

УДК 681.5.013:004.652

# БАГАТОКРИТЕРІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ НАДМІРНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ СИТУАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ ЇЇ ПАРАМЕТРАМИ



[Ю.Г. ДАНИК](#), [О.О. ПИСАРЧУК](#)

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова



[К.О. СОКОЛОВ](#)

Управління інформаційних технологій Міністерства оборони України



[С.В. ТИМЧУК](#)

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

**Abstract** – The paper offers the multicriteria mathematical model of shaping of surplus structure of systems of monitoring of critical objects. The enumeration of particulate criteria of the optimality is formed for model generation, which characterizes all the elements of monitoring system, operative category, exterior factors and requirements to functional reliability. The analogue-discrete form of convolution, which is based on the nonlinear scheme of compromises, is offered for the first time for an aggregate of private criteria. It is a development of the classical scheme of convolution. The discrete-analogue convolution unites a simplicity of a solution of an optimizing problem in the discrete form of exposition of private criteria and a completeness and adequacy of analogue models for exposition of private criteria of an optimality. As a result, the analogue-discrete convolution ensures a consecutive reduction of dimension of an optimizing problem of a structurally-parametrical synthesis of complicated and big systems of monitoring.

**Анотація** – У статті запропоновано багатокритерійну математичну модель формування надлишкової структури систем моніторингу критичних об'єктів. Для побудови моделі сформовано перелік часткових критеріїв оптимальності. Агрегацію часткових критеріїв проведено із застосуванням дискретно-аналогової згортки з нелінійною схемою компромісів.

**Аннотация** – В статье предложена многокритериальная математическая модель формирования избыточной структуры систем мониторинга критических объектов. Для построения модели сформирован перечень частных критериев оптимальности. Агрегация частных критериев проведена с применением дискретно-аналоговой свертки с нелинейной схемой компромиссов.

## Вступ

Стрімкий розвиток інформаційних і телекомунікаційних технологій зумовив формування єдиного інформаційного простору, у якому взаємодіють, функціонують, модифікуються й розвиваються соціотехнічні системи різного ступеня складності й призначення. Твірним елементом таких систем і явищ є системи моніторингу (СМ) заданих об'єктів (об'єктів моніторингу, ОМ), в яких реалізуються збір, накопичення, обробка одержуваних даних і керування зазначеними процесами. Наслідком цього стала надмірність інформації, що циркулює в єдиному інформаційному прос-

торі, значна динаміка перебігу зовнішніх і внутрішніх процесів, складність, фатальність і висока щільність потоку виникаючих при цьому кризових ситуацій (КС).

Традиційно побудова СМ ґрунтується на формуванні статичної структури для певної предметної області її застосування, здатної функціонувати для конкретної обмеженої множини конфліктних ситуацій. При цьому дотримуються вимоги відкритості архітектури, модульності й уніфікації [1]. Завдяки зазначеному інформаційна надлишковість, зростання динаміки зміни й щільності потоку КС компенсуються включенням нових елементів в систему. Такий шлях є малоефективним, оскільки веде до ускладнення системи, підвищує її вартість й інертність, знижуючи рівень стійкості до відмов тощо. Синтез статичної структури може здійснюватися з використанням багатокритерійних або однокритерійних підходів послідовно або паралельно з розв'язком задачі параметричного синтезу [1–4]. Останнім часом розвиток технологій передачі й обробки інформації та застосовуваних при цьому програмно-апаратних рішень дозволяє використовувати прогресивні технології ситуаційного управління в СМ із формуванням методологічних основ їх реалізації.

Метою статті є синтез багатокритерійної математичної моделі формування надлишкової структури СМ для ситуаційного управління її параметрами.

## Основна частина

Суть запропонованого до використання самоорганізованого ситуаційного управління структурою і параметрами СМ в умовах значної надмірності інформації, динаміки зміни й щільності потоку КС полягає в такому. Нехай має місце надлишкова структура СМ, статично сформована з елементів і підсистем різного рівня або ж динамічно формована з доступних структурних складових завдяки відкритості її архітектури. При виникненні конкретної КС за сукупністю груп частинних критеріїв відбираються елементи статичної структури СМ, поєднані в інформаційно-керуючі кластери (ІКК) з індивідуальними властивостями. Тоді через часову протяжність процесів моніторингу кожної конкретної КС і щільності потоку їх виникнення формуються й одночасно функціонують безліч ІКК у межах надлишкової структури й (або) доступних для використання елементів СМ. Тим самим досягається просторово-часове, структурно-параметричне рознесення опрацьовуваних задач за потоком КС на рівні ІКК у межах єдиної надлишкової структури СМ. В результаті система одержує додаткові властивості багатозадачності, багатофакторності й багаторівневої, а також здатність ефективно функціонувати в умовах значної надмірності інформації, динаміки зміни й щільності потоку КС. Власне реалізується процес керування структурою й параметрами СМ, а його алгоритмізація надає системі властивість структурної й параметричної самоорганізації при зміні зовнішньої й внутрішньої обстановки (ситуації) [3–6].

Реалізація процесу ситуаційного управління структурою й параметрами СМ вимагає комплексного вирішення етапів: визначення її узагальненої структури з лінійним описом елементів; конкретизації понять КС, ОМ, а також режимів робо-

ти СМ; формування груп частинних показників і критеріїв оптимізації структури і параметрів системи для ситуаційного управління її складовими; синтезу самоорганізованої математичної моделі ситуаційного управління структурою і параметрами СМ.

Основними елементами СМ є:

- система сенсорів (технічних засобів моніторингу (ТЗМ));
- система накопичення й обробки інформації моніторингу (СНОІМ) зі спеціальним програмним забезпеченням;
- оперативний склад АРМ СНОІМ.

