

## МЕРЕЖЕВІ СТРУКТУРИ ТА СИСТЕМИ: ІІІ. ІЄРАРХІЇ ТА МЕРЕЖІ

О.Д. ПОЛІЩУК, М.С. ЯДЖАК

**Анотація.** Проаналізовано основні принципи формування системних ієрархій та складних систем з ієрархічно-мережевою структурою. Визначено потокову матрицю суміжності складної ієрархічно-мережевої системи, яка дозволяє досліджувати функціональні особливості системи, пов'язуючи їх зі складовими структурами. Уведено поняття потокової серцевини, яка дає можливість будувати спрощені моделі системи меншої розмірності, одночасно відстежуючи кількісну міру збереження її адекватності. Запропоновано принципи формування інформаційних моделей та моделей оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем з урахуванням пріоритетності їх складових та рівня наповненості даними. Основною перевагою моделей оцінювання є на порядки менші обсяги інформації, які значно легше піддаються аналізу та дозволяють оперативно локалізувати найбільш ризиковані складові системи. Для дослідження різномірних міжсистемних взаємодій введено поняття асоціації, конгломерату і системного середовища, які дають змогу аналізувати характер та наслідки міжсистемних впливів різних типів.

**Ключові слова:** складна мережа, мережева система, потік, ієрархія, модель, оцінювання, асоціація, конгломерат, системне середовище.

### ВСТУП

У працях [1, 2] зосереджено увагу на мережевих структурах та системах. Вважається, що мережевий підхід дозволяє частково подолати проблему складності принаймні на рівні вивчення структури системи [3]. Однак не менш важливими та поширеними як під час дослідження фізичного світу, так і в людському суспільстві є ієрархічні структури [4, 5]. У соціумі ієрархія застосовується для оптимізації процесу управління та ефективної організації роботи створених людиною систем різного типу та призначення (державних, економічних, фінансових, військових тощо) [6, 7]. Ієрархізація є методом наукового пізнання, який спрощує дослідження великих складних систем [8, 9], та зручним способом структуризації знань [10], який впорядковує зберігання отриманих даних та полегшує пошук необхідної інформації (бібліотеки, архіви, файлова система в комп'ютерах тощо). Загалом ієрархічний підхід також спрямований на подолання проблеми складності [11]. Він є історично підтвердженим способом ефективного управління та наукового пізнання.

Зазвичай під час дослідження мережевих структур у них не враховується наявність певного впорядкування чи підпорядкування складових, хоча воно безумовно існує у переважній більшості мережевих систем. З іншого боку, ієрархічні структури не враховують зв'язків між складовими одного рівня ієрархії. У той же час навіть у строго ієрархічних системах, наприклад військових, є такі зв'язки. Тобто структура реальних штучних та природних

систем не вкладається у поняття «чистої» мережі або ієрархії. Ієрархічно-мережеві структури, тобто структури, кожен складову певного рівня ієрархії яких можна зобразити у вигляді підмережі нижчого рівня ієрархії або підпорядкувати їй таку підмережу, більш точно та природно відображають особливості взаємодій у складних системах [12].

У працях [1, 2] розглядалися проблеми розмірності та адекватності моделей мережевих систем. Для їх вирішення замість усієї системи пропонувалося досліджувати її поточкові серцевини. У цій роботі такий підхід використовується для зменшення розмірності моделей складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС), а також розглядаються різні види моделей систем, аналізуються їх переваги і недоліки та пропонуються способи використання цих моделей для подолання проблеми складності, що породжується величезними обсягами інформації, яка описує процес функціонування довільної СІМС.

Однією з ознак реальних складних систем є їх відкритість, тобто взаємодія з іншими системами [13]. У праці [2] розглянуто один із видів міжсистемних взаємодій, а саме системи мультиплексного типу. У таких утвореннях кожний елемент може бути складовою багатьох систем та виконувати у них різні функції. Інший вид міжсистемних взаємодій полягає у спільному функціонуванні кількох систем, склад елементів яких не перетинається. Уводимо поняття асоціації, конгломерату та системного середовища як трьох різних типів такого виду взаємодій.

**Мета роботи** — визначити принципи формування ієрархічно-мережевих структур та запропонувати ефективні підходи для аналізу процесу функціонування складних ієрархічно-мережевих систем.

## **ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВІ СТРУКТУРИ ТА СИСТЕМИ**

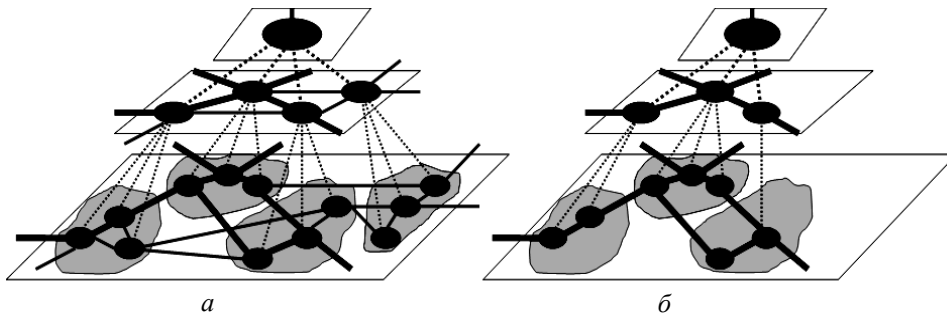
Системні ієрархії будуються різними способами. Опишемо основні принципи формування ієрархічних структур. Першим із них є принцип впорядкування, тобто розбиття цілого на складові за ознаками однорідності або різнорідності. Прикладом впорядкування за ознакою однорідності є поділ земної поверхні на країни, країн — на регіони (штати, землі, графства, округи тощо), регіонів — на населені пункти і т. ін. Прикладами впорядкування за ознакою різнорідності є тематичні бібліотечні каталоги, програми навчання учнів шкіл і студентів університетів за різними спеціальностями та предметами, поділ законодавства на кримінальне, адміністративне, трудове, міжнародне право та ін. Ієрархія, яка будується за принципом впорядкування, характеризується вкладеністю меншого в більше, тобто менше входить до складу більшого. Так, у класифікації біологічних видів (ліннеївській ієрархії) будь-який організм послідовно належить до всіх семи категорій (царства, типу, класу, ряду, родини, роду та виду). Саме тому принцип впорядкування інколи називають принципом вкладеності [10]. Особливістю моделей систем, побудованих за принципом вкладеності, є можливість незалежного дослідження окремих рівнів ієрархії. Дійсно, вивчаючи рух галактик, зовсім не обов'язково опускатися до планетарного рівня, а досліджуючи автотранспортну мережу країни — до транспортної інфраструктури окремих населених пунктів і т. ін.

