

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ САМООРГАНІЗАЦІЇ ДО РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНОЇ КОНВЕРГЕНТНОЇ МЕРЕЖІ

В статті розглянуто застосування основних методів самоорганізації для рішення комплексу задач, які дають змогу здійснювати системний аналіз та ідентифікацію складних об'єктів, сприяють отриманню точних довгострокових прогнозів щодо розвитку тих параметрів конвергентної мережі, що відповідають необхідному спектру послуг. Представлено строго обґрунтовану методіку математичного моделювання відповідних мережних процесів на базі динамічних систем.

**Ключові слова:** методи самоорганізації, конвергентна мережа, складний об'єкт, нефізичні прогнозуючі моделі, довгостроковий прогноз

### Вступ і постановка задачі

Одна із стратегічних галузей для будь-якої країни - галузь телекомунікацій - відіграє надзвичайну роль у збалансованому розвитку глобальної та регіональної економіки. Розвиток телекомунікацій як важлива складова інформатизації суспільства та забезпечення населення високоякісними послугами зв'язку є одним з найважливіших напрямів національного та економічного розвитку будь-якої держави, і, зокрема, України. Неймовірно збільшені потоки інформації - телефонні розмови, факсимільна інформація, електронна пошта, масиви даних та телебачення - показують, якою мірою світ стає ще більш залежним від засобів телекомунікацій, які змінюють бізнес, стиль життя, суспільство в цілому. Комунікаційні послуги стирають кордони між культурами, мовами та часом. Новий етап у розвитку українських телекомунікацій – це етап повноправного входження нашої країни до світової інформаційної спільноти.

Для світового телекомунікаційного ринку характерні процеси інтеграції та глобалізації. З точки зору українських телекомунікаційних систем - період до їх функціонування в телекомунікаційному середовищі, створення якого є одним з найважливіших національних завдань.

Безумовно, для успіху стратегії прискореного розвитку телекомунікацій в Україні в числі технічних заходів по її реалізації повинно бути використання можливостей найсучасніших технологій мікро- та оптоелектроніки, автоматизованих ліній проектування та масового виготовлення апаратних і програмних засобів телекомунікацій. Розвиток телекомунікаційних систем може слугувати не тільки інструментом кількісних оцінок різноманітних стратегій та інновацій у телекомунікаціях, а й слугувати каталізатором ґрунтовних задач цілеспрямованого прискореного розвитку українських телекомунікацій.

Сучасні конвергентні мережі (СКМ) є надскладною інфраструктурою, тому необхідно розвивати загальну теорію оптимальних систем управління, розробляти нові принципи побудови пристроїв для оптимального управління, методи побудови мереж, систем, що мають здатність до самоприспосовування, самонавчання та самоорганізації. Серед сучасних напрямків розвитку науки та техніки особливе значення мають інноваційні технології, які окреслюють напрями науково-технічного прогресу.

Особливий інтерес для розрахунку параметрів мережі і прогнозування зміни параметрів представляють самоорганізуючі моделі складних об'єктів. При дослідженні СКМ доцільно звернутися до *методів самоорганізації*, які дають змогу здійснювати системний аналіз та ідентифікацію складних об'єктів, сприяючи отриманню точних довгострокових прогнозів щодо розвитку тих параметрів СКМ, які відповідають необхідному спектру послуг. Застосування методів самоорганізації для синтезу алгоритмів оптимального прийому сигналів різних видів дозволить використовувати наявні потужності національної мережі.

В статті представлено дослідження механізмів самоорганізації та самоідентифікації СКМ, визначено особливості самоорганізуючих систем, доцільність застосування

нефізичних моделей за допомогою аналогії з каналом зв'язку і запропоновано строго обґрунтовану методику математичного моделювання відповідних мережних процесів на базі динамічних систем із забезпеченням потрібних параметрів і показників якості функціонування зазначених мереж.

### **Виклад основного матеріалу** **Особливості самоорганізуючих систем**

Однією з основних особливостей самоорганізуючих систем є здатність протистояти тенденціям випадкових змін параметрів каналів зв'язку, здатність адаптуватися до умов, що змінюються, самостійно реалізовувати процеси (тобто без направляючого впливу ззовні), які забезпечують її функціонування і розвиток, перетворюючи при необхідності свою структуру. Існує два підходи до самоорганізації: «кібернетичний» підхід, при якому система організується під дією управляючого органу; синергетичний – властивість системи безупинно відтворювати сутність (матеріальну, інформаційну та синергетичну), тобто система сама, за допомогою сукупності деяких управляючих параметрів "запускає" процес самоорганізації, система сама без управляючого органу вибирає шлях свого розвитку до більш високої організації, протидіючи процесу ентропійного саморуйнування.

