2,j-2,h-2,k-2}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{k-1}) \cdot \hat{g} \\ \hat{z}_{i,j,h,k}^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}], [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \hat{g} \leq \hat{z}_{i,j,h,k}^+, \\ i = 2, \dots, I, j = 2, \dots, J, h = 2, \dots, H, k = 2, \dots, K \end{array} \right. \quad (6)$$

Як відомо, отримана система є інтервальною системою нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР) [8]. Отже задача ідентифікації параметрів ІРО (3) за умов (4) є задачею знаходження хоча б одного розв’язку ІСНАР у вигляді (6). Зауважимо, що розв’язки цієї системи належать не опуклій області  $\Omega$ , що суттєвим чином ускладнює розв’язування задачі параметричної ідентифікації.

### Метод розв’язування задачі

На сьогодні, для розв’язування задачі параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді ІРО найбільш обґрунтованим є метод випадкового пошуку хоча б одного розв’язку ІСНАР. При цьому метод пошуку цього розв’язку формулюють у вигляді задачі мінімізації функції мети [9]

$$\delta(\hat{g}) \xrightarrow{\hat{g}} \min, \quad (7)$$

де значення функції мети  $\delta(\hat{g})$  на  $l$ -тому кроці процедури випадкового пошуку визначають «якість» знайденої оцінки параметрів різницевого оператора  $\hat{g}_l$ .

У працях [9] запропоновано якість оцінки параметрів різницевого оператора визначати кількісно у вигляді різниці центрів найбільш віддалених між собою прогнозного та експериментального інтервалів – у випадку, коли вони не перетинаються та найменшою шириною перетину серед прогнозних та експериментальних інтервалів – для випадку їх перетину. Формально ці умови запишемо у такому вигляді:

$$\delta(\hat{g}_l) = \max_{i=1, \dots, I, j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, k=1, \dots, K} \left\{ \text{mid}([\hat{v}_{i,j,h,k}]) - \text{mid}([z_{i,j,h,k}]) \right\}$$

якщо  $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] = \emptyset \quad \exists i = 1, \dots, I, \exists j = 1, \dots, J, \exists h = 1, \dots, H, \exists k = 1, \dots, K \quad (8)$

$$\delta(\hat{g}_l) = \max_{i=1, \dots, I, j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, k=1, \dots, K} \left\{ \text{wid}([\hat{v}_{i,j,h,k}]) - \text{wid}([\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}]) \right\}$$

якщо  $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] \neq \emptyset \quad \forall i = 1, \dots, I, \forall j = 1, \dots, J, \forall h = 1, \dots, H, \forall k = 1, \dots, K \quad (9)$

де  $\text{mid}(\bullet)$ , та  $\text{wid}(\bullet)$ , - операції визначення центру та ширини інтервалу, відповідно.

Слід зауважити, що формула (9) визначає якість поточного наближення у випадку достатньо грубої оцінки вектора параметрів, коли існують дискрети, у яких прогнозований інтервал не перетинається із експериментальним [10].

В основі зазначеної обчислювальної схеми реалізації методу параметричної ідентифікації ІРО покладено процедури випадкового пошуку із використанням направляючого конуса [11].

На початковій ітерації випадкового пошуку ( $l=0$ ) задаємо початкове наближення вектора параметрів ІРО  $\hat{g}_0$ . В околі цього наближення на поверхні уявної гіперсфери, радіусом  $r$ , тобто на відстані  $r$  від точки  $\hat{g}_0$  в просторі параметрів на основі рівномірного закону розподілу генеруємо  $p$  випадкових точок:

$$\hat{g}_p = \hat{g}_0 + r \cdot \vec{\xi}_p, \quad p = 1, \dots, P \quad (10)$$

Серед згенерованих точок вибираємо точку, яка забезпечує найменше значення функції мети:

$$\hat{g}_1 = \arg \min_{p=1, \dots, P} (\delta(\hat{g}_0 + r \cdot \vec{\xi}_p)). \quad (11)$$

Отримана оцінка вектора параметрів IPO є наближенням для наступної ітерації. Додатково у цій процедурі обчислюємо вектор пам'яті, який визначає успішний напрям пошуку:

$$\vec{w} = (\hat{g}_1 - \hat{g}_0) / r. \quad (12)$$

На наступних ітераціях в просторі параметрів будемо уявний гіперконус із вершиною  $\hat{g}_l$ , яка є поточною оцінкою вектора параметрів IPO, з кутом розкриття  $\psi$  і віссю  $\vec{w}_l$ . Цей гіперконус «відсікає» від гіперсфери з центром у точці  $\hat{g}_l$  і радіусом  $r$  деяку поверхню. На отриманій поверхні в просторі параметрів генеруємо на основі рівномірного закону розподілу  $p$  випадкових точок за формулою (10), де вектор  $\vec{\xi}_p$  в даному випадку обчислюємо виходячи із обмежень на параметри конуса. Серед згенерованих точок вибираємо точку, яка забезпечує найменше значення функції мети:

$$\hat{g}_{l+1} = \arg \min_{p=1, \dots, P} (\delta(\hat{g}_l + r \cdot \vec{\xi}_p)). \quad (13)$$

Отримана оцінка вектора параметрів IPO є наближенням для наступної  $l+1$  ітерації пошукової процедури. Додатково у цій процедурі перевизначаємо вектор пам'яті:

$$\vec{w}_{l+1} = \alpha \cdot \vec{w}_l + \beta \cdot \frac{\hat{g}_{l+1} - \hat{g}_l}{r}, \quad (14)$$

де  $\alpha$  - ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) – коефіцієнт забування, а  $\beta$  – коефіцієнт інтенсивності врахування нової інформації. Пошук продовжується до тих пір, поки зменшується значення функції мети. Якщо ж значення функції мети не зменшується на певній ітерації, то замість конуса використовуємо гіперсферу, як на початковій ітерації для заданого вектора оцінок параметрів. Якщо ж і далі серед згенерованих точок не можливо знайти точку, яка забезпечує зменшення функції мети, то у цьому випадку налаштуємо довжину кроку  $r$ , як правило зменшуємо її.

Додатково, до розглянутого методу, з метою підвищення його збіжності та зменшення обчислювальної складності було запропоновано увести процедуру поділу усього набору інтервальних даних на основну та додаткову частини у співвідношенні 60% на 40% [12].

Застосування процедури випадкового пошуку для розв'язування задачі параметричної ідентифікації IPO у вигляді задачі мінімізації функції мети (7)

забезпечує знаходження послідовності  $\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_l, \dots$  оцінок параметрів і відповідної послідовності значень функції мети  $\delta(\hat{g}_1), \delta(\hat{g}_2), \dots, \delta(\hat{g}_l)$ . При цьому процедуру випадкового пошуку необхідно організувати у такий спосіб, щоб забезпечити умови зменшення значень функції мети  $\delta(\hat{g}_1) > \delta(\hat{g}_2) > \dots > \delta(\hat{g}_l) > \dots > \delta(\hat{g}_{l=L} = \hat{g} \in \Omega)$  за скінчену та якомога меншу кількість ітерацій  $l=L$ . Зауважимо, що розв'язком задачі оптимізації (7) є вектор оцінок  $\hat{g} \in \Omega$  параметрів лінійного IPO (3).