Зазначені елементи формують підсистему збору й обробки інформації СМ.

Допоміжними елементами СМ є:

- спеціальне технічне обладнання (СТО), яке включає системи: навігації, електроживлення, життєзабезпечення, технічного захисту інформації та ін;
- система телекомунікації (СТК).

Зовнішніми елементами, з якими взаємодіє СМ, є інформаційні джерела, що характеризують об'єкти моніторингу

Під *КС*, у контексті реалізації процесу моніторингу, розуміємо деякі динамічно змінювані події або їх послідовність, джерелами яких можуть бути зміни зовнішньої обстановки й внутрішніх факторів, стану, властивостей, динаміки ОМ, ініціативи споживачів інформації, системи керування вищого рівня, а також керуючої ланки поточних функцій, що вимагають від СМ зміни завдань, властивостей та призводять до необхідності оперативних дій споживачів інформації, спрямованих на недопущення або усунення можливих фатальних наслідків у ході розвитку ситуації. При цьому КС слід розглядати як штатного (відомого, прогнозованого), так і позаштатного типів.

**Формування груп (категорій) частинних показників і критеріїв** оптимальності структури й параметрів СМ у цілому й ІКК, зокрема, реалізується шляхом розв'язку декомпозиційної задачі встановлення показників для кожної структурної одиниці СМ із урахуванням вимог ефективності розв'язання системою цільових задач. Реалізація цього процесу дозволяє виділити групи частинних показників.

1. Множина показників технічних характеристик підсистем СМ:

$$TX = \{TX_{TS}, TX_{SNO}, TX_{STO}, TX_{STK}\}, \quad (1)$$

де  $TX_{TS}$ ,  $TX_{SNO}$ ,  $TX_{STO}$ ,  $TX_{STK}$  – технічні характеристики ТЗМ, СНОІМ, СТО, СТК відповідно. Кожна підсистема СМ характеризується підмножинами показників за кількістю й типом елементів СМ із  $i$ -и індексами у відповідному позначенні:

$$\begin{aligned} TX_{TS} &= \{TX_i^{TS}\}, i = 1 \dots I; TX_{SNO} = \{TX_j^{SNO}\}, j = 1 \dots J; \\ TX_{STO} &= \{TX_k^{STO}\}, k = 1 \dots K; TX_{STK} = \{TX_l^{STK}\}, l = 1 \dots L. \end{aligned} \quad (2)$$

2. Показники функціональної спрямованості підсистем СМ, що характеризують їхнє призначення залежно від типу, конкретної технічної реалізації, ОМ і розташо-

ваних на них інформаційних джерел, які визначають призначення АРМ СНОІМ то-що, це:

$$FN = \{FN_{TS}, FN_{SNO}, FN_{STO}, FN_{STK}\}, \quad (3)$$

де  $FN_{TS}$ ,  $FN_{SNO}$ ,  $FN_{STO}$ ,  $FN_{STK}$  – підмножини числових значень (кодових комбінацій), що характеризують зміст функціональної спрямованості підсистем СМ – ТЗМ, СНОІМ, СТО, СТК відповідно у вигляді:

$$\begin{aligned} FN_{TS} &= \{FN_i^{TS}\}, i = 1 \dots I_1; FN_{SNO} = \{FN_j^{SNO}\}, j = 1 \dots J_1; \\ FN_{STO} &= \{FN_k^{STO}\}, k = 1 \dots K_1; FN_{STK} = \{FN_l^{STK}\}, l = 1 \dots L_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Показники ефективності першої та другої груп стосуються надлишкової структури СМ і є незмінними протягом часу існування поточної КС.

3. Показники функціональної стійкості СМ. Дана категорія є узагальнюючою для властивостей: стійкості, надійності (безвідмовності), стійкості до відмов, живучості, завадостійкості [7]. Під функціональною стійкістю для розподіленої СМ із самоорганізацією процесу ситуаційного керування її структурою й параметрами розуміється здатність системи виконувати мінімальний обсяг функцій для локалізації й ліквідації конкретної КС протягом її існування при зовнішніх і внутрішніх впливах на СМ, не передбачених нормальною експлуатацією, а також здійснювати вибір оптимального режиму функціонування за рахунок її внутрішніх ресурсів, перебудови структури, зміни функцій окремих підсистем, фактично завдяки функціональній інваріантності системи до зовнішніх (внутрішніх) навмисних (ненавмисних) апріорно невідомих впливів (збоїв).

Відповідно до викладеного, структурні й імовірнісні показники функціональної стійкості слід розглядати у термінах показників функціональної спрямованості підсистем СМ.

Структурні показники функціональної стійкості системи мають вигляд обмежень:

$$\begin{aligned} FN_{TS} &= \{FN_i^{TS} \cong FN_{i+N}^{TS} \cong \dots\} \geq 2, FN_{SNO} = \{FN_j^{SNO} \cong FN_{j+N}^{SNO} \cong \dots\} \geq 2, \\ FN_{STO} &= \{FN_k^{STO} \cong FN_{k+N}^{STO} \cong \dots\} \geq 2, FN_{STK} = \{FN_l^{STK} \cong FN_{l+N}^{STK} \cong \dots\} \geq 2. \end{aligned} \quad (5)$$

Тобто кількість елементів множин, що характеризують підсистеми СМ із перетином (дублюванням) виконуваних функцій, наприклад, більше ніж на 50% для забезпечення функціональної стійкості формованих під виниклу конфліктну ситуацію ІКК СМ, має бути більшою або рівною двом.