Прогнозування та моделювання все більш широко застосовується у світовій практиці управління та прийняття рішень майже у всіх сферах діяльності. У процесі вирішення проблем прогнозування та моделювання розроблено велику кількість засобів, процедур, методів, методик, методологій та способів. На їх основі створено безліч прогнозуючих та моделюючих систем.

Сучасні конвергентні мережі характеризуються різноманітністю обладнання, різноманітністю структури. Окремі компоненти розосереджені територіально. На даний час однією з актуальних задач є створення адекватних моделей, які дозволяють оцінити параметри окремих об'єктів конвергентної мережі та визначити властивості, характерні для функціонування мережі в цілому. Особливий інтерес для розрахунку параметрів мережі і прогнозування зміни параметрів представляють самоорганізуючі моделі складних об'єктів.

Модель складного об'єкту визначається як математичний опис (у вигляді рівняння або системи рівнянь), відповідний по теоретичному представленню експертів принципу його дії, або адекватному об'єкту. У простих випадках представлення експертів не розходяться, тому поняття моделі визначається таким чином. Наприклад, величину відхилення параметра контрольованого об'єкту (КО) від норми доцільно описати відомим диференціальним рівнянням другого порядку, де вхідні параметри - це команди управління, а вихідні - це вихідні величини відхилення параметрів від норми (параметри КО – це затримка передавальної інформації, ймовірність похибки, кількість управляючої інформації та ін.). У складних випадках в об'єкті можна вказати декілька закономірностей, що визначаються аналогічно за законами фізики. Систему таких закономірностей, якщо вона досить повна, також можна назвати фізичною моделлю складного об'єкту.

В інфокомунікації, зазвичай, розглядаються об'єкти моделювання. Фізична модель стійкого об'єкту також стала, тобто її функціональність має затухаючий характер. Тому самоорганізація фізичної моделі у вигляді системи диференціальних або різницевих рівнянь може мати своєю метою або ідентифікацію структури і параметрів об'єкту, або короткостроковий прогноз на 1-3 кроки дискретизації часу вперед. Для довгострокового прогнозу на 10 або більше кроків фізична модель непридатна, оскільки через недосконалість моделі помилка прогнозу з кожним кроком зростає.

Прогнозуючі моделі, які отримуємо за допомогою самоорганізації, можна представити диференціальними рівняннями звичайних або часткових похідних, або їх кінцево-різницеви аналогами. Клас рівнянь і вигляд опорних функцій у моделях вибирається відповідно до особливостей модельованого об'єкту. Наприклад, для оцінки параметрів

каналу зв'язку таких як амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики, широке застосування знаходять тригонометричні функції. Гармонійні алгоритми самоорганізуючих моделей часто виявляються найкращими серед інших алгоритмів для довгострокового прогнозу. У всіх випадках слід розрізняти моделі для короткострокового прогнозу (і ідентифікації об'єкту) та моделі для довгострокового прогнозу [3].

Відмінність моделей легко виявляється вже при перших аналізах самоорганізації моделей оптимальної складності. Виявляється, що для моделей короткострокового прогнозу вибираються:

- фізичні моделі, де (в разі відсутності процедури довизначення) деякі із змінних можуть бути замінені подібними з ними змінними;

- чинники, що швидко змінюються;

- повний інформаційний базис (вся множина чинників фізичної моделі);

- змінні з одним інтервалом усереднення (наприклад, лише середні значення).

Для моделей довгострокового прогнозу вибираються:

- нефізичні моделі, які визначаються як рівняння, що відрізняються від рівнянь математичної фізики і містять лише частину чинників;

- чинники, що викликані плинними діями;

- скорочений інформаційний базис (незначне число чинників);

- змінні з двома-трьома інтервалами усереднення змінних (наприклад, для вибору інтервалу усереднення при синхронізації багатопозиційного сигналу OFDM).

### **Обґрунтування доцільності застосування нефізичних моделей за допомогою аналогії з каналом зв'язку**

*Самоорганізація нефізичних прогнозуючих моделей.* Відповідно з постановкою завдання прогнозування змінної, що підлягає прогнозу, можна розглядати як вихідну величину деякої динамічної управляючої системи, схильної до дії випадкових завад. В результаті самоорганізації виходить математична модель динамічної системи, що дозволяє перетворити вхідний вектор  $u(t)$  у вихідний вектор  $y(t)$ . Залежно від апріорної інформації про досліджувану систему можуть бути отримані моделі статичних систем, динамічних систем із зосередженими і розподіленими параметрами.

Основні положення теорії самоорганізації нефізичних прогнозуючих моделей пов'язані з основними положеннями загальної теорії зв'язку. Згідно теореми Шеннона для каналів зв'язку за наявності завад: при збільшенні завад слід зменшувати смугу пропускання приймача, так і в моделюванні для досягнення найбільшої точності необхідно спрощувати структуру моделі [1, 3]. Фізична модель є оптимальною лише за відсутності завад і при повному інформаційному базисі.