#### **Приклад ідентифікації макромоделі у вигляді інтервального різницевого оператора для прогнозування розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння.**

Проведемо ідентифікацію математичної моделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння. Розглядаємо процес виробництва листів гіпсокартону стандартних розмірів: товщина 9,5мм, довжина 2500мм та ширина 1200мм [1].

Вибір структури різницевого оператора проведемо виходячи із фізичних міркувань. Аналіз технологічної схеми виробництва гіпсокартону показав, що основними технологічними управляючими чинниками на цій стадії є температура у сушильній камері та швидкість подачі листа [1]. При формуванні структури різницевого оператора врахуємо, що для контролю якості готової продукції, оцінку вологості оцінюють на поверхні листа гіпсокартону. Також вважаємо, що поле розподілу вологості є стаціонарним. Спостерігається деякий плавний характер зміни вологості внаслідок певних

дифузійних властивостей середовища. Зважаючи на цей факт доцільно розглядати різницевий оператор не вище другого порядку. Вище наведені міркування, представимо структуру різницевого оператора, який описуватиме стаціонарне поле розподілу вологості у листі гіпсокартону, у такому вигляді:

$$v_{i,j,k} = g_1 + g_2 \cdot v_{i-1,j,k} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) + g_3 \cdot v_{i,j-1,k} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) + g_4 \cdot v_{i-1,j-1,k} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) + g_5 \cdot v_{i,j-2,k} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) + g_6 \cdot v_{i-1,j-2,k} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) + g_7 \cdot v_{i,j-1,k} \cdot v_{i-1,j-2,k}, \quad (15)$$

де  $\vec{g} = (g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7)^T$  – вектор параметрів різницевого оператора;  $v_{i,j,k}$  – відносна вологість в, точці з дискретними координатами на поверхні  $k$ -го листа гіпсокартону;  $u_{1,0}, u_{1,k}$  – температури у сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення, відповідно;  $u_{2,0}, u_{2,k}$  – швидкості переміщення листа у сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення, відповідно.

Результати вимірювань вологості при різних режимах технологічного процесу, наведено у таблиці. Відносна похибка вимірювань у даному випадку складала  $\varepsilon=5\%$ . Допустимі межі відносної вологості на поверхні листів гіпсокартону, для забезпечення виробництва якісної продукції повинні бути в межах від 0,6% до 0,9%. В протилежному випадку продукція відбраковується. Діапазон розкиду відносно середнього значення 0,75% складає:  $\pm 20\%$ . Як бачимо, діапазон розкиду є набагато більший по відношенню до точності вимірювань.

У таблицях 1,2 використано такі позначення:  $i$ -дискретне значення координати  $x$  з кроком  $\Delta x=300$  мм (перша дискрета на відстані 200мм від краю листа);  $j$ -дискретне значення координати  $y$  із кроком  $\Delta y=300$  мм, початкові точки зазначено на відстані 150 мм від краю листа.

Користуючись даними таблиці 1 та таблиці 2, а також відомими значеннями похибок вимірювань  $\varepsilon=5\%$ , інтервальні дані  $[z_{i,j,k}^-, z_{i,j,k}^+]$ ,  $i = 0, \dots, 3$ ,  $j = 0, \dots, 7$ ,  $k = 0, 1$ , отримаємо із виразів  $z_{i,j,k}^- = z_{i,j,k} - z_{i,j,k} \cdot \varepsilon$  та  $z_{i,j,k}^+ = z_{i,j,k} + z_{i,j,k} \cdot \varepsilon$ .

Таблиця 1- Виміряні значення вологості  $z_{i,j,k}$  на листі гіпсокартону для заданих технологічних чинників:  $u_{1,0} = 120C^\circ$ ,  $u_{2,0} = 0.25$  м/хв.

$i \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0,60	0,63	0,66	0,66	0,68	0,65	0,62	0,61
1	0,68	0,74	0,78	0,82	0,85	0,83	0,79	0,71
2	0,72	0,78	0,82	0,85	0,86	0,82	0,78	0,73
3	0,62	0,63	0,68	0,70	0,71	0,67	0,66	0,65

Таблиця 2- Виміряні значення вологості  $z_{i,j,k}$  на листі гіпсокартону для заданих технологічних чинників:  $u_{1,k=1} = 125C^\circ$ ,  $u_{2,k=1} = 0.28$  м/хв.

$i \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0,71	0,75	0,76	0,79	0,79	0,75	0,73	0,69
1	0,76	0,80	0,87	0,91	0,96	0,94	0,89	0,82
2	0,78	0,89	0,93	0,97	0,98	0,96	0,88	0,82
3	0,73	0,75	0,78	0,79	0,8	0,77	0,76	0,71

Тепер маючи загальний вигляд різницевого оператора (15) сформулюємо оптимізаційну задачу у вигляді (7). При цьому за початкові умови покладемо інтервальні оцінки вимірної вологості на листі гіпсокартону при заданій температурі  $u_{1,0}$  у сушильній камері для тестового набору даних та для заданої швидкості  $u_{2,0}$  - переміщення листа у сушильній камері для того ж тестового набору (в межах  $\pm 1\%$  від значень, наведених у першій стрічці та двох стовпцях таблиці 1).

В результаті розв'язування цієї задачі методом параметричної ідентифікації IPO із використанням процедури випадкового пошуку на основі направляючого конуса та застосуванням процедури поділу усього набору інтервальних даних на основну та додаткову частини у співвідношенні 60% на 40 % отримано IPO у такому вигляді [12]:

$$\begin{aligned} [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] &= \widehat{g}_1 + (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \widehat{g}_2 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] + \\ &\widehat{g}_3 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] + \widehat{g}_4 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] + \\ &\widehat{g}_5 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] + \widehat{g}_6 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + \\ &\widehat{g}_7 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \quad i=1, \dots, 3, j=2, \dots, 7 \end{aligned} \quad (16)$$

де  $(u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j,k=0}^-; \widehat{v}_{i,j,k=0}^+] \subset [z_{i,j,k=0}^-; z_{i,j,k=0}^+] =$

$[z_{i,j,k=0}^- - z_{i,j,k=0}^- \cdot 0,01; z_{i,j,k=0}^- + z_{i,j,k=0}^- \cdot 0,01]$ ,  $\{i=0, j=0, \dots, 7\} \cup \{i=0, \dots, 3, j=0, \dots, 1\}$  – задані початкові умови;  $\widehat{g}_1 = 0.350$ ;  $\widehat{g}_2 = 0.079$ ;  $\widehat{g}_3 = 1.082$ ;  $\widehat{g}_4 = 0.189$ ;  $\widehat{g}_5 = -0.447$ ;  $\widehat{g}_6 = -0.496$ ;  $\widehat{g}_7 = 0.156$ ;  $\widehat{g}_8 = 0.037$ ;  $\widehat{g}_9 = -0.385$  – отримані оцінки значень параметрів IPO.