Іншим принципом формування ієрархічних структур є підпорядкування. Можна виділити два види підпорядкування — пряме та впливове. Пряме підпорядкування означає підлеглисть складових нижчого ієрархічного рівня складовим вищого рівня. Воно притаманне як живій природі (зграя тварин, яка керується вожаком), так і людському соціуму (державне управління, армія, системи управління в економіці, ієрархія у релігійних конфесіях тощо). Ієрархія, яка будується за принципом прямого підпорядкування, характеризується відокремленістю нижчих рівнів від вищих. У цьому полягає принципова відмінність між прямою підпорядкованістю та впорядкованістю. Впливове підпорядкування породжує ієрархічну структуру, яка будується за ознакою впливу або авторитету (у кожному союзі незалежних країн є більш або менш впливові, що визначається рівнем їх економічного розвитку або військовою потужністю, у кожному колективі зазвичай є більш та менш авторитетні особи, що визначається рівнем їх кваліфікації, досвідом тощо). У таких структурах поведінка одних об'єктів формується під впливом інших, при цьому вони зазвичай перебувають на одному рівні ієрархії. За подібним принципом ієрархія формується у теорії складних мереж [14, 15]. Міра впливу одного вузла на інші визначається його ступенем або важливістю у мережі, міра впливу групи вузлів — їх кількістю або ступенем кластеризації. Саме тому вважається, що хаби мережевих структур явно чи неявно «управляють» іншими вузлами цих структур: у соціальних мережах вони формують громадську думку серед користувачів про конкретні соціальні явища, у промисловості та торгівлі вони є основними виробниками та розподільниками потоків продукції і товарів, які розповсюджуються мережею, у банківській системі — фінансів, у науці провідні університети є генераторами відкриттів, які поширюються науковою спільнотою та сприяють розвитку науки загалом.

Гібридні ієрархії можуть поєднувати у собі різні види впорядкованості та підпорядкованості. Кожна зграя тварин має свого вожака, але «надвожака» кількох зграй немає. Разом з тим ці зграї утворюють ареал проживання даного виду. Чим більше особин налічує зграя, тим більше шансів у неї захопити привабливі території харчування. Кожна релігійна конфесія має свою ієрархію підпорядкування, кожна компанія — свою систему управління, але спільного керівництва вони не мають. Водночас, чим більше прочан у певної конфесії на даній території, тим більший вплив цієї конфесії на населення, чим популярніша продукція компанії у регіоні, тим більші обсяги її реалізації. Під час поділу земної поверхні на країни, регіони тощо також поєднуються два види ієрархії: впорядкування — від більшого до меншого за територіальною ознакою та підпорядкування, що реалізується системами адміністративного управління територіальними одиницями. Навіть у соціальних мережах поряд з найбільш авторитетними користувачами існують контролюючі складові, які можуть заблокувати поширення певної інформації. Очевидно, що під час моделювання структури та процесу функціонування конкретної СІМС слід враховувати особливості як мережевих, так і ієрархічних взаємодій між її складовими.

Розглянемо СІМС з ієрархією прямого підпорядкування (рисунок, а). Більшість створених людиною систем такого типу призначені для організації руху певного виду потоків (транспортних, ресурсних, фінансових,

інформаційних тощо) [16]. Ці потоки зазвичай курсують у мережі нижнього рівня ієрархії СІМС. Потоки, які рухаються на вищих ієрархічних рівнях, та міжрівневі потоки (управлінські та організаційні рішення, реагування на їх виконання тощо) повинні забезпечувати ефективне функціонування системи, зокрема, оперативне реагування як на негативні, так і на позитивні зміни, аналіз та прогнозування цих змін, своєчасне попередження розвитку загрозливих тенденцій і т. ін.