Відповідно до теорії інформації, коли підвищення завадостійкості приводить до зменшення пропускну спроможності, підвищення рівня шумів приводить до зменшення пропускну спроможності, зменшення числа рівнянь і спрощення структури прогнозуючої моделі, отримуваної в результаті самоорганізації. Алгоритми самоорганізації при певному виборі їх структури і виду критеріїв володіють високою завадостійкістю: завади можуть у декілька разів перевищувати корисний сигнал, лише трохи міняючи результат. Пояснюється це тим, що розміри області моделювання (тобто число рівнянь моделі) та складність моделі (кількість складових в кожному рівнянні) при самоорганізації і вибираються в процесі перебору варіантів: за допомогою спеціальних програм вибираємо фізичну модель лише в тому випадку, якщо вона дійсно призводить до досягнення мінімуму ансамблю або ієрархії заданих критеріїв [4]. Тобто для довгострокового прогнозу потрібні саме нефізичні моделі. Нефізичні моделі з неповним інформаційним базисом або із зайвими (по фізичних характеристикам процесу) змінними дають достатню точність.

### Метод структурної самоідентифікації

Конвергентні мережі характеризуються розмаїттям структури, протоколів, алгоритмів і видів моделей, уможливаючи надання широкого спектра послуг із потрібною якістю та прийнятною вартістю. Важливим завданням є оптимізація параметрів СКМ і, отже, визначення найкращих параметрів за вибраним вектором критеріїв. При дослідженні СКМ є сенс використовувати *методи самоорганізації*, які дають змогу здійснювати системний аналіз та ідентифікацію складних об'єктів, сприяючи отриманню точних довгострокових прогнозів щодо розвитку тих параметрів СКМ, які відповідають необхідному спектру послуг. Сучасна конвергентна мережа характерна тим, що її структура задалегідь невідома. Синтез мережі проведемо за методом структурної самоідентифікації. [2].

Зазвичай, коли йдеться про самоорганізацію алгебраїчної моделі інфокомунікаційної мережі, структура останньої вважається заданою априорі, а саме: припустимо, що вона має лише одну вихідну величину, причому змінна стану  $x_k$  і є цією вихідною величиною, виду  $y = x_k$ , тоді як решта спостережуваних величин є вхідними стосовно величини  $y$ . Наприклад, існує таблиця даних, що містить  $p$  змінних стану  $x_1, x_2, \dots, x_p$ , в якій зазначено вхідні величини  $u_j, j=1, \dots, m$ . Структуру мережі потрібно визначити. Повний поліном моделі без урахування динаміки мережі набирає вигляду

$$\underline{y} = A_0 + A_1 \underline{x} + A_2 \underline{u}, \quad (1)$$

де  $A_0, A_1, A_2$  – деякі числові сталі;  $\underline{y} = (y_1, y_2, \dots, y_r)$ ;  $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ ;  $\underline{u} = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ .

При цьому вектор  $\underline{y}$  утворюється зі складових вектора стану, тобто

$$\underline{y} = S \underline{x}, \quad (2)$$

де  $S = \{S_{ij}\}, i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, p$ ;

$$S_{ij} \begin{cases} 0, & \sum_j S_{ij} = 1, \\ 1. \end{cases}$$

Система лінійних рівнянь відображає взаємодію між досліджуваними змінними, тобто структуру досліджуваної мережі. Завдання самоорганізації полягає в одночасному визначенні структури моделі мережі (матриці  $S$ ) та її параметрів.

Згідно з цим синтез моделі складається з трьох етапів.

1. Визначення структури (необхідно вибрати оптимальну кількість алгебраїчних рівнянь щодо реалізації вхідних змінних і змінних стану, які в загальному випадку зашумлені).

2. Оцінювання параметрів (для вибраної системи рівнянь слід визначити вхідні змінні стану, які належать рівнянню мережі, і оцінити коефіцієнти кожного рівняння).

3. Адаптування параметрів (якщо є змога, то для одержаної моделі мережі значення параметрів, знайдені на етапі їх оцінювання, уточнюються за допомогою відповідних методів адаптації).

### Самоорганізація динамічних моделей із зосередженими параметрами Моделі об'єктів динамічних систем

Аналізуючи більшість відомих методів, дослідження передбачають використання статичних моделей, коли йдеться про визначення параметрів мережі в певні моменти часу. Очевидно, для сучасної конвергентної мережі ці моделі неефективні, оскільки доводиться досліджувати моделі об'єктів динамічних систем [3].