Імовірнісні показники функціональної стійкості відображають наявність горизонтально-вертикальних функціональних й інформаційних зв'язків між відібраними для формування ІКК елементами СМ. Конкретика топології й архітектура системи забезпечення зазначених зв'язків (СТК) визначають перелік змінюваних значень попа-

рних імовірностей міжелементних і внутрішньоелементних зв'язностей. При цьому здійснюється контроль заданого граничного рівня:

$$P_{TS,SNO}(t) > P_{TS,SNO}^Z, P_{TS,STO}(t) > P_{TS,STO}^Z, P_{TS,STK}(t) > P_{TS,STK}^Z, \\ P_{SNO,STO}(t) > P_{SNO,STO}^Z, P_{SNO,STK}(t) > P_{SNO,STK}^Z, P_{STO,STK}(t) > P_{STO,STK}^Z. \quad (6)$$

Залежність від часового фактора показників функціональної стійкості обумовлена послідовно-паралельним функціонуванням на надлишковій структурі СМ безлічі ІКК, впливом зовнішніх і внутрішніх факторів.

4. Показники ефективності виконання цільових завдань ергатичної складової СМ: оперативного складу СНОІМ, операторів ТЗМ, обслуговуючого персоналу СТО. Дані показники будемо розглядати як узагальнену числову комбінацію, що характеризує ефективність роботи людини-оператора, обумовлену його функціональною придатністю (підготовленістю), фізіологічними особливостями, поточним психофізичним станом тощо. Ця категорія показників ефективності описана надійністю оперативного складу  $P_{OS}$  – добутком імовірності безвідмовної роботи кожного оператора АРМ й іншого персоналу [8, 9] для конкретного часового інтервалу, співвіднесеного до часу існування поточної КС:

$$P_{OS}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{OP_i}(t)), P_{OP_i}(t) = K_{OP_i}(t) P_{\Phi_i}(t) P_{\Psi_i}(t), \quad (7)$$

де  $P_{OP_i}(t)$  – імовірність безвідмовної роботи  $i$ -го оператора (за кількістю АРМ  $i = 1 \dots N$ ) протягом часу  $t$ ;  $K_{OP_i}(t)$  – коефіцієнт готовності  $i$ -го оператора, що дорівнює ймовірності приймання інформації в довільний момент часу  $t$ ;  $P_{\Phi_i}(t)$  – біологічна надійність, обумовлена в тому числі функціональною придатністю, рівна ймовірності відсутності  $\Phi$  відмов в  $i$ -го оператора протягом часу  $t$ ;  $P_{\Psi_i}(t)$  – психофізіологічна надійність (безпомилковість) роботи  $i$ -го оператора за час  $t$ .

5. Показники інженерно-психологічної оцінки ефективності СМ [8] поєднують і відображають сукупність вимог щодо забезпечення ефективної роботи ергатичного компонента (оператора) в системі людина-машина, у тому числі умов середовища, ергономічних показників робочого місця, рівня автоматизації роботи оператора, ергономічних показників програмного забезпечення АРМ тощо.

Показники, що характеризують умови середовища роботи оператора – множина  $SR$ , що включає: оцінку негативної дії природних факторів (некомпенсовані ергономікою АРМ)  $SR_{PF}$ ; рівень напруженості зовнішньої психофізичної ситуації (повсякденна діяльність, підвищена небезпека, ризик для життя)  $SR_{VS}$ ; рівень напруженості опрацьовуваної КС (залежно від її типу й режиму функціонування СМ)  $SR_{KC}$ :

$$SR = \{SR_{PF}, SR_{VS}, SR_{KC}\}. \quad (8)$$

Показники автоматизації роботи оператора (розподіл функцій між оператором і машиною) характеризуються відношенням кількості функцій, виконуваних оператором в штатному  $N_{SH}$ , підвищеної готовності  $N_{PG}$ , кризовому  $N_{KR}$  й посткризовому  $N_{PK}$  режимах функціонування СМ, співвіднесених до загальної кількості функцій, необхідних для виконання системою взагалі в зазначених режимах –  $SN_{SH}$ ,  $SN_{PG}$ ,  $SN_{KR}$ ,  $SN_{PK}$ , що визначається узагальненим показником:

$$AR = \left( \frac{N_{SH}}{SN_{SH}} + \frac{N_{PG}}{SN_{PG}} + \frac{N_{KR}}{SN_{KR}} + \frac{N_{PK}}{SN_{PK}} \right). \quad (9)$$

6. Економічні показники відображають фінансові витрати, розділені на капіталовкладення й поточні витрати. Їх різномірність обумовлює необхідність використання узагальненого показника наведених витрат:

$$S_{PR} = C + E_N K, \quad (10)$$

де  $C$  – поточні витрати за деякий проміжок часу;  $E_N$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності, його величина для рентабельної економіки становить  $E_N \geq 0,12$  [8];  $K$  – величина капіталовкладень в обраній валютній одиниці.

Капіталовкладення відображають фінансові витрати на: реалізацію повного циклу науково-технічного проектування й супроводу, розробку, випробування, виготовлення, впровадження й серійне виробництво технічних складових СМ, а також системи в цілому –  $K_{RS}$ ; проведення аналогічних робіт щодо програмного забезпечення СМ –  $K_{RP}$ ; витрати на підготовку обслуговуючого й експлуатуючого персоналу для СМ –  $K_{PodP}$ .

Поточні витрати спрямовані на поточне обслуговування й підтримку в необхідному стані технічних і програмних компонентів СМ відповідно –  $C_{TOS}$ ,  $C_{TOP}$  (у тому числі на модернізацію й ремонт), а також витрати на перепідготовку й підвищення кваліфікації експлуатуючого персоналу СМ –  $C_{PodP}$ .