На рисунку 1 графічно представлено розподіл вологості на листі гіпсокартону для оптимальних технологічних чинників: температура у сушильній камері ( $u_1 = 123^\circ\text{C}$ ) та швидкості переміщення листа у цій камері ( $u_2 = 0.26$  м/хв), який отримано на основі різницевого оператора (16).

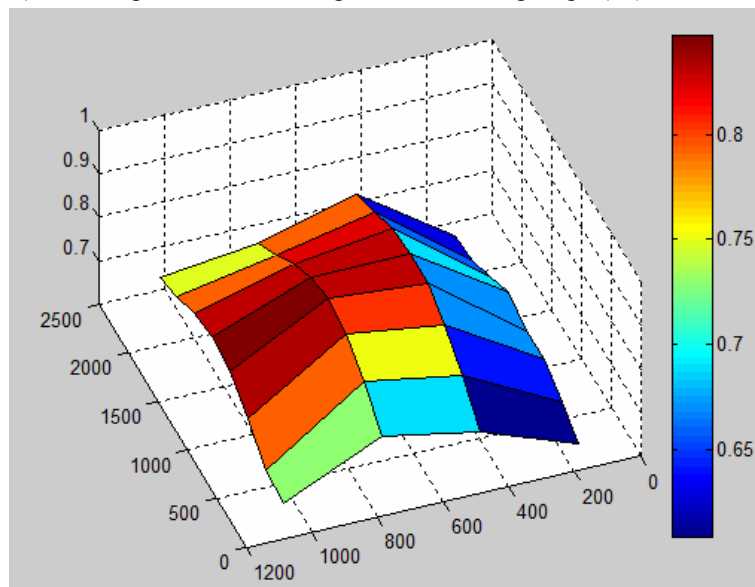


Рисунок 1 – Розподіл вологості для оптимальних чинників технологічного процесу

Як бачимо із рис. 1, розподіл вологості для заданих технологічних чинників є в межах від 0,6% до 0,9%. Також спостерігається підвищення вологості в центрі листа, що повністю відповідає фізичним властивостям процесу і підтверджує адекватність побудованої макромоделі.

### Висновки

1. Встановлено, що задача параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді різницевого оператора на основі аналізу інтервальних даних математично є задачею знаходження розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь.

2. Для знаходження розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь запропоновано поєднати метод випадкового пошуку із застосуванням направляючого конуса та метод поділу вибірки інтервальних даних на основну та перевірочну частини.

3. Результати поєднаного застосування двох методів підтверджено на прикладі параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді інтервального різницевого оператора для прогнозування розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння.

### Література

1. <http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/>
2. Кодингтон Э.А. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений / Э.А. Кодингтон, Н. Левинсон // Пер. с англ., Изд. 2. – 2007.- 472с.
3. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними / М.П. Дивак - Тернопіль: - Економічна думка, 2011.-216 с.
4. Войтюк І. Ф. Застосування інтервального різницевого оператора для апроксимації полів концентрацій шкідливих викидів автотранспорту / І. Ф. Войтюк, Т. М. Дивак, М. П. Дивак, А. В. Пукас // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 1 (37). – С. 44–52.
5. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А.Г. Ивахненко - Киев: - Наукова думка, 1981.- 296 с.
6. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей: Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина // Л. Льюнг – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
7. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер – М. : – Мир, 1987. – 360 с.
8. Дивак М.П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора / М.П. Дивак, Т.М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В.С.Степашко - Київ: МННЦ ІТС, 2009. - Вип.1– 236с. – С.35-43.
9. Дивак М.П. Оптимальна процедура налаштування параметрів методу ідентифікації інтервальної дискретної моделі динамічної системи / М.П. Дивак, Є.О. Марценюк, І.Ф. Войтюк // Відбір та обробка інформації.- 2008. – Вип 27 (103) - С.17-23.
10. Дивак М.П. Дослідження цільової функції в задачах параметричної ідентифікації інтервального різницевого оператора із заданою точністю/ М.П. Дивак, Т.М. Дивак, П.Г. Стахів // Міжнародний науковий журнал "Комп'ютинг". – 2011. – Том 10. – Вип. 2. – С. 162-171р.
11. Растрингін Л.А. Адаптація складних систем / Л.А. Растрингін - Рига: Зинатне, 1981,- 359 с.
12. Дивак Т.М. Метод параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді інтервального різницевого оператора із розділенням вибірки даних / Т.М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В.С.Степашко - Київ: МННЦ ІТС, 2011. -Вип.3– 246с. – С.49-60.

### Відомості про авторів

**Дивак Тарас Миколайович** – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Тернопільського національного економічного університету, Юності 9, м. Тернопіль, 46 000, taras.dyvak@gmail.com.

УДК 519.6

О. А. ДМИТРИЕВА, Я. А. КУПРИЙ

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

**ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОРЯДКА МЕТОДОВ РУНГЕ-КУТТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПОМЕЧЕННЫХ ДЕРЕВЬЕВ**

**Анотація.** Теорія диференціальних рівнянь відіграє істотну роль в процесі вивчення особливостей багатьох явищ та процесів. Створення ефективних алгоритмів розв'язання диференціальних рівнянь є важливим питанням теорії динамічного моделювання та прикладного програмування. Використання методів високого порядку для розв'язання диференціальних рівнянь є одним з методів підвищення точності та стійкості розв'язку.

У статті запропонований простий алгоритм, що дозволяє автоматизувати генерацію умов для визначення метода Рунге-Кутти довільного порядку. Алгоритм базується на використанні «помічених дерев» та ефективний для конструювання методів високого порядку.

**Ключові слова:** звичайне диференціальне рівняння, метод Рунге-Кутта, генерація методів, помічені дерева, методи високих порядків.

**Аннотация.** Теория дифференциальных уравнений играет существенную роль в процессе изучения особенностей многих явлений и процессов. Создание эффективных алгоритмов решения дифференциальных уравнений – важная задача теории динамического моделирования и прикладного программирования. Использование методов высоких порядков для решения дифференциальных уравнений является одним из способов повышения точности и устойчивости получаемого решения.

В данной статье предложен простой алгоритм, позволяющий автоматизировать генерацию определяющих условий для метода Рунге-Кутты произвольного порядка. Алгоритм основан на использовании «помеченных деревьев» и эффективен при конструировании методов Рунге-Кутты высоких порядков.

**Ключевые слова:** обыкновенное дифференциальное уравнение, метод Рунге-Кутта, генерация методов, помеченные деревья, методы высоких порядков.