Фрагмент ієрархічно-мережевої структури

Нехай  $N$  — кількість рівнів ієрархії СІМС;  $S_n$  — множина вузлів мережі  $n$ -го рівня ієрархії;  $K_n$  — їх кількість,  $n = \overline{1, N}$ . Як і у випадку мережевих та мультиплекс-систем [1, 2], процес функціонування СІМС можна описати її потоковою матрицею суміжності  $\mathbf{F} = \{\mathbf{F}^{kn}\}_{k,n=1}^N$ . Блоки  $\mathbf{F}^{nn} = \{f_{ij}^{nn}\}_{i,j=1}^{K_n}$  є потоковими матрицями суміжності системного шару  $n$ -го рівня ієрархії. Блоки  $\mathbf{F}^{n,n+1} = \{f_{ij}^{n,n+1}\}_{i=1, j=1}^{K_n, K_{n+1}}$  і  $\mathbf{F}^{n+1,n} = \{f_{ij}^{n+1,n}\}_{i=1, j=1}^{K_{n+1}, K_n}$  є потоковими матрицями суміжності міжрівневих взаємодій з  $n$ -го на  $(n+1)$ -й рівень ієрархії і навпаки. Вони відображають взаємозв'язки між керувальними складовими  $n$ -го рівня ієрархії та керуючими складовими підпорядкованих їм мережевих підсистем  $(n+1)$ -го рівня. Тобто кожний елемент цих матриць дорівнює обсягам потоків, які проходять між відповідними складовими СІМС за період  $[0, T]$  [1, 2]. Для СІМС із строгою ієрархією, для яких міжрівневі взаємодії можливі лише між сусідніми рівнями ( $n$ -м і  $(n+1)$ -м і  $(n-1)$ -м), отримуємо, що  $\mathbf{F}^{n,n+i} = \mathbf{0}$  і  $\mathbf{F}^{n+i,n} = \mathbf{0}$  для  $i > 1$ ,  $n = \overline{1, N}$  та  $n, n+i \leq N$ , тобто матриця  $\mathbf{F}$  є блоковою тридіагональною. Матриці  $\mathbf{F}^{nn}$ ,  $\mathbf{F}^{n+1,n}$  і  $\mathbf{F}^{n,n+1}$  є нормованими за максимальним значенням обсягів потоків, які рухаються між вузлами  $n$ -го рівня та вузлами  $n$ -го і  $(n+1)$ -го рівнів, тобто значення елементів матриці  $\mathbf{F}$  належать проміжку  $[0, 1]$ .

Уведемо поняття  $\lambda$ -серцевини СІМС як сукупності  $\lambda$ -серцевин її ієрархічних шарів [2], пов'язаних міжшаровими потоками, обсяги яких за період  $[0, T]$ , тобто значення елементів матриці  $\mathbf{F}$ , є не меншими за значення  $\lambda \in [0, 1]$ . Потокова матриця суміжності  $\lambda$ -серцевини СІМС  $\mathbf{F}_\lambda$  очевидним чином визначається з матриці  $\mathbf{F}$ . Зрозуміло, що  $\lambda$ -серцевини ієрархічних шарів СІМС повинні бути послідовно квазіподібними (рисунком, б), тобто вузли потокової  $\lambda$ -серцевини  $(n+1)$ -го рівня повинні підпорядковувати

тися вузлам  $\lambda$ -серцевини  $n$ -го рівня,  $n = \overline{1, N-1}$ . Інакше кажучи,  $\lambda$ -серцевина СІМС також є складною ієрархічно-мережевою системою. Розмірність моделі  $\lambda$ -серцевини залежно від значення  $\lambda$  може бути значно меншою за розмірність моделі всієї системи [2]. Адекватність цієї моделі можна кількісно визначити за допомогою параметра  $\theta_\lambda = V_\lambda / V$ , де  $V$  — сумарні обсяги потоків, які проходять СІМС;  $V_\lambda$  — сумарні обсяги потоків, які проходять її  $\lambda$ -серцевиною за період  $[0, T]$ . Значення  $V$  і  $V_\lambda$  легко визначаються з матриць  $\mathbf{F}$  і  $\mathbf{F}_\lambda$  відповідно.

### ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ

Наше уявлення про довколишній світ формується на основі наявної інформації про нього. Дані можна отримати за допомогою візуальних та спеціальних засобів спостереження, експериментальних та теоретичних досліджень тощо. За результатами International Data Corporation у 2017 р. обсяг створених людством даних становить приблизно  $5,5 \cdot 10^9$  Гбайт і до 2020 р. він перевищить  $4 \cdot 10^{10}$  Гбайт [17]. При цьому обсяг корисної інформації за різними оцінками перебуває у межах 23–35%, а обсяг даних, які вдається проаналізувати та використати — у межах 1–3% від загальної їх кількості [18]. Тобто загалом застосовується не більше ніж 13% корисної інформації, а основна проблема полягає не стільки у кількості даних, скільки у відсутності ефективних методів ідентифікації, оброблення та аналізу саме корисної інформації.

Дослідження та ефективна організація роботи реальної СІМС потребує цілісного та повного уявлення про неї. Це уявлення формується за допомогою всієї інформації про історію, поточний стан та побудований на їх основі прогноз поведінки такої системи. Базуючись на цьому, можна сформувати інформаційну модель СІМС — тотожну структурі системи динамічну структуру даних, кожна компонента якої містить інформацію про стан та процес функціонування відповідної складової системи у поточний момент, минулому та майбутньому, починаючи з найнижчого рівня ієрархії і закінчуючи системою загалом. Подамо інформаційну модель СІМС у вигляді

$$\mathbf{D}(t) = \{\mathbf{D}_{n,j,k}(t)\}_{k=1}^{K_j} \}_{j=1}^{J_n} \}_{n=1}^N,$$

де  $\mathbf{D}_{n,j,k}(t) = \{\mathbf{S}_{n,j,k}(t), \mathbf{F}_{n,j,k}(t), \mathbf{I}_{n,j,k}(t)\}$  — інформаційна модель окремої складової  $n$ -го ієрархічного рівня СІМС;  $\mathbf{S}_{n,j,k}(t) = \{s_{n,j,k,m}(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^S}$  — інформація про стан складової як елемента структури;  $\mathbf{F}_{n,j,k}(t) = \{f_{n,j,k,m}(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^F}$  — інформація про процес функціонування складової як елемента системи;  $\mathbf{I}_{n,j,k}(t) = \{i_{n,j,k,m}(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^I}$  — інформація про взаємодію складової з іншими об'єктами СІМС та навколишнім середови-

щем;  $M_{n,j,k}^S, M_{n,j,k}^F, M_{n,j,k}^I$  — кількість одиниць інформації, наприклад, файлів, у відповідній складовій інформаційної моделі СІМС;  $t \in [0, T]$ ,  $t_c \in [0, T]$  — поточний момент часу,  $t \in [0, t_c[$  — передісторія,  $t \in ]t_c, T]$  — період достовірного прогнозу;  $j$  — номер підмережі на  $n$ -му рівні (номер складової ( $n-1$ )-го рівня, який визначається через номер підмережі та номер складової у ній);  $k$  — номер складової  $j$ -ї підмережі  $n$ -го рівня.