З урахуванням декомпозиційних пояснень маємо

$$K = K_{RS} + K_{RP} + K_{PodP}, C = C_{TOS} + C_{TOP} + C_{PodP}. \quad (11)$$

7. Пропускна здатність СМ характеризує її можливості паралельно обробляти потік КС. Це досягається й забезпечується надмірністю структури системи. У першому наближенні будемо вважати, що одночасно один комплекс складових СМ у конкретний момент часу забезпечує обробку однієї КС, а нарощування структури СМ забезпечує лінійне зростання її пропускну здатності. З урахуванням сказаного маємо залежність пропускну здатності СМ  $PSp(N)$  від кількості в ній  $i$ -х елементів  $N$  у вигляді

$$PSp(N) = PSp \cdot N. \quad (12)$$

Таким чином, отримано перелік груп частинних показників оптимальності, застосовуваних для структурно-параметричного синтезу надлишкової структури СМ у вигляді (1)–(12). Зазначені показники дозволяють сформулювати таблицю генерального переліку показників і критеріїв структурно-параметричного синтезу надлишкової структури СМ у вигляді табл. 1.

Таблиця 1. Генеральний перелік показників і критеріїв структурно-параметричного синтезу СМ

Група показників	Ієрархія узагальнених і частинних показників		Критерій
1. Показники і критерії технічних характеристик підсистем СМ			
TX	$TX_{TS}$	$TX_i^{TS}$	$TX_i^{TS} \rightarrow \max$
	$TX_{SNO}$	$TX_j^{SNO}$	$TX_j^{SNO} \rightarrow \max$
	$TX_{STO}$	$TX_k^{STO}$	$TX_k^{STO} \rightarrow \max$
	$TX_{STK}$	$TX_l^{STK}$	$TX_l^{STK} \rightarrow \max$
2. Показники функціональної направленості підсистем СМ			
FN	$FN_{TS}$	$FN_i^{TS}$	$FN_i^{TS} \rightarrow \max$
	$FN_{SNO}$	$FN_j^{SNO}$	$FN_j^{SNO} \rightarrow \max$
	$FN_{STO}$	$FN_k^{STO}$	$FN_k^{STO} \rightarrow \max$
	$FN_{STK}$	$FN_l^{STK}$	$FN_l^{STK} \rightarrow \max$
3. Показники функціональної стійкості СМ			
3.1. Структурні показники функціональної стійкості системи			
$F_nN(t)$	$FN_N(t)$	$FN_{TS}(t)$	$FN_{TS}(t) \rightarrow \max$
		$FN_{SNO}(t)$	$FN_{SNO}(t) \rightarrow \max$
		$FN_{STO}(t)$	$FN_{STO}(t) \rightarrow \max$
		$FN_{STK}(t)$	$FN_{STK}(t) \rightarrow \max$
3.2. Імовірнісні показники функціональної стійкості			
$F_nN(t)$	$P_N(t)$	$P_{TS,SNO}(t)$	$P_{TS,SNO}(t) \rightarrow \max$
		$P_{TS,STO}(t)$	$P_{TS,STO}(t) \rightarrow \max$
		$P_{TS,STK}(t)$	$P_{TS,STK}(t) \rightarrow \max$
		$P_{SNO,STO}(t)$	$P_{SNO,STO}(t) \rightarrow \max$
		$P_{SNO,STK}(t)$	$P_{SNO,STK}(t) \rightarrow \max$
		$P_{STO,STK}(t)$	$P_{STO,STK}(t) \rightarrow \max$
4. Показники ефективності виконання цільових завдань операторами СМ			
$P_{OS}(t)$	$P_{OP_i}(t)$	$K_{OP_i}(t)$	$K_{OP_i}(t) \rightarrow \max$
		$P_{\Phi_i}(t)$	$P_{\Phi_i}(t) \rightarrow \max$
		$P_{\Psi_i}(t)$	$P_{\Psi_i}(t) \rightarrow \max$

Продовження табл. 1

Група показників	Ієрархія узагальнених і частинних показників		Критерій
5. Показники інженерно-психологічної оцінки ефективності СМ			
IPO	5.1. Показники, що характеризують умови середовища роботи оператора		
	SR	$SR_{PF}$	$SR_{PF} \rightarrow \min$
		$SR_{VS}$	$SR_{VS} \rightarrow \min$
		$SR_{KC}$	$SR_{KC} \rightarrow \min$
IPO	5.2. Показники автоматизації роботи оператора		
	AR	$N_{SH}SN_{SH}^{-1}$	$N_{SH}SN_{SH}^{-1} \rightarrow \min$
		$N_{PG}SN_{PG}^{-1}$	$N_{PG}SN_{PG}^{-1} \rightarrow \min$
		$N_{KR}SN_{KR}^{-1}$	$N_{KR}SN_{KR}^{-1} \rightarrow \min$
		$N_{PK}SN_{PK}^{-1}$	$N_{PK}SN_{PK}^{-1} \rightarrow \min$
6. Економічні показники			
S	6.1. Капіталовкладення		
	K	$K_{RS}$	$K_{RS} \rightarrow \min$
		$K_{RP}$	$K_{RP} \rightarrow \min$
		$K_{PodP}$	$K_{PodP} \rightarrow \min$
	6.2. Поточні витрати		
	C	$C_{TOS}$	$C_{TOS} \rightarrow \min$
		$C_{TOP}$	$C_{TOP} \rightarrow \min$
$C_{PodP}$		$C_{PodP} \rightarrow \min$	
7. Пропускна здатність СМ			
$PSp(N)$	$PSp(N)$	$PSp(N) \rightarrow \max$	

Для синтезу надлишкової структури СМ не використовуються критерії ефективності виконання цільових завдань оператором, оскільки дана категорія критеріїв є динамічною й залежить від часу їх функціонування в системі. Ергатичність СМ для синтезу надлишкової структури враховується в категорії показників інженерно-психологічного оцінювання.