**Abstract.** The theory of differential equation plays essential role in study of many processes and effects. Creation of effective algorithms of differential equations solving is important problem in theory of dynamic modeling and application programming. Using methods of high order for differential equation solving is a one way to increase precision and stability of solution.

At this article a method of 'rooted trees' for creating differential equation solvers of high order is considered as a way aiming at rising computational precision of differential equations.

**Key words:** ordinary differential equations, Runge-Kutta method, method designing, rooted trees, methods of high order.

**Вступление**

Использование методов высоких порядков для решения дифференциальных уравнений является одним из способов повышения точности и устойчивости получаемого решения. Однако конструирование методов Рунге-Кутты высоких порядков сопряжено со значительным объемом вычислений. Метод «помеченных деревьев» [1-4] упрощает формирование условий порядка метода. Поскольку с увеличением порядка метода число уравнений значительно возрастает, для эффективного конструирования методов Рунге-Кутты необходимо автоматическое формирование условий, определяющих метод.

В данной статье предложен простой алгоритм, позволяющий автоматизировать генерацию определяющих условий для метода Рунге-Кутты произвольного порядка. Алгоритм основан на использовании «помеченных деревьев» и эффективен при конструировании методов Рунге-Кутты высоких порядков. Особое внимание в статье уделяется способу представления деревьев в компьютерной программе.

**Актуальность**

Реальные динамические системы характеризуются большим числом параметров, что в значительной степени ограничивает точность их моделирования. Как правило, динамические модели, описывающие поведение реальных систем, учитывают только небольшое число наиболее существенных факторов.

С развитием информационных технологий, появлением и распространением параллельных компьютерных систем появилась возможность существенно ускорить вычисление математических задач, а значит, создавать более сложные модели. Необходимость разработки высокоточных алгоритмов решения дифференциальных уравнений обусловила актуальность задачи автоматической генерации методов решения дифференциальных уравнений высоких порядков.

**Цель исследования**

Целью данной статьи является изложение разработанного алгоритма автоматической генерации определяющих условий для метода Рунге-Кутты произвольного порядка.

**Задачи исследования**

1. Постановка задачи формирования определяющих условий для метода Рунге-Кутты с использованием метода «помеченных деревьев»;
2. Описание формы представления «помеченных деревьев» в программе;
3. Описание алгоритма автоматического формирования определяющих условий для метода Рунге-Кутты.

**Постановка задачи**

Рассмотрим обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) вида (1):

$$f(t, y, y', \dots, y^{(m)}) = 0, \tag{1}$$

с начальными условиями (2):

$$\begin{aligned} y(t_0) &= y_0, \\ y'(t_0) &= y'_0, \\ &\dots \\ y^{(m-1)}(t_0) &= y_0^{(m-1)}, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $f$  – некоторая функция, связывающая независимую переменную  $t$ , искомую функцию  $y(t)$  и ее производные до  $m$ -го порядка включительно. Пусть  $u_t$  – приближенное решение задачи (1) в момент времени  $t$ .

Общий вид  $s$ -этапного метода Рунге-Кутты можно представить в виде матрицы коэффициентов (4) [5]:

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= u_n + h \cdot \varphi_s(u_n, t_n, h) \\ \varphi_s(u_n, t_n, h) &= b_1 k_1 + b_2 k_2 + \dots + b_s k_s \\ k_s &= f(t_n + c_s h, u_n + a_{s,1} k_1 h + a_{s,2} k_2 h + \dots + a_{s,s-1} k_{s-1} h), \end{aligned} \tag{3}$$

где  $a_{ij}$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  – вещественные константы, определяющие метод.

Метод (3) также можно представить в виде матрицы коэффициентов (4):

$$\begin{array}{c|ccccc} c_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1,s-1} & a_{1s} \\ c_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2,s-1} & a_{2s} \\ c_3 & a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3,s-1} & a_{3s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_s & a_{s1} & a_{s2} & \dots & a_{s,s-1} & a_{ss} \\ \hline & b_1 & b_2 & \dots & b_{s-1} & b_s \end{array} \tag{4}$$

При этом справедливо условие (5):

$$c_i = \sum_j a_{ij} \tag{5}$$

В случае если  $a_{ij}=0$  для всех  $i \geq j$ , то метод является явным, если  $a_{ij}=0$  для всех  $i > j$  или хотя бы один элемент  $a_{ii} \neq 0$ , то метод – диагонально- неявный, во всех остальных случаях метод является неявным [2].

Условия порядка, позволяющие вычислить определяющие метод константы, формируются путем сопоставления рядов Тейлора для приближенного решения, определяемого формулой (3) и точного решения. Для этого необходимо вычислять производные  $u_{n+1}$  и  $k_i$  по  $h$  при  $h=0$ . С ростом порядка метода такие вычисления становятся все более трудоемкими. Метод «помеченных деревьев» представляет альтернативный вариант формирования определяющих условий.

Для определения метода порядка  $q$  необходимо сформировать все абстрактные (непомеченные) деревья порядка  $\leq q$ . Каждое из таких деревьев  $tr$  определяет одно условие метода вида (6):

$$\Phi(tr) = \frac{1}{\gamma(tr)}, \tag{6}$$

где  $\Phi(tr)$  – некоторая комбинация коэффициентов дерева  $tr$ ;

$\gamma(tr)$  – коэффициент, определяемый как произведение весовых коэффициентов вершин дерева.

Для определения коэффициента  $\gamma(tr)$  необходимо поставить в соответствие каждой вершине, являющейся «листом» дерева, весовой коэффициент, равный 1, а всем остальным вершинам – весовой коэффициент, равный сумме весов исходящих вершин плюс один. Тогда  $\gamma(tr)$  будет определяемый как произведение весовых коэффициентов вершин дерева.

Корню дерева в соответствии ставится весовой коэффициент  $b$ , листьям – коэффициенты  $c$ , а промежуточным вершинам – коэффициенты  $a$ . Количество узлов называется порядком дерева. Пример дерева изображен на рисунке 1.

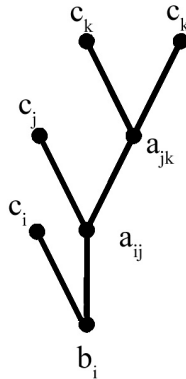


Рисунок 1. – Помеченное дерево порядка 7

Хотя использование метода «помеченных деревьев» значительно упрощает формирование условий порядка метода, его использование для генерации методов высоких порядков возможно только при условии автоматического формирования деревьев.

#### Представление деревьев в программе

Автоматическая генерация условий, определяющих порядок метода, предполагает разработку формы представления деревьев в программе. В статье [3] для представления деревьев порядка  $\leq 10$  используется последовательность цифр, каждая из которых соответствует вершине графа. Причем первая цифра соответствует корню дерева. Каждая вершина кодируется цифрой, соответствующей числу исходящих из нее ветвей. Для того чтобы обеспечить условие единственности всех деревьев, ветви в цифровом коде должны быть определенным образом упорядочены. А именно, первой ветвью выбирается та, у которой первая цифра ее кода наибольшая. При равенстве первых цифр сравниваются вторые, третьи и т.д.