Для динамічних систем характерним є те, що вихідні величини, які становлять інтерес для дослідження, не можна однозначно визначити за реалізаціями вхідних величин, як це відбувається у статичних системах. Для динамічної системи необхідно додатково зазначити стан, в якому вона перебуває в даний момент. А оскільки поточний стан динамічної системи в загальному випадку визначається чинниками її попереднього стану, то постає потреба включити в моделювання значення вхідних і вихідних величин у момент часу  $t$  та значення реалізацій у попередні моменти  $t-1, t-2, \dots, t-g$ , зазвичай використовують шаблони (рис. 1). Вони представляють собою геометричні фігури (у разі зосередження параметрів – лінії та прямі кути), де символічно зазначено, які саме реалізації, спостережувані в минулі моменти часу  $t-k, k=1, \dots, g$ , безпосередньо впливають на вхідні величини в момент часу  $t$  (рис. 1,  $a$ ). При цьому для обчислення однієї точки вихідної величини знадобиться  $g+1$  точка або стільки ж стовпців таблиці спостережень, а для оцінювання параметрів тобто значення аргументів затримки:

$$y_t^M = f(y_{t-1}, \dots, y_{t-g}, u_t, u_{t-1}, \dots, u_{t-g}), \tag{3}$$

Зрештою утворюються моделі, що відображають співвідношення вхід-вихід згідно з функціональним рядом Вольтера та описують стан досліджуваної мережі за допомогою систем диференціальних чи різницевих рівнянь[2]. Для графічного унаочнення затримки при самоорганізації лишиться  $T-t$  точок. Розглянемо лінійне диференціальне рівняння

$$d^2y/dt^2 + a_1 dy/dt + a_0 y = f(t). \tag{4}$$

Усі спостереження відбуваються в одній і тій самій точці простору та різняться лише часовим параметром  $t$ . Тому такі моделі вважаються ще моделями із зосередженими параметрами. З огляду на те, що спостереження здійснюються дискретно, потрібна дискретна модель, яка в найпростішому випадку за допомогою різниць

$$\Delta y = y_t - y_{t-1} \quad \Delta(\Delta y_t) = (y_t - y_{t-1}) - (y_{t-1} - y_{t-2}) = y_t - 2y_{t-1} + y_{t-2} \tag{5}$$

одержимо у вигляді

$$(y_0 - 2y_{-1} + y_{-2}) + a_1(y_0 - y_{-1}) + a_0 y_0 = f_1(t_0), \tag{6}$$

(для спрощення параметр опущено).

Простий шаблон, який унаочнює вплив аргументів  $y_{-1}$  та  $y_{-2}$  на вихідну величину, набирає вигляду (рис. 1,  $a$ )

$$y_0 = f_1(t_0) + f_2(y_{-1}, y_{-2}), \tag{7}$$

(Приймаємо значення  $g = 2$ ).

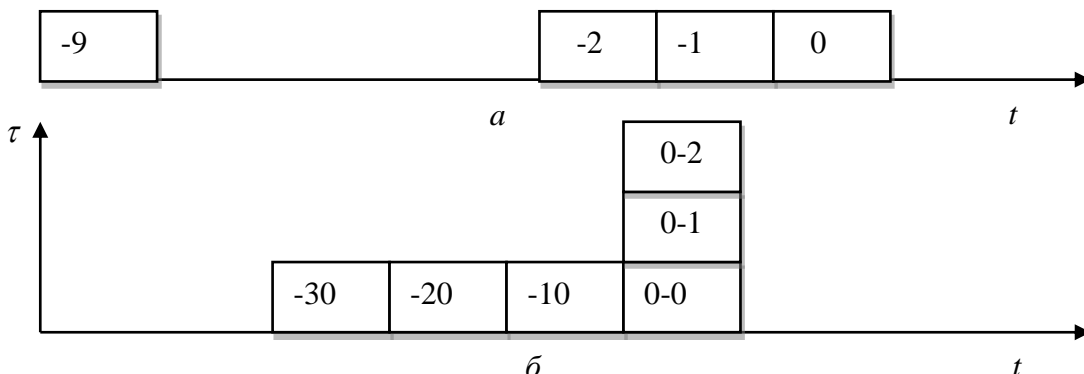


Рис.1. Одновимірний (а) і двовимірний (б) шаблони

Цей шаблон відбиває принцип близької дії, тобто визначає, які значення, виміряні в попередні моменти часу, впливають на значення вихідних величин у відповідній таблиці, необхідної для складання системи нормальних рівнянь згідно з методом найменших квадратів. Ця таблиця має містити такі стовпці:  $t_0, y_0, y_{-1}, y_{-2}$ .

Для процесу з явною циклічністю доцільно так урахувати цю особливість, аби поряд із реалізаціями  $t-1, t-2, t-g$  модель містила реалізації  $t-s\tau$ ,  $\tau = 1, 2, \dots, g$ ; де  $s$  – деяке ціле число. Зрештою маємо моделювання з двовимірним вектором  $(t, \tau)$ . Відповідні шаблони