Синтез математичної моделі формування надлишкової структури СМ для ситуаційного управління її параметрами реалізується як розв'язок оптимізаційної задачі методом зведення вектора частинних критеріїв до інтегрального. Агрегація частинних критеріїв здійснюється ієрархічно (за принципом вкладеності) у межах виділених груп. За базовий критерій агрегації прийнято згортку за нелінійною схемою компромісів, яка для дискретної форми опису частинних критеріїв має такий вигляд [10]:

$$Y(y_0) = \sum_{l=1}^b \gamma_{0l} (1 - y_{0l})^{-1} \rightarrow \min, \quad \gamma_{0l} = \gamma_l \left[ \sum_{l=1}^b \gamma_l \right]^{-1}, \quad (13)$$



де  $l = 1 \dots b$  – кількість включених у критерій агрегації частинних критеріїв оптимальності;  $\gamma_{0l}$  – нормований ваговий коефіцієнт;  $y_{0l}$  – нормований частинний критерій оптимальності;  $\gamma_l$  – поточне (ненормоване) значення вагового коефіцієнта.

Використання дискретної форми згортки (13) трансформує оптимізаційну задачу векторного критерію до виду багатокритерійного вибору, що вимагає формування досить великого переліку дискретних значень, які описують зміну частинних критеріїв оптимальності. Дана обставина ускладнює використання дискретних форм у задачах великої розмірності, що характерно для структурно-параметричного синтезу складних розподілених СМ. Відповідно, можливе використання аналогових форм агрегації частинних критеріїв, що для згортки за нелінійною схемою компромісів реалізується згідно з виразом [10]

$$\chi^* = \underset{\chi \in G}{\operatorname{argmin}} \sum_{l=1}^b \gamma_{l0} [1 - y_{0l}(\chi)]^{-1} = F(\chi), \quad (14)$$

де  $\chi$  – оптимізований параметр з його оптимальним значенням  $\chi^*$ ;  $G$  – область визначення частинних критеріїв оптимальності;  $y_{0l}(\chi)$  – нормована функція  $l$ -го частинного критерію оптимальності.

Формування математичної моделі синтезу надмірної структури СМ реалізуємо шляхом агрегації переліку частинних критеріїв ієрархічно за принципом їх вкладеності відповідно до схеми (див. табл. 1). Розв'язок задачі структурно-параметричного синтезу СМ має особливість, що полягає в дискретному описі зміни всіх частинних критеріїв оптимальності, наведених у табл. 1. Такий підхід вимагає формування вичерпного переліку можливих варіантів конфігурації системи, що приведе задачу синтезу до багатокритеріального вибору шляхом реалізації значного обсягу комбінаторних операцій. Уникнути недоліків комбінаторного багатокритерійного вибору структури СМ можна шляхом формалізації задачі синтезу в аналоговій формі опису частинних критеріїв оптимальності. Так, сформовані групи частинних критеріїв (див. табл. 1) цілком обґрунтовано можуть бути розділені на аналогові й дискретні з аргументом, що характеризує альтернативу реалізації обраного для них показника. Тоді синтез для аналогових критеріїв полягає у знаходженні екстремуму функції інтегрального критерію оптимальності, а для дискретних – у багатокритерійному виборі при відомому розв'язку для аналогових частинних критеріїв.

Формування модельних функцій, що описують зміну відібраних частинних критеріїв, реалізуємо в поліноміальному вигляді як результат використання методу найменших квадратів (МНК) [11]. МНК-апроксимація застосовується до дискретного ряду, який описує зміну значень відповідного показника (технічної характеристики, числа, що характеризує функції тощо конкретного програмно-технічного елемента СМ із наявного переліку для їхнього практичного застосування в системі). Як аргумент функції частинних критеріїв  $\chi$  (змінний, він же оптимізований параметр) використовується номер конкретного елемента СМ, що має певне значенням даного показника. Для аналогової форми даний параметр приймається як безперервна ве-

личина з наступним округленням результату до цілого значення [12]. Для синтезу надлишкової структури СМ, керуючись сутністю сформованих критерійних вимог (див. табл. 1), до їхнього аналогового вигляду слід привести: технічні характеристики –  $TX(\chi)$ , показники функціональної спрямованості  $FN(\chi)$ , показники інженерно-психологічної оцінки –  $IPO(\chi)$  та економічні показники –  $S_{PR}(\chi)$ .

Формування оптимізаційних моделей шляхом агрегації частинних критеріїв вимагає розгляду конкретного прикладу, що пояснює подальші дії. Нехай розглядається деяка СМ, призначена для контролю стану екологічно небезпечного об'єкта й прилягаючої до нього території. Як ТЗМ можуть використовуватись: радіолокаційні станції (РЛС) контролю повітряного простору, засоби радіомоніторингу (РМ), системи відеоспостереження (СВС), видового моніторингу з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Як СНОІМ використовують АРМ: обробки даних від РЛС, РМ, СВС, БПЛА (АРМ1...4); керування інформаційними потоками й серверним устаткуванням; аналітичної обробки даних (АРМ5); керування СМ (АРМ6). СТО формують: системи автономного, безперебійного й стаціонарного живлення (СЖ); система життєзабезпечення персоналу (СЖЗП); транспортна база (ТБ). Компонентами СТК є: станція супутниковому зв'язку (ССЗ); системи ультракороткохвильового й короткохвильового зв'язку (УКХЗ, КХЗ); система проводового зв'язку (ПЗ); мережне обладнання (МО). Дані компоненти розмежовані ієрархічною структурою (табл. 2).