Форма представления графов в данной статье не требует упорядочивания ветвей и подходит для генерации метода произвольного порядка.

Для генерации набора абстрактных деревьев произвольного порядка перейдем от индексов  $i, j, k, l, \dots$  к индексам  $i_1, i_2, i_3, i_4$  и т.д., как на рисунке 2.

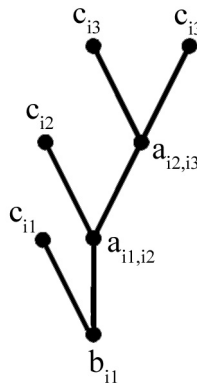


Рисунок 2. – Помеченное дерево порядка 7

Представим каждую вершину дерева в виде вектора (7):

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $v_1$  – код типа узла: 1 – для корня  $b$ , 2 – для промежуточных вершин  $a$ , 3 – для листьев  $c$ ;

$v_2$  – значение первого индекса узла;

$v_3$  – значение второго индекса узла ( $v_3 = 0$  для вершин типа 1 и 3).

Таким образом, для представления дерева порядка  $q$ , будет использоваться матрица, размерностью 3 на  $q$ . Дерево, представленное на рисунках 1 и 2, будет задаваться матрицей (8):

$$tr = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 3 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

**Автоматическое формирование условий порядка**

Генерация определяющих условий для метода порядка q состоит из следующих этапов:

$$\Phi(tr_{1,1}) = \sum_i b_{i1}$$

Шаг 1. Задать начальное условие порядка

Шаг 2. В цикле i = 2 до q выполнить следующие шаги:

Шаг 2.1. Используя все уже сформированные деревья порядка j от 1 до i-1, сформировать все возможные наборы абстрактных деревьев с общим порядком (количеством узлов), равным j-1.

Шаг 2.2. Деревья внутри каждого набора объединить путем добавления общего корня.

Для формирования функции Φ(tr) нового дерева порядка j, формируемого из m деревьев условие (6) будет определяться соотношением (9):

$$\sum b_{i_j} \prod_{j=1}^m \tilde{\Phi}(tr_j) = \frac{1}{q \prod_{j=1}^m \gamma(tr_j)}, \quad (9)$$

где  $\tilde{\Phi}(tr)$  – это преобразование функции Φ(tr) по правилу (10):

$$\begin{cases} b_{i_n} \rightarrow a_{i_n, i_{n+1}} \\ a_{i_n, i_{n+1}} \rightarrow a_{i_{n+1}, i_{n+2}} \\ c_{i_n} \rightarrow c_{i_{n+1}} \end{cases} \quad (10)$$

Для представления дерева в виде (7), преобразование (10) будет иметь следующую форму (11):

$$\begin{bmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2 \\ i \\ i+1 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} 2 \\ i \\ i+1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2 \\ i+1 \\ i+2 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} 3 \\ i \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 3 \\ i+1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Объединение вершин путем добавление общего корня означает объединение векторов и добавление нового вектора (1, 1, 0)<sup>T</sup>.

Рассмотрим формирование деревьев порядка 3, показанное на рисунке 3.

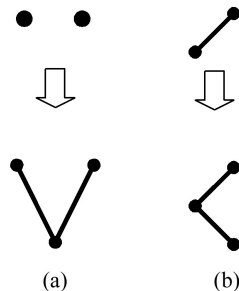


Рисунок 3. – Формирование деревьев порядка 3.

Преобразование будет происходить по схеме (12) для случая а, и по схеме (13) для случая б.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 2 \end{bmatrix}, \text{ что соответствует } b_{i_1} a_{i_1 i_2}^2 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 2 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}, \text{ что соответствует } b_{i_1} c_{i_1}^2 \quad (13)$$

Таким же образом формируются условия для метода произвольного порядка.

#### Выводы

Использование метода помеченных деревьев позволяет формировать методы Рунге-Кутты высоких порядков. И, не смотря на то, что с ростом порядка число уравнений значительно возрастает, использование вычислительной техники позволяет автоматизировать вывод условий и снизить затраты времени на генерацию методов.

#### Список литературы

1. John Butcher. Numerical Method for Ordinary Differential Equations. – John Willey & Sons Ltd, 2008. – 482 p.
2. Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Не жесткие задачи. – М.: Мир, 1990. – 512 с.
3. А.В. Тыглиян, С.С. Филиппов. Элементарные дифференциалы, их графы и коды // Математическое моделирование, т.21, №8, 2009. – с. 37-43.
4. Famelis I. Th., Papakostas S. N., Tsitouras Ch., "Symbolic derivation of Runge–Kutta order conditions", J. Symbol. Comput., 37 (2004), 311–327.
5. Чисельні методи в інформатиці : підручник для ВНЗ / Л.П. Фельдман, А.І. Петренко, О.А. Дмитрієва . – К. : Вид. група ВНУ, 2006.

#### Сведения об авторах

**Дмитриева Ольга Анатольевна** – к.т.н., доцент кафедры прикладной математики и информатики Донецкого национального технического университета, e-mail: dmitriv@r5.dgtu.donetsk.ua.

**Куприй Яна Александровна** – аспирант кафедры прикладной математики и информатики Донецкого национального технического университета, тел. (062) 257 46 46, e-mail: k\_yana@list.ru.

УДК 621.311

П. Д. ЛЕЖНЮК, В. О. ЛЕСЬКО, В. А. ВИДМИШ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**ВПЛИВ ВИБОРУ БАЛАНСУЮЧОГО ВУЗЛА НА ЧУТЛИВІСТЬ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЕС**

**Анотація.** У статті розглянуто питання впливу вибору місця розташування балансуєчого вузла на зміну втрат потужності. Показано залежність чутливості втрат потужності у вітках схеми електроенергетичної системи (ЕЕС) від параметрів системи, її топології, значень напруги у вузлах, а також розрахункових умов, зокрема місця розташування балансуєчого вузла.

**Ключові слова:** електроенергетична система, чутливість втрат потужності, балансуєчий вузол.

**Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос влияния выбора места расположения балансирующего узла на изменение потерь мощности. Показана зависимость чувствительности потерь мощности в ветках схемы электроэнергетической системы (ЭЭС) от параметров системы, ее топологии, значений напряжения, в узлах, а также расчетных условий, в частности места расположения балансирующего узла.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, чувствительность потерь мощности, балансирующий узел.

**Abstract.** In the article a question is considered in relation to influence of choice of place of location of balancing knot on changing of losses of power. Dependence of sensitiveness of losses of power is rotined in the branches of chart of the electroenergy system (EES) from the parameters of the system, its topology, values of tension, in knots, and also calculation terms, in particular places of location of balancing knot.