Основна мета створення інформаційної моделі — спрямованість на відповідні рівні управління СІМС для спрощення процесу прийняття рішень щодо подальших дій стосовно підпорядкованих їм складових системи. Звідси впливають природні вимоги до змісту, форми подання, якості та обсягу даних, якими заповнюється інформаційна модель: об'єктивність, актуальність, зрозумілість, достовірність, мінімальна достатність, повнота тощо [19]. Дослідження, проведені у 2014 р., показали, що кількість англomовних наукових праць, доступних через Google Scholar, перевищує 100 млн [20]. У той же час на запит complex network цей пошуковик видає понад 5 млн результатів. Навіть попри популярність тематики складних мереж, навряд чи кількість наукових праць, присвячених саме їй, сягає 5%. Значно ймовірніше, що це є свідченням наявності у результатах пошуку великої кількості дубльованої та малої кількості важливої інформації. Однак перевірити це, урахувавши кількість отриманих даних, майже неможливо. Інший висновок, який можна зробити, полягає в тому, що значна частина потенційно корисної інформації залишається поза увагою. Подібна ситуація стосується інформаційного опису процесу функціонування багатьох реальних СІМС [21]. Звідси основне завдання, яке постає під час формування інформаційної моделі системи, — це відсіювання дубльованих, неважливих і недостовірних даних та структуризація і зберігання лише корисної інформації. Під структуризацією у цьому разі слід розуміти впорядкування інформації за ознакою її належності до опису конкретної складової СІМС з метою спрощення подальшого пошуку та аналізу (при цьому самі дані можуть бути як структурованими, так і неструктурованими).

Для визначення порядку заповнення та рівня наповненості інформаційної моделі необхідними даними доцільно вводити певні об'єктивні кількісні показники. Порядок заповнення інформацією про складові системи, їх дослідження та моделювання визначатимемо структурою пріоритетності

$$\mathbf{R}(t) = \{\mathbf{R}_{n,j,k}(t)\}_{k=1}^{K_j} \}_{j=1}^{J_n} \}_{n=1}^N,$$

де  $\mathbf{R}_{n,j,k}(t) = \{\mathbf{R}_{n,j,k}^S(t), \mathbf{R}_{n,j,k}^F(t), \mathbf{R}_{n,j,k}^I(t)\}$  — показники пріоритетності

окремої складової  $n$ -го ієрархічного рівня СІМС;  $\mathbf{R}_{n,j,k}^S(t) = \{\rho_{n,j,k,m}^S(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^S}$  — показники, які визначають пріоритетність стану елементів складової;

$\mathbf{R}_{n,j,k}^F(t) = \{\rho_{n,j,k,m}^F(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^F}$  — показники, які визначають пріоритетність

функцій, які реалізуються складовою;  $\mathbf{R}_{n,j,k}^I(t) = \{\rho_{n,j,k,m}^I(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^I}$  — показники, які визначають пріоритетність взаємодій складової з іншими об'єктами СІМС та наколишнім середовищем,  $k = \overline{1, K_j}$ ,  $j = \overline{1, J_n}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,

$t \in [0, T]$ . Зазвичай, чим більші обсяги потоків проходять через окрему складову (вузол або ребро) СІМС, тим вищою є її пріоритетність у системі. Тому кількісну міру пріоритетності цієї складової доцільно обчислювати, використовуючи значення елементів потокової матриці суміжності СІМС  $\mathbf{F}$ . Саме дані про найбільш пріоритетні об'єкти системи мають насамперед вноситься в інформаційну модель і підлягати першочерговому дослідженню. Потоківі характеристики вузлів і ребер мережевих рівнів СІМС дають можливість достатньо обґрунтовано визначати та динамічно змінювати їх пріоритетність у системі зі зміною режиму її функціонування. Пріоритетність складових підмережі певного рівня ієрархії є їх локальною характеристикою і не визначає пріоритетність складової вищого рівня ієрархії, якій вони підпорядковані. Тобто складова може бути високопріоритетною у підмережі, але сама підмережа може бути низькопріоритетною серед інших підмереж даного рівня ієрархії. З іншого боку, пріоритетність складової часто визначає пріоритетність підпорядкованих їй елементів. Дійсно, на міжнародних залізничних лініях неважливо через збої у роботі якої станції (великої чи малої) припиниться рух потягів. При цьому пріоритетність малої станції на міжнародній лінії може бути вищою, ніж великої на регіональній.