Таблиця 2. Взаємозв'язок структурних складових СМ

Категорія СМ	Категорія складної системи	Параметр у формалізованій задачі синтезу
СМ	Система	–
ТЗМ, СНОІМ, СТО, СТК	Підсистеми	$TS, SNO, STO, STK$
ТЗМ	РЛС, РМ, СВС, БПЛА	Елемент
	$RLS_{1,2...}, RM_{1,2...},$ $SVN_{1,2...}, BPLA_{1,2...}$	Варіанти реалізації елемента підсистеми СМ
СНОІМ	АРМ1...4, АРМ5, АРМ6	Елемент
	$ARM_{1...4,1,2...},$ $ARM_{5,1,2...}, ARM_{6,1,2...}$	Варіанти реалізації елемента підсистеми СМ
СТО	СП, СПО, ТБ	Елемент
	$SP_{1,2...}, SPO_{1,2...}, TB_{1,2...}$	Варіанти реалізації елемента підсистеми СМ
СТК	ССЗ, УКХЗ, КХЗ, ДЗ, МО	Елемент
	$SSS_{1,2...}, UKVS_{1,2...},$ $KVS_{1,2...}, PrS_{1,2...},$ $SOB_{1,2...}$	Варіанти реалізації елемента підсистеми СМ

З урахуванням викладеного й введених позначень формуємо аналогові математичні моделі синтезу надлишкової структури СМ. У результаті одержимо загальну модель, яка формується для кожної підсистеми (ТЗМ, СНОІМ, СТО, СТК):

$$F_m^{**}(\chi) = \gamma_{m10}^{**} (1 - TX_{m0}^{**}(\chi))^{-1} + \gamma_{m20}^{**} (1 - FN_{m0}^{**}(\chi))^{-1} + \gamma_{m30}^{**} (1 - IPO_{m0}^{**}(\chi))^{-1} + \gamma_{i40}^{TS} (1 - S_{iTS0}(\chi))^{-1},$$

$$\chi^{**} = \underset{\chi \in G}{\operatorname{argmin}} F_m^{**}(\chi), \quad (15)$$

$$IPO_{m0}^{**}(\chi) = \gamma_{m10}^{**} (1 - SR_{mPF0}^{**}(\chi))^{-1} + \gamma_{m20}^{**} (1 - SR_{mVS0}^{**}(\chi))^{-1} + \gamma_{m30}^{**} (1 - SR_{mKS0}^{**}(\chi))^{-1} + \gamma_{m30}^{**} (1 - AR_{m0}^{**}(\chi))^{-1},$$

$$IPO_m^{**}(\chi) = IPO_{m0}^{**}(\chi) [\max IPO_m^{**}(\chi)]^{-1},$$

$$\max IPO_m^{**}(\chi) = (1 - \max SR_{mPF0}^{**}(\chi))^{-1} + (1 - \max SR_{mVS0}^{**}(\chi))^{-1} + (1 - \max SR_{mKS0}^{**}(\chi))^{-1} +$$

$$+ (1 - \max AR_{m0}^{**}(\chi))^{-1},$$

$$AR_m^{**}(\chi) = \frac{N_{mSH}^{**}(\chi)}{SN_{mSH}^{**}(\chi)} + \frac{N_{mPG}^{**}(\chi)}{SN_{mPG}^{**}(\chi)} + \frac{N_{mKR}^{**}(\chi)}{SN_{mKR}^{**}(\chi)} + \frac{N_{mPK}^{**}(\chi)}{SN_{mPK}^{**}(\chi)}, \quad AR_{0m}^{**}(\chi) = \frac{AR_m^{**}(\chi)}{\max AR_m^{**}(\chi)}.$$

В отриманих виразах символом \*\* позначені індекси, що відповідають позначенню підсистем СМ (див. табл. 1). Для спрощення запису позначення вагових коефіцієнтів прийняті ідентичними для всіх підсистем СМ, хоча їх числові значення можуть бути різними. Якщо для конкретного елемента СМ його характеристика, відображується тією або іншою критерійною функцією й використовується в сформованих моделях (15), не властива (відсутня, наприклад, вартість програмного забезпечення дизельного агрегату), то її ваговий коефіцієнт приймається рівним нулю, що усуває її із процесу пошуку рішення.

Отримані моделі забезпечують визначення елемента СМ із оптимальними технічними характеристиками, функціональністю, ергономічністю й вартістю. Надалі ці моделі (15) будемо називати *параметричними*, тобто такими, що визначають параметри елементів СМ. З відібраних елементів формується структура базового технічного модуля СМ, що визначається критеріями й вимогами до функціональної стійкості системи, а по суті до розгалуженості зв'язків між надмірністю структурних елементів. Потім реалізується об'єднання розв'язків аналогових моделей з вимогами суто дискретних комбінаторних критеріїв функціональної стійкості й обмежувальних вимог вартості базового модуля СМ. Надалі тільки дискретні моделі (функціональної стійкості й вартості всього базового модуля) будемо називати *структурними*, тобто такими, що визначають структуру базового модуля СМ, а їх композиційний модельний зв'язок – *структурно-параметричними моделями*. Слід зазначити, що використовуваний в аналогових моделях економічний критерій стосується тільки характеристики елемента СМ, тому його застосування в дискретній моделі виправдане, оскільки характеризує зовсім іншу категорію.

Формування структурних оптимізаційних моделей з дискретним описом зміни частинних критеріїв реалізується з використанням дискретної згортки (13), а також мультиплікативного й адитивного агрегаційних критеріїв. У переліку критерійних

вимог дискретний опис мають групи функціональної стійкості й економічні. Для формування структурно-параметричних моделей отримані з аналогових моделей (18) розв'язки в дискретній згортці описують як дискретно змінювані лінійні процеси – нормовані константи:  $F_{m0}^{TS}(\chi_{TS}^*)$ ,  $F_{m0}^{SNO}(\chi_{SNO}^*)$ ,  $F_{m0}^{STO}(\chi_{STO}^*)$ ,  $F_{m0}^{STK}(\chi_{STK}^*)$ . Змінюваним (він же є оптимізованим) параметром для побудови структурних моделей і розв'язання задачі структурно-параметричного синтезу прийнято кількість  $i$ -х елементів у СМ –  $N$ . Припускаючи для синтезу базового модуля надлишкової структури СМ  $t = const$ , введемо позначення для опису дискретних критеріїв функціональної стійкості –  $FN_N(t, N)$ ,  $P_N(t, N)$ ,  $F_N(t, N)$ , а для вартості –  $S(N)$ .