**Keywords:** electroenergy system, sensitiveness of losses of power, balancing knot.

**Вступ**

У результаті переходу до моделі двосторонніх договорів та балансуєчого ринку застосування нових ринкових принципів ціноутворення відбудеться в усіх сегментах майбутнього ринку. Основні обсяги енергії будуть реалізовуватися за двосторонніми договорами, наприклад, між виробниками та постачальниками, ціна на які буде визначатися двосторонніми домовленостями сторін. Що буде стимулюватиме учасників ринку до підвищення ефективності своєї діяльності, скорочення неефективних витрат та підвищення якості надання послуг [1].

Запровадження платежів за балансування, що базуються на фактичних витратах для досягнення балансу, стимулюватиме зростання наявної робочої потужності та створення достатніх резервів потужності. Перспективна модель ринку також передбачає перехід від солідарної до індивідуальної відповідальності за створення небалансу в системі та платежів за нього. Таким чином, кожен суб’єкт нестиме «економічну» відповідальність за свої небаланси, а отже намагатиметься звести їх до мінімуму. Такий механізм забезпечить не лише відшкодування витрат на послуги з балансування, а й сприятиме покращенню режимів роботи ОЕС України та її складових [1].

Розрахунки установлених режимів (УР) та поточкорозподілу в електричних мережах енергосистеми мають значний вплив при розв’язку задач, пов’язаних з проектуванням і експлуатацією електроенергетичних систем (ЕЕС) для “нового” ринку. Результати цих розрахунків можуть використовуватися при плануванні режимів і оперативному керуванні ЕЕС, а також бути базою для оптимізації режимів, аналізу стійкості і надійності [2–4].

З метою спрощення і пониження розмірності задачі оптимізації режимів енергосистем на кожному рівні територіальної і часової ієрархії диспетчерського керування здійснюється роздільне вирішення задачі оптимального розподілу активних навантажень і оптимізації режиму за напругою і реактивною потужністю у вузлах спостереження для прийняття керуючих дій. Крім того оптимізація режимів може здійснюватися по окремих підсистемах зі своїми балансуєчими вузлами (БВ). При об’єднанні підсистем для розрахунків з метою досягнення загальносистемного ефекту виникають небаланси в точках примикання підсистем. Часто ці небаланси співрозмірні з ефектом від оптимізації потоків потужності в ЕЕС [5, 6]. Тому науковий і практичний інтерес представляє дослідження питання впливу вибору БВ на результати оптимізації режиму енергосистем за активною потужністю, з врахуванням чутливості зміни втрат потужності в системі при зміні БВ.

**Актуальність**

Одним із видів розрахункових умов та зміни параметрів режиму є зміна балансуєчого вузла. В балансуєчому вузлі приймається фіксоване значення напруги, а також здійснюється балансування вузлових потужностей та втрат в елементах ЕЕС. Оскільки змінюється точка балансу вузлових потужностей, отже, змінюються перетоки потужності й втрати активної та реактивної потужності в системі. При цьому більшість існуючих методів розрахунку вважають те, що величина напруги базисного вузла, як вихідна інформація, повинна бути заданою та фіксованою. В дійсності, напруга базисного вузла протягом доби змінюється, і її величину ми точно не знаємо. Тому напруга задається апріорно, виходячи з аналітичних та інтуїтивних міркувань та емпіричних оцінок, які вносять в результат розв’язку задачі неточність та похибку. В деяких випадках ці похибки можуть бути значними та спотворювати реальну картину поточкорозподілу, і, як наслідок, привести до додаткових втрат активної потужності в мережах ЕЕС. Причому такі відхилення мають методичний характер. Тому вибір балансуєчого вузла та відхилення напру-

ги в ньому впливає на розрахункові умови, а отже постає задача в дослідженні чутливості результатів розрахунку оптимальних режимів ЕЕС до зміни вибору балансуєчого вузла.

### Мета дослідження

Метою даної роботи є визначення чутливості втрат потужності при зміні балансуєчого вузла та напруги в ньому на результати розрахунків втрат потужності як в системі в цілому так і в окремих її елементах.

### Задача

Задача - враховувати чутливість зміни втрат потужності у вітках до вибору балансуєчого вузла й напруги в ньому, при розрахунку ustalених режимів ЕЕС для підвищення ефективності заходів по зменшенню втрат потужності в неоднорідних ЕЕС.

### Вплив місця розташування БВ на результати розрахунку балансу потужностей

Вузлове рівняння ВР у формі балансу потужностей у матричній формі з врахуванням БВ має наступний вигляд [2]:

$$\dot{Y}_y \dot{U} = \sqrt{3} \dot{I} - \dot{Y}_\delta U_\delta, \quad (1)$$

де  $\dot{U}$  – вектор-стовбець напруги у вузлах системи;  $\dot{Y}_y$  – матриця вузлових провідностей порядку  $N$ ;  $\dot{I}$  – вектор-стовбець задаючих струмів у вузлах системи;  $\dot{Y}_\delta$  – фрагмент матриці вузлових провідностей, що вміщують стовпці, які відповідають балансуєчому вузлу;  $U_\delta$  – напруга балансуєчого вузла.

Даний вираз домножуємо на вектор напруги  $\dot{U}_\delta$  із комплексно-спряженими діагональними елементами та розпишемо усі величини через їх активні і реактивні складові:

$$\dot{S} = \sqrt{3} \hat{U}_a \dot{I} = P - jQ; \quad \dot{U} = U' + jU'';$$

$$\dot{Y}_y = G_y - jB_y; \quad \dot{Y}_a = G_a - jB_a,$$

де  $P$  і  $Q$  – вектор-стовпці відповідно активної і реактивної складових потужностей у вузлах;  $U'$  і  $U''$  – вектор-стовпці дійсної і уявної складових вектора-стовпця шуканої напруги у вузлах системи;  $G_y$  і  $B_y$  – відповідно активна та реактивна складові матриці вузлових провідностей  $\dot{Y}_y$ ;  $G_\delta$ ,  $B_\delta$  – відповідно активна та реактивна складові матриці вузлових провідностей балансуєчого вузла.