Для визначення повноти інформаційної моделі СІМС доцільно вводити структуру даних наповненості

$$\mathbf{C}(t) = \{\mathbf{C}_{n,j,k}(t)\}_{k=1}^{K_j} \}_{j=1}^{J_n} \}_{n=1}^N,$$

де  $\mathbf{C}_{n,j,k}(t) = \{\mathbf{C}_{n,j,k}^S(t), \mathbf{C}_{n,j,k}^F(t), \mathbf{C}_{n,j,k}^I(t)\}$  — показники, які визначають наповненість даними про окрему складову  $n$ -го ієрархічного рівня СІМС;

$\mathbf{C}_{n,j,k}^S(t) = \{c_{n,j,k,m}^S(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^S}$  — показники, які визначають наповненість даними про стан елементів складової;

$\mathbf{C}_{n,j,k}^F(t) = \{c_{n,j,k,m}^F(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^F}$  — показники, які визначають наповненість даними про процес функціонування складової;

$\mathbf{C}_{n,j,k}^I(t) = \{c_{n,j,k,m}^I(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^I}$  — показники, які визначають наповненість даними про взаємодію складової з іншими об'єктами СІМС та навколишнім середовищем;  $k = \overline{1, K_j}$ ,  $j = \overline{1, J_n}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $t \in [0, T]$ . Основним критерієм наповненості даними про окрему складову є можливість прийняття на їх основі своєчасного правильного рішення щодо подальших дій відносно цієї складової, тобто одиницею вимірювання показників наповненості даними є відсотки, а значення ці показники набувають на відрізьку  $[0, 100]$ .

Структури  $\mathbf{R}(t)$  і  $\mathbf{C}(t)$ ,  $t \in [0, T]$  дають змогу кількісно визначати рівень наповнення інформаційної моделі необхідними даними з урахуванням пріоритетності складових СІМС. Так параметр

$$\begin{aligned} \omega_{n,j,k}(t) &= \sum_{m=1}^{M_{n,j,k}^S} \rho_{n,j,k,m}^S(t) c_{n,j,k,m}^S(t) / \sum_{m=1}^{M_{n,j,k}^S} \rho_{n,j,k,m}^S(t) + \\ &+ \sum_{m=1}^{M_{n,j,k}^F} \rho_{n,j,k,m}^F(t) c_{n,j,k,m}^F(t) / \sum_{m=1}^{M_{n,j,k}^F} \rho_{n,j,k,m}^F(t) + \\ &+ \sum_{m=1}^{M_{n,j,k}^I} \rho_{n,j,k,m}^I(t) c_{n,j,k,m}^I(t) / \sum_{m=1}^{M_{n,j,k}^I} \rho_{n,j,k,m}^I(t) \end{aligned}$$

визначає рівень наповненості даними про окрему складову, а параметр

$$W(t) = \sum_{n=1}^N \left( \sum_{j=1}^{J_n} \left( \sum_{k=1}^{K_j} \omega_{n,j,k}(t) / K_j \right) / J_n \right) / N$$

задає кількісну міру наповненості даними інформаційної моделі СІМС з урахуванням пріоритетності її складових у системі.

Навіть, дотримуючись описаних вище принципів формування, інформаційні моделі можуть містити неповні дані надзвичайно великих обсягів, які нереально опрацювати вручну за прийнятні проміжки часу. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є формування на основі інформаційної моделі моделей оцінювання СІМС.

### МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ

Причиною збоїв або неефективного функціонування системи зазвичай є несвоєчасне або помилкове оцінювання поточного стану або неправильний прогноз її подальшого розвитку. Теорія оцінювання дозволяє визначати передумови, які можуть призвести до таких наслідків у роботі СІМС, та виявляти ті складові системи, які потребують термінового удосконалення стану або оптимізації процесу функціонування. Кожній інформаційній моделі СІМС можна поставити у відповідність модель регулярного та/або інтерактивного оцінювання системи [16]. Модель регулярного оцінювання будується на основі інформації, отриманої під час періодичних планових досліджень СІМС або зібраної протягом певного часу її функціонування, і передбачає [22, 23]:

- локальне оцінювання стану та якості функціонування елементів (вузлів та ребер) системи на нижньому рівні ієрархії СІМС;
- агреговане оцінювання складових системи на всіх рівнях ієрархії, за якого узагальнений висновок про стан та якість функціонування підпорядкованої певній складовій підмережі СІМС є визначальним для оцінювання цієї складової;
- прогностичне оцінювання стану та якості функціонування складових усіх рівнів ієрархії СІМС.

Метою регулярного оцінювання є глибокий і ретельний аналіз стану та процесу функціонування усіх складових системи. При цьому кожній із характеристик складової, які містяться в інформаційній моделі СІМС, ставиться у відповідність набір оцінок її поведінки за певним набором критеріїв та параметрів [24]. Структура агрегованих оцінок є тотожною структурі оцінюваної СІМС, а термін прогнозу не може бути меншим за потрібний для подолання потенційних загроз. Модель регулярного оцінювання можна формалізувати у вигляді динамічної структури даних

$$\mathbf{E}(t_l) = \{\mathbf{E}_{n,j,k}(t_l)\}_{k=1}^{K_j} \sum_{j=1}^{J_n} \sum_{n=1}^N,$$

де  $\mathbf{E}_{n,j,k}(t_l) = \{\mathbf{E}_{n,j,k}^S(t_l), \mathbf{E}_{n,j,k}^F(t_l), \mathbf{E}_{n,j,k}^I(t_l)\}$  — модель оцінювання окремої складової  $n$ -го ієрархічного рівня СІМС;  $\mathbf{E}_{n,j,k}^S(t_l) = \{\mathbf{e}_{n,j,k,m}^S(t_l)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^S}$  —