Агрегація частинних критеріїв у дискретній формі з урахуванням розв'язків (15) здійснюється за схемою, наведеною на рис. 1. Вона реалізується з нижнього рівня декомпозиції складної СМ (від елемента) до вищого рівня: підсистема – система. При цьому враховується приналежність приватних критеріїв до груп і категорій (табл. 1). На рівні елементів з параметричних моделей формують структурні моделі шляхом доповнення перших частковими критеріями структурної функціональної стійкості. На рівні підсистеми й системи створюють структурно-параметричні моделі синтезу надлишкової структури базового модуля СМ.

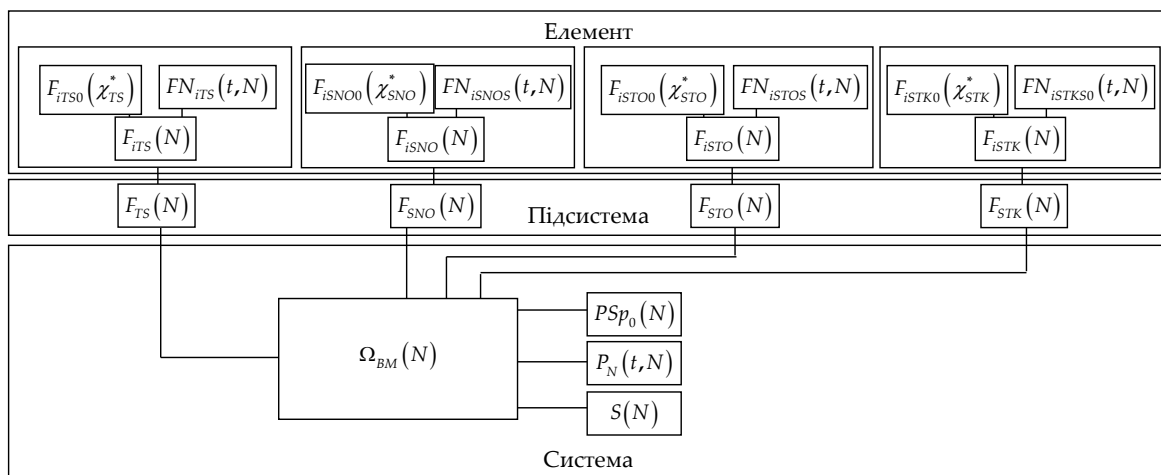


Рис. 1. Схема агрегації частинних критеріїв оптимальності

З урахуванням викладеного одержимо структурні моделі:

$$F_m^{**}(N) = \gamma_{m10}^{**} (1 - F_{m0}^{**}(\chi^{**}))^{-1} + \gamma_{m20}^{**} (1 - FN_{m0}^{**}(t, N))^{-1} \rightarrow \min, F_{m0}^{**}(N) = \frac{F_m^{**}(N)}{\max F_m^{**}(N)},$$

$$\max F_m^{**}(N) = \gamma_{m10}^{**} (1 - \max F_m^{**}(\chi^{**}))^{-1} + \gamma_{m20}^{**} (1 - \max FN_m^{**}(t, N))^{-1};$$

$$P_{mN}(t, N) = \gamma_{m10}^P (1 - P_{TS, SNO0}(t, N))^{-1} + \gamma_{m20}^P (1 - P_{TS, STO0}(t, N))^{-1} + \gamma_{m30}^P (1 - P_{TS, STK0}(t, N))^{-1} + \gamma_{m40}^P (1 - P_{SNO, STO0}(t, N))^{-1} + \gamma_{m50}^P (1 - P_{SNO, STK0}(t, N))^{-1} + \gamma_{m60}^P (1 - P_{STO, STK0}(t, N))^{-1} \rightarrow \min;$$

$$S_m(N) = \gamma_{m0}^{TS} S_{mTS} + \gamma_{m0}^{SNO} S_{mSNO} + \gamma_{m0}^{STO} S_{mSTO} + \gamma_{m0}^{STK} S_{mSTK} \rightarrow \mathbf{min}.$$

Структурно-параметричні моделі базового модуля СМ мають такий вигляд:

$$F_{TS}(N) = \sum_{i=1}^{I_{TS}} \gamma_{i0}^{TS} (1 - F_{i0}^{TS}(N))^{-1} \rightarrow \mathbf{min}, \quad F_{SNO}(N) = \sum_{i=1}^{I_{SNO}} \gamma_{i0}^{SNO} (1 - F_{i0}^{SNO}(N))^{-1} \rightarrow \mathbf{min},$$

$$F_{STO}(N) = \sum_{i=1}^{I_{STO}} \gamma_{i0}^{STO} (1 - F_{i0}^{STO}(N))^{-1} \rightarrow \mathbf{min}, \quad F_{STK}(N) = \sum_{i=1}^{I_{STK}} \gamma_{i0}^{STK} (1 - F_{i0}^{STK}(N))^{-1} \rightarrow \mathbf{min};$$

$$P_N(t, N) = \sum_{i=1}^{I_{TS}, I_{SNO}, I_{STO}, I_{STK}} \gamma_{i0}^P (1 - P_{iN0}(t, N))^{-1} \rightarrow \mathbf{min}; \quad S(N) = \sum_{i=1}^{I_{TS}, I_{SNO}, I_{STO}, I_{STK}} \gamma_{i0}^S S_i(N) \rightarrow \mathbf{min};$$