Таким чином, отримуємо:

$$(U'_\delta - jU''_\delta) \cdot (G_y - jB_y) \cdot (U' + jU'') = P - jQ - (U'_\delta - jU''_\delta) \cdot (G_\delta - jB_\delta) \cdot U_\delta. \quad (2)$$

Розкриємо другі та треті дужки справа та зліва формули (2). Маємо, що:

$$\begin{aligned} (U'_\delta - jU''_\delta) \cdot (G_y U' - jB_y U' + jG_y U'' + B_y U'') = \\ = P - jQ - (U'_\delta G_\delta - jU''_\delta B_\delta - jU''_\delta G_\delta - U''_\delta B_\delta) \cdot U_\delta. \end{aligned} \quad (3)$$

Розділимо дійсну і уявну складову виразу (3):

$$\begin{cases} U'_\delta \cdot (G_y U' + B_y U'') - U''_\delta \cdot (B_y U' - G_y U'') = P - (U'_\delta G_\delta - U''_\delta B_\delta) \cdot U_\delta; \\ U'_\delta \cdot (B_y U' - G_y U'') + U''_\delta \cdot (G_y U' + B_y U'') = Q - (U'_\delta B_\delta + U''_\delta G_\delta) \cdot U_\delta. \end{cases} \quad (4)$$

В розгорнутому вигляді даний вираз можна записати:

$$\left. \begin{aligned} U'_k \sum_{j=1}^N (g_{kj} U'_j + b_{kj} U''_j) - U''_k \sum_{j=1}^N (b_{kj} U'_j - g_{kj} U''_j) &= P_k - (g_{k\delta} U'_k - b_{k\delta} U''_k) U_\delta; \\ U'_k \sum_{j=1}^N (b_{kj} U'_j - g_{kj} U''_j) + U''_k \sum_{j=1}^N (g_{kj} U'_j + b_{kj} U''_j) &= Q_k - (b_{k\delta} U'_k + g_{k\delta} U''_k) U_\delta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $b_{kj}$  і  $g_{kj}$  – елементи активної та реактивної складових матриці вузлових провідностей.

Вузлове рівняння (ВР) у формі балансу потужностей має наступний вигляд у полярній системі координат:

$$\left. \begin{aligned} U_k \sum_{j=1}^N [g_{kj} \cos(\varphi_k - \varphi_j) - b_{kj} \sin(\varphi_k - \varphi_j)] U_j &= P_k - (g_{k\bar{0}} \cos(\varphi_k) - b_{k\bar{0}} \sin(\varphi_k)) U_k U_{\bar{0}}; \\ U_k \sum_{j=1}^N (g_{kj} \sin(\varphi_k - \varphi_j) + b_{kj} \cos(\varphi_k - \varphi_j)] U_j &= Q_k - (g_{k\bar{0}} \sin(\varphi_k) + b_{k\bar{0}} \cos(\varphi_k)) U_k U_{\bar{0}}, \end{aligned} \right\}$$

$\varphi_k - \varphi_j$  - різниця початкових фаз напруг між k-им та j-им вузлами.

Аналізуючи вище отримані формули бачимо, що при зміні напруги та місця розташування БВ змінюються й результати розрахунку балансу потужностей, а отже втрати у системі.

### Визначення матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності при зміні розрахункових умов

В статті розглядається метод оцінки чутливості сумарних втрат потужності в неоднорідних ЕЕС як критерій оптимальності режимів та втрат потужності в окремих вітках електричних мереж до зміни балансуєчого вузла. За ідеєю запропонований тут підхід схожий з методом використання відносних приростів технологічних втрат електроенергії (ТРЕ) на шляху в електричній мережі від джерела електроенергії до споживача [7, 8].

Як відомо з [9] якщо коефіцієнти розподілу втрат потужності у вітках є незмінними, то при зміні потужності у вузлах втрати потужності в i-й вітці також зміняться і будуть рівні:

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i \delta \dot{\mathbf{S}}, \quad (6)$$

де  $\delta \dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{S}}^{k+1}$  – вектор зміни потужності у вузлах ЕЕС при переході з k-го режиму до k+1-го.

Введемо позначення:

$$\dot{\mathbf{T}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_t \dot{\mathbf{M}}_{\Sigma ki}) \hat{\mathbf{C}}_{ki} \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}, \quad (7)$$

де  $\dot{\mathbf{T}}_i$  – вектор-рядок матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності для i-тої вітки від потужності вузлів схеми, який залежить від топології схеми та напруги у вузлах з урахуванням балансуєчого;  $\dot{\mathbf{U}}_t$  – транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і балансувальні (тут і далі індекс “t” означає, що матриця або вектор є транспонованими).  $\dot{\mathbf{U}}_d$  – діагональна матриця напруг у вузлах без балансувальних вузлів,  $\dot{\mathbf{M}}_{\Sigma kt}$  – матриця зв’язків віток у вузлах, що за структурою подібна до першої матриці з’єднань  $\dot{\mathbf{M}}_{\Sigma t}$ , але в якій замість значень “-1” для вузлів кінця віток з трансформаторами знаходяться їх коефіцієнти трансформації;  $\hat{\mathbf{C}}_{ki}$  – i-й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах  $\dot{\mathbf{J}}$  по вітках схеми з урахуванням коефіцієнтів трансформації;

Так як при зміні балансуєчого вузла змінюється напруга у вузлах, отже й змінюються прирости втрат потужності у вітках, що впливає на сумарні втрати. Якщо зміни відбулися тільки в одному вузлі – g-му, то приріст втрат потужності в i-й вітці від зміни потужності в g-му вузлі на  $\delta \dot{\mathbf{S}}_g$  буде складати

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_{ig} = \dot{\mathbf{t}}_{ig} \delta \dot{\mathbf{S}}_g. \quad (8)$$

З (8) знайдемо  $\dot{\mathbf{t}}_{ig}$

$$\dot{\mathbf{t}}_{ig} = \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_{ig}}{\delta \dot{\mathbf{S}}_g}. \quad (9)$$

З (9) у відповідності з [6, 10] слідує, що  $\dot{\mathbf{t}}_{ig}$  є коефіцієнтом чутливості втрат потужності в i-й вітці до зміни потужності в g-му вузлі. Оскільки матриця  $\dot{\mathbf{T}}$  складається з елементів виду  $\dot{\mathbf{t}}_{ig}$ , то вона є матрицею чутливості, яка встановлює зв’язок між приростами втрат потужності у вітках ЕЕС і змінами потужності у вузлах.

### Коефіцієнти чутливості втрат потужності у вітках до напруги у вузлах ЕЕС при зміні БВ

Як видно з (7) значення елементів матриці чутливості  $\dot{\mathbf{T}}$  в загальному випадку залежать від напруги у вузлах  $\dot{\mathbf{U}}$ , яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах та напруги балансуєного вузла. В цьому випадку при зміні балансуєного вузла втрати потужності в і-й вітці зміняться і, на відміну від (6), будуть рівні:

$$\delta\Delta\dot{\mathbf{S}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{T}}_i^b \dot{\mathbf{S}}^b$$

та з врахуванням того, що навантаження не змінилося  $\dot{\mathbf{S}}^b = \dot{\mathbf{S}}^k = \dot{\mathbf{S}}$ , а  $\delta\dot{\mathbf{T}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^b$ , отримуємо:

$$\delta\Delta\dot{\mathbf{S}}_i = \delta\dot{\mathbf{T}}_i \dot{\mathbf{S}}. \quad (10)$$

$\dot{\mathbf{T}}_i$  складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах і-тої вітки складає протікання по ній потужності до кожного вузла.  $\dot{\mathbf{T}}_i^k$  - матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми при k-му БВ,  $\dot{\mathbf{T}}_i^b$  - матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми при b-му БВ.