множина опрацьованих відповідним чином [22] характеристик стану складової як елемента структури та оцінок цього стану;  $\mathbf{E}_{n,j,k}^F(t_l) = \{\mathbf{e}_{n,j,k,m}^F(t_l)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^F}$  — множина характеристик процесу функціонування складової як елемента системи та оцінок цього процесу;  $\mathbf{E}_{n,j,k}^I(t_l) = \{\mathbf{e}_{n,j,k,m}^I(t_l)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^I}$  — множина характеристик про взаємодію складової з пов'язаними складовими системи та навколишнім середовищем і оцінок ефективності цієї взаємодії,  $k = \overline{1, K_j}$ ,  $j = \overline{1, J_n}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $t_l = \tau l$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots$ , — терміни регулярних оглядів або підсумовування результатів функціонування системи,  $t_l \in [0, T]$ . Структури  $\mathbf{C}(t)$  і  $\mathbf{R}(t)$  у моделях оцінювання визначають рівень покриття оцінками складових СІМС усіх рівнів ієрархії та пріоритетність аналізу цих оцінок відповідно. Параметри  $\omega_{n,j,k}(t_l)$ ,  $k = \overline{1, K_j}$ ,  $j = \overline{1, J_n}$ ,  $n = \overline{1, N}$ , та  $W(t_l)$ ,  $t_l \in [0, T]$ , визначають рівень покриття оцінками окремих складових системи та СІМС загалом.

Модель інтерактивного оцінювання будується на основі результатів неперервного моніторингу процесу функціонування системи і передбачає [25]:

- локальне оцінювання взаємодії потоків та елементів структури (вузлів та ребер) на нижньому рівні ієрархії СІМС;
- агреговане оцінювання взаємодії складових системи на всіх рівнях ієрархії, за якого узагальнений висновок про якість взаємодії елементів підпорядкованої певній складовій підмережі СІМС є визначальним для оцінювання цієї складової;
- прогностичне оцінювання якості взаємодії складових усіх рівнів ієрархії СІМС.

Інтерактивне оцінювання проводиться неперервно у режимі реального часу і полягає у постійному відстежуванні взаємодії мережевих та міжрівневих потоків з вузлами і ребрами СІМС. Висновки, отримані у результаті інтерактивного оцінювання, є опосередкованими, але від того не менш важливими для контролю за станом та якістю функціонування системи. Модель інтерактивного оцінювання формалізується у вигляді динамічної структури даних  $\mathbf{E}_{n,j,k}^{CM}(t) = \{\mathbf{e}_{n,j,k,m}^{CM}(t)\}_{m=1}^{M_{n,j,k}^I}$ , яка містить множину характеристик неперервної взаємодії потоків, які рухаються СІМС, з елементами її структури та оцінок цієї взаємодії,  $k = \overline{1, K_j}$ ,  $j = \overline{1, J_n}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $t \in [0, T]$ . Узагальнені висновки, отримані внаслідок інтерактивного оцінювання за період між регулярними дослідженнями системи, доцільно включати у модель регулярного оцінювання СІМС [16].

Результати оцінювання видозмінюють послідовність дослідження складових СІМС. Якщо у випадку інформаційних моделей вона визначається структурою  $\mathbf{R}(t)$ , то в моделях оцінювання ця послідовність природно починається зі складових, які отримали найгірші оцінки, а отже містять найбільші загрози для роботи принаймні пов'язаних з ними складових системи. Загалом, на відміну від інформаційних моделей, моделі оцінювання

містять лише структуровані дані. Застосування таких моделей істотно зменшує обсяги інформації, яку необхідно першочергово проаналізувати, і тим самим є дієвим засобом подолання проблеми складності.

Застосування методів теорії оцінювання не обмежується виключно пошуком незадовільно функціонуючих складових системи. Вона є дієвим інструментом для визначення взірцевих елементів, які можуть слугувати практично досяжним критерієм якості [24], пошуку оптимальних режимів функціонування системи [26] та вибору оптимальної системи із заданого класу еквівалентних систем [27]. Теорія оцінювання може успішно використовуватися для пошуку об'єктів або процесів, поведінка яких виходить за межі відомих стандартів або уявлень. Невідповідність отриманих даних відомим законам або неспроможність пояснити їх за допомогою існуючих теорій призводить до феномену, який отримав назву «виявлення новизни» (novelty detection) [28]. Так, закони ньютонівської механіки дозволили за допомогою інформації про збурення у траєкторії руху планети Уран відкрити планету Нептун. Наступні спостереження за Нептуном змусили астрономів запідозрити існування Плутона.

Часто причини збоїв у функціонуванні системи або окремих її складових лежать поза нею: зміни клімату та негативні явища у живій природі часто є наслідком впливу на них індустріального суспільства, соціальні збурення зазвичай породжуються економічними кризами, планування обсягів виробництва або продажу повинно враховувати наявність конкурентів тощо. Урахування та аналіз міжсистемних взаємодій часто дозволяє виявити ці причини та попередити їх наслідки.

### **АСОЦІАЦІЇ, КОНГЛОМЕРАТИ ТА СИСТЕМНІ СЕРЕДОВИЩА**

У праці [2] розглянуто один із видів міжсистемних взаємодій, який реалізується системами мультиплексного типу. У таких системах елементи однієї мережі одночасно можуть бути складовими багатьох мережевих систем і виконувати у них різні функції. Розглянемо кілька інших видів надсистем, множини елементів яких, на відміну від мультиплексів, не перетинаються. Такі надсистеми можуть утворюватися у результаті взаємодії окремих СІМС одного типу та призначення, для яких мета існування та способи її реалізації є тотожними. Називатимемо такі формації асоціаціями. Фінансові асоціації утворюють банківські та кредитні установи, торговельні асоціації є поєднанням різних торговельних мереж, інформаційні асоціації породжуються різними новинними агенціями, у науковому співтоваристві існує чимало асоціацій, які об'єднують науковців суміжних дисциплін тощо. Якщо область дії систем, які входять до складу асоціації, перетинаються, це може викликати певну конкурентність або навіть конфліктність їх взаємодії. Якщо конкурентність є позитивним чинником, який підвищує ефективність функціонування асоціації загалом (покращення комфортності та здешевлення перевезень у асоціації автоперевізників), то конкурентність часто призводить до знищення окремих її складових (зникнення окремих видів у живій природі). Модель асоціації повинна передбачати реальну або потенційну конфліктність її складових.