$$\Omega_{BM}(N) = \gamma_{10} (1 - F_{TS0}(N))^{-1} + \gamma_{20} (1 - F_{SNO0}(N))^{-1} + \gamma_{30} (1 - F_{STO0}(N))^{-1} + \gamma_{40} (1 - F_{STK0}(N))^{-1} + \\ + \gamma_{50} (1 - P_{N0}(t, N))^{-1} + \gamma_{60} (1 - S_0(N))^{-1} + \gamma_{70} (1 - PSp_0(N))^{-1} \rightarrow \mathbf{min}; \quad (16)$$

$$N^{opt} = \Omega_{BM}(N) = \mathbf{min}.$$

Таким чином, вираз (16) є оптимізаційною математичною моделлю синтезу надлишкової структури базового модуля СМ. Розв'язком оптимізаційної задачі є оптимальне значення змінюваного параметра, який відповідає переліку й кількості конкретних програмно-технічних елементів базового модуля СМ. Її надлишкова структура може наращуватися із сукупності базових модулів, що визначається рангом СМ (місцева (тактична), регіональна (оперативна), глобальна (стратегічна)) і рівнем (розміром) ОМ.

Відмінність запропонованого підходу від відомих полягає у спільному використанні аналогових і дискретних критеріїв. Отримана модель має низку загальнотеоретичних і прикладних переваг і особливостей:

- реалізовано відмінну від відомих підходів схему розв'язку задачі структурно-параметричного синтезу: на першому етапі визначаються елементи складної системи оптимально за параметрами існуючих топономіналів, а на другому з відібраних елементів формується кількісний склад і конфігурація структури складної системи;
- результуючий функціонал, сформований для пошуку оптимального розв'язку, дає дискретно-аналогову згортку за нелінійною схемою компромісів;
- аналоговий розв'язок оптимізаційної задачі деградує в дискретній згортці до лінійної (або постійної) залежності частинного критерію від змінюваного параметра;
- запропонований підхід забезпечує послідовне зменшення розмірності задачі структурно-параметричного синтезу складних і великих систем;
- суть і переваги аналогового й дискретного способу опису частинних критеріїв зберігаються й підсилюються з виключенням їх недоліків.

## Висновки

Для реалізації процесу структурно-параметричного синтезу системи моніторингу як складної розподіленої ергатичної інформаційно-керуючої системи запропо-

новано генеральний перелік показників і критеріїв ефективності синтезованої системи. Сформовані частинні показники й критерії можуть бути використані для аналізу й синтезу інших класів складних систем.

Для агрегації частинних критеріїв запропоновано аналогово-дискретну форму згортки за нелінійною схемою компромісів, що є розвитком її класичної схеми. Дискретно-аналогова згортка поєднує простоту розв'язку оптимізаційної задачі в дискретній формі опису частинних критеріїв, а також повноту й адекватність аналогових моделей для опису частинних критеріїв оптимальності. У результаті аналогово-дискретна згортка забезпечує послідовне зменшення розмірності оптимізаційної задачі структурно-параметричного синтезу складних і великих систем моніторингу.

### Список літератури:

1. Морозов А.О. Ситуаційні центри. Теорія і практика : збірник статей / А. О. Морозов, Г. Є. Кузьменко, В. А. Литвинов. – К. : Вид-во СП «Інтертехнодрук», 2009. – 346 с.
2. Моніторинг об'єктів в умовах апріорної невизначеності джерел інформації. Теорія та практика: монографія / Ю. Я. Бобало, Ю. Г. Даник, Л. О. Комарова та ін. – Львів: Коло, 2014. – 235 с.
3. Даник Ю. Г. Ситуативный синтез автоматизированной системы сбора и обработки информации / Ю. Г. Даник, А. А. Писарчук, С. В. Тимчук // Кибернетика и вычислительная техника. – 2015. – Вып. 181. – С. 23–34.
4. Даник Ю. Г. Математичне забезпечення автоматизованої системи збору та обробки інформації від технічних засобів моніторингу / Ю. Г. Даник, О. О. Писарчук, С. В. Тимчук // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2015. – № 2 (27). – С. 44–53.
5. Писарчук О. О. Методика багатокритеріальної оцінки ефективності процесів функціонування та використання складних інформаційних систем // Защита информации: сб. науч. трудов НАУ. – 2009. – Вып. 16. – С. 284–289.
6. Даник Ю. Г. Методика структурно-параметрического синтеза сложной эргатической распределенной информационно-управляющей системы реагирования на конфликтные ситуации / Ю. Г. Даник, А. А. Писарчук // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 2. – С. 80–101.
7. Барабаш О. В. Построение функциональноустойчивых распределенных информационных систем. – К.: Вид-во НАОУ, 2004. – 226 с.
8. Инженерная психология / Г. К. Серeda, С. П. Бочарова, Г. В. Репкина, Б. А. Смирнова. – К. : Вища школа, 1976. – 308 с.
9. Горго Ю. П. Психофізіологія (прикладні аспекти). – К. : Вид-во МАУП, 1999. – 123 с.
10. Сложные технические и эргатические системы: метод использования / А. Н. Воронин, Ю. К. Зиятдинов, А. В. Харченко, В. В. Осташевский – Харьков : Факт, 1997. – 240 с.
11. Ковбасюк С. В. Метод найменших квадратів та його практичне застосування : монографія / С. В. Ковбасюк, О. О. Писарчук, М. Ю. Ракушев. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2008. – 228 с.
12. Харченко В. П. Нелінійне та багатокритеріальне моделювання процесів у системах керування рухом : монографія / В. П. Харченко, О. О. Писарчук. – К. : Інститут обдарованої дитини, 2015. – 248 с.