Якщо відбулася зміна БВ з k-го на b-тий, то приріст втрат потужності в і-й вітці від зміни БВ у відповідності з (10) буде такою:

$$\delta\Delta\dot{\mathbf{S}}_i = \delta t_i \dot{\mathbf{S}}. \quad (11)$$

З (11) приріст коефіцієнта чутливості  $\delta t_i$  можна знайти з визначення вектор-рядка матриці  $\dot{\mathbf{T}}$ :

$$\delta\dot{\mathbf{T}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^b = (\dot{\mathbf{U}}_i^k \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_\delta^k)^{-1} - (\dot{\mathbf{U}}_i^b \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_\delta^b)^{-1} = \hat{\mathbf{C}}_i (\delta\dot{\mathbf{U}}_{i\delta}^k - \delta\dot{\mathbf{U}}_{i\delta}^b). \quad (12)$$

В діагональній матриці  $\delta\dot{\mathbf{U}}_{3a}$  її елементи визначаються як

$$\delta\dot{\mathbf{U}}_{3a} = \frac{\Delta\dot{\mathbf{U}}_i}{\dot{\mathbf{U}}_j}, \quad j = \overline{1, m},$$

де  $\Delta\dot{\mathbf{U}}_i = \dot{\mathbf{U}}_i \mathbf{M}_{\Sigma i}$  - спад напруги в і-й вітці схеми.

Значення елементів матриці  $\dot{\mathbf{T}}$  дає можливість визначити які вітки найбільше реагують на зміну напруги у вузлах яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах.

З врахуванням того, що  $\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^k = \dot{\mathbf{U}}_i^k \mathbf{M}_{\Sigma i}$  і  $\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^b = \dot{\mathbf{U}}_i^b \mathbf{M}_{\Sigma i}$  - відповідно падіння напруги на і-й вітці при k-му і b-му БВ, вираз (12) переписеться:

$$\delta\dot{\mathbf{T}}_i = \hat{\mathbf{C}}_i [\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^k (\dot{\mathbf{U}}_\delta^k)^{-1} - \Delta\dot{\mathbf{U}}_i^b (\dot{\mathbf{U}}_\delta^b)^{-1}] = \hat{\mathbf{C}}_i \Delta\dot{\mathbf{U}}_i^k (\dot{\mathbf{U}}_\delta^k)^{-1} (1 - \sigma_{\Delta i} \sigma_u^{-1}). \quad (13)$$

У виразі (13):  $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^b}{\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^k}$  - відносна зміна напруги на і-й вітці при зміні БВ;  $\sigma_u = \dot{\mathbf{U}}_\delta^k (\dot{\mathbf{U}}_\delta^b)^{-1}$  -

діагональна матриця відносної зміни напруги у вузлах при зміні БВ.

Як видно з (13) приріст коефіцієнта чутливості  $\delta t_i$  залежить тільки від зміни напруги у вузлах при різних розрахункових умовах. Наприклад, при зміні БВ приріст коефіцієнта чутливості в і-й вітці

$$\delta t_i = c_i \frac{\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^k}{\dot{\mathbf{U}}^k} (1 - \frac{\sigma_{\Delta i}}{\sigma_u}),$$

де  $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^b}{\Delta\dot{\mathbf{U}}_i^k} = \frac{\dot{\mathbf{U}}_p^b - \dot{\mathbf{U}}_q^b}{\dot{\mathbf{U}}_p^k - \dot{\mathbf{U}}_q^k}$  (р і q - номери вузлів, що обмежують і-ту вітку); а  $\sigma_u = \frac{\dot{\mathbf{U}}^b}{\dot{\mathbf{U}}^k}$ .

Тоді, з врахуванням останнього виразу, чутливість втрат для і-тої вітки по відношенню до втрат в ній, розрахованих до зміни БВ визначиться як:

$$t_i = \frac{\Delta S_i^b}{\Delta S_i^k} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{T_{ij}^b S_j^b}{T_{ij}^k S_j^k} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{T_{ij}^b}{T_{ij}^k} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\Delta \dot{U}_i \cdot \hat{C}_{ij}^b \cdot (\dot{U}_j^b)^{-1}}{\Delta \dot{U}_i \cdot \hat{C}_{ij}^k \cdot (\dot{U}_j^k)^{-1}} = \sum_{j=1}^{n-1} \sigma_{\Delta i} \cdot \sigma_{b/k}^{ij} \cdot \sigma_{ij}^{-1},$$

де  $\sigma_{b/k}^{ij} = \frac{\hat{C}_{ij}^b}{\hat{C}_{ij}^k}$  – відношення коефіцієнтів струморозподілу відповідно при k – му та b – му балансуєчому вузлі.

Отримані формули приростів коефіцієнтів чутливості  $\delta T_i$  можуть використовуватися для уточнення чутливості втрат потужності у вітках схеми ЕЕС тоді, коли результати оцінки і ранжування віток не виявились достатньо близькими і це ускладнює прийняття оптимальних рішень при зміні розрахункових умов.

### Висновки

Чутливість втрат потужності у вітках схеми ЕЕС залежить від параметрів системи, її топології, значень напруги у вузлах, а також розрахункових умов, зокрема місця розташування балансуєчого вузла. Запропонований метод оцінки чутливості втрат потужності при зміні БВ або напруги в них, з використанням матриці чутливості дозволяє визначити оптимальну послідовність корегуючих впливів регулюючих пристроїв на режими ЕЕС.

### Список літератури

1. Доповідь. Голови Національної комісії регулювання електроенергетики України. Кальченка В. М. Перехід до нової моделі ринку електроенергії в Україні.
2. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. / Виталий Исаакович Идельчик – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
3. Аюев Б. И. Анализ эффективности вычислительных моделей расчета установившихся режимов электрических систем / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, В. Г. Неуймин // Электричество. – 2008. – №8. – С. 2–13.
4. Жуков Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчетов / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. – М.: Энергия, 1979. – 416 с
5. Горнштейн В. М. Методы оптимизации режимов энергосистем / [Горнштейн В. М., Мирошниченко Б. П., Пономарев А. В. и др.] ; под ред. Горнштейна В. М. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.
6. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / [Войтов О. Н., Воропай Н. И., Гамм А. З. и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 250 с.
7. Щербина Ю. В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях / Щербина Ю. В., Бойко Н. Д., Бутенко А. Н. – К.: Техніка, 1981. – 104 с.
8. Экономия электроэнергии в электрических сетях / [Магда И. И., Меженный С. Я., Сулейманов В. Н. и др.] ; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. – К.: Техніка, 1986. – 167 с.
9. Лежнюк П. Д. Чутливість втрат потужності у вітках схеми електроенергетичної системи до збурень у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. – 2007. – №6. – С. 63–66.
10. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.

### Відомості про авторів

**Лежнюк Петро Дем'янович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598377, lpd@inbox.ru;

**Лесько Владислав Олександрович** – к.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598245, leskovlad@mail.ru;

**Видмиш Володимир Андрійович** – асистент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598245, prof\_vydmysh@mail.ru.