Інший спосіб взаємодії складних систем полягає у їх участі у вирішенні важливих для спільної життєдіяльності проблем. Наприклад, подолання наслідків стихійних лих, пандемій, терористичних актів, техногенних катастроф вимагає взаємодії рятувальних та пожежних служб, поліції та органів безпеки, армійських та медичних підрозділів і т. ін. Природною є взаємодія виробників певної продукції, її перевізників, торговельних мереж — реалізаторів та банківських установ, які забезпечують фінансові операції між ними. Проведення міждисциплінарних досліджень потребує співпраці вчених різних наукових спеціальностей. Подібні взаємодії між системами різного типу та призначення існують у політиці, суспільному житті та природі. Людське тіло складається з багатьох різнотипних систем (серцево-судинної, лімфатичної, нервової, опорно-рухової, дихання, травлення тощо). Узгоджене спільне функціонування та взаємодія цих систем власне і утворює живий організм. Надсистеми, які утворюються унаслідок взаємодії кількох різнотипних систем для реалізації певної спільної мети, називатимемо конгломератами. Складові конгломератів зазвичай не конфліктують, адже під час подолання наслідків стихійних лих медикам немає сенсу «конкурувати» з поліцією, а поліції — з вогнеборцями тощо. Очевидно, що асоціації та конгломерати відіграють не менш важливу роль, ніж мультиплекси.

Складові конгломерату можуть бути поєднанням кількох асоціацій. Смысл, який вкладається у поняття типу системи, означає розглядати певне утворення як асоціацію або конгломерат. Якщо ідеться про економіку країни загалом, то поєднання всіх транспортних систем можна розглядати як асоціацію, оскільки у цьому випадку однотипність визначається метою функціонування таких систем, яка полягає у перевезенні пасажирів та вантажів. У той же час, транспортна система країни є конгломератом транспортних систем різних типів (залізничної, автомобільної, авіаційної тощо). Асоціації у такому конгломераті утворюють транспортні компанії, які забезпечують перевезення одного типу, наприклад, автомобільні пасажирські або вантажні. Також інколи виникає потреба розглядати певне утворення як мультиплекс чи конгломерат. Загалом це залежить від мети дослідження. Мережа населених пунктів та шляхів між ними є основою для організації руху потоків різних типів. Із цього погляду її можна розглядати як мультиплекс, кожний шар якого забезпечує рух потоків певного типу і кожний вузол такого мультиплексу може підтримувати рух від одного до всіх можливих типів потоків. Однак взаємодія транспортних систем різних типів з метою транспортування пасажирів та/або вантажів можна розглядати як конгломерат. Отже, залежно від мети дослідження транспортну систему країни можна розглядати як мультиплекс, конгломерат або асоціацію в межах більшого, наприклад, промислового конгломерату.

Існують і більш складні надсистемні утворення, які називатимемо системними середовищами. Системне середовище означає спільне функціонування кількох різнотипних систем, кожна з яких має власну мету існування, однак спільної мети їх взаємодії немає. При цьому цілі існування окремих систем середовища можуть бути антагоністичними. Прикладом є біосфера Землі або її клімат та створене людством індустріальне суспільство. Поєднання таких систем-антагоністів є найскладнішим об'єктом дослідження,

однак воно потрібне, оскільки неможливо прогнозувати розвиток біосфери або зміни клімату без вивчення впливу на них індустріального суспільства. Належність досліджуваної системи до одного з описаних вище надсистемних утворень визначає характер її міжсистемних взаємодій (співпраця, конкурентність, конфліктність, антагоністичність), що безумовно повинно впливати на вид моделі системи, зокрема її реагування на зовнішні впливи.

## **ВИСНОВКИ**

У роботі проаналізовано принципи формування системних ієрархій та складних систем з ієрархічно-мережевою структурою. Визначено потокову матрицю суміжності СІМС, яка дозволяє досліджувати функціональні особливості системи, пов'язуючи їх зі складовими структурами. Уведено поняття потокової серцевини СІМС, яка дає змогу будувати спрощені моделі системи меншої розмірності, одночасно відстежуючи кількісну міру збереження її адекватності. Запропоновано принципи формування інформаційних моделей та моделей оцінювання СІМС і проаналізовано їх переваги та недоліки. Основною вадою інформаційних моделей є величезні обсяги даних, які часто не піддаються оперативному аналізу, не дозволяють формувати своєчасні прогнози та виробляти правильні рішення. Моделі оцінювання у цьому розумінні є значно гнучкішими та динамічнішими, оскільки вони є водночас відображенням інформаційних моделей у чітко структуровану сукупність оцінок стану та якості функціонування, починаючи зі складових системи найнижчого рівня ієрархії і закінчуючи системою загалом. Основною перевагою моделей оцінювання є на порядки менші обсяги інформації, які значно легше піддаються аналізу та дозволяють оперативно локалізувати найбільш загрозливі складові системи. Тотожність структур СІМС, її інформаційної моделі та моделі оцінювання уможливує перехід від незадовільної оцінки складової до даних, які описують її стан та процес функціонування, аналізу цієї інформації з метою дослідження причин виявлених недоліків та усунення цих недоліків безпосередньо у складовій системі. Досліджуючи складні мережеві та ієрархічно-мережеві системи, неможливо нехтувати внутрішніми та зовнішніми впливами на них. Уведені в роботу поняття асоціації, конгломерату та системного середовища дають змогу аналізувати характер цих впливів та враховувати їх наслідки.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Поліщук О.Д.* Мережеві структури та системи: I. Потокові характеристики складних мереж / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 42–54.
2. *Поліщук О.Д.* Мережеві структури та системи: II. Серцевини мереж та мультиплексів / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 3. — С. 38–51.
3. *Barabasi A.-L.* The Architecture of Complexity / A.-L. Barabasi // IEEE Control Systems. — 2007. — Vol. 27 (4). — P. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.384127>.
4. *Pattee H.* Hierarchy Theory: The Challenge of Complex Systems / H. Pattee. — New York: George Braziller, 1973. — 389 p.

5. *Ahl V.* Hierarchy Theory: A Vision, Vocabulary, and Epistemology / V. Ahl, T. Allen. — New York: Columbia University Press, 1996. — 206 p.
6. *Rajan R.G.* Financial systems, industrial structure, and growth / R.G. Rajan, L. Zingales // *Oxford review of economic Policy*. — 2001. — Vol. 17 (4). — P. 467–482. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxrep/17.4.467>.
7. *Marsan G.A.* Towards a mathematical theory of complex socio-economical systems by functional subsystems representation / G.A. Marsan, N. Bellomo, M. Egidi // *Kinetic and Related Models*. — 2008. — Vol. 1 (2). — P. 249–278.
8. *Allen L.* Nature insight: Complex systems / L. Allen // *Nature*. — 2001. — Vol. 410 (241). DOI: <https://doi.org/10.1038/35065672>.
9. *Pavé A.* Modeling of Living Systems: From Cell to Ecosystem / A. Pavé. — New York: John Wiley & Sons, 2012. — 620 p.
10. *Pumain D.* Hierarchy in Natural and Social Sciences / D. Pumain. — Berlin: Springer Science & Business Media, 2005. — 246 p.
11. *Simon H.* The architecture of complexity: Hierarchic systems / H. Simon // *Proceedings of the American Philosophical Society*. — 1962. — Vol. 106. — P. 467–482.
12. *Polishchuk D.* Complex Evaluation of Hierarchically-Network Systems / D. Polishchuk, O. Polishchuk, M. Yadzhak // *Automatic Control and Information Sciences*. — 2014. — Vol. 2 (2). — P. 32–44. DOI: <https://doi.org/10.12691/acis-2-2-1>.
13. *Scott W.R.* Organizations and organizing: Rational, natural and open systems perspectives / W.R. Scott, G.F. Davis. — London: Routledge, 2015. — 464 p.
14. *Fontoura Costa da L.* The hierarchical backbone of complex networks / L. da Fontoura Costa // *Physical review letters*. — 2004. — Vol. 93 (9). — 098702. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.098702>.
15. *Ravasz E.* Hierarchical organization in complex networks / E. Ravasz, A.-L. Barabási // *Physical Review E*. — 2003. — Vol. 67 (2). — 026112. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.026112>.
16. *Поліщук Д.О.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: I. Опис методики / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 1. — С. 21–31.
17. *Schwenk H.* Teradata Universe: Regaining Focus / H. Schwenk. — 2017. — 5 p. — Available at: <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=EMEA42717517>.
18. *Hilbert M.* How much information is there in the “information society”? / M. Hilbert // *Significance*. — 2012. — Vol. 9 (4). — P. 8–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1740-9713.2012.00584.x>.
19. *Chessell M.* Common Information Models for an Open, Analytical, and Agile World / M. Chessell, G. Sivakumar, D. Wolfson et al. — New York: IBM Press, 2015. — 240 p.
20. *Khabsa M.* The Number of Scholarly Documents on the Public Web / M. Khabsa, C.L. Giles // *PLoS ONE*. — 2014. — Vol. 9 (5). — e93949. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093949>.
21. *Bawden D.* The dark side of information: overload, anxiety and other paradoxes and pathologies / D. Bawden, L. Robinson // *Journal of information science*. — 2008. — Vol. 35 (2). — P. 180–191. DOI: <https://doi.org/10.1177/0165551508095781>.
22. *Поліщук Д.О.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: II. Локальне та прогностичне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 2. — С. 26–38.
23. *Поліщук Д.О.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: III. Агреговане оцінювання / Д.О. Поліщук,

- О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 4. — С. 20–31.
24. *Polishchuk D.* About Evaluation of Complex Dynamical Systems / D. Polishchuk, O. Polishchuk // Journal of Complex Systems. — 2013. — Vol. 2013, Article ID 204304. — 6 p. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/204304>.
25. *Поліщук Д.О.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: IV. Інтерактивне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2016. — № 1. — С. 7–16.
26. *Поліщук О.Д.* Вибір оптимальних режимів функціонування складних динамічних систем / О.Д. Поліщук // Мат. методи і фіз.-мех. поля. — 2005. — Вип. 48 (3). — С. 62–67.
27. *Поліщук О.Д.* Про вибір оптимальної динамічної системи з класу еквівалентних систем / О.Д. Поліщук // Відбір і обробка інформації. — 2004. — Вип. 20 (96). — С. 23–28.
28. *Markou M.* Novelty detection: a review – part 1: Statistical approaches / M. Markou, S. Singh // Signal Processing. — 2003. — Vol. 83 (12). — P. 2481–2497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2003.07.018/>.

Надійшла 08.02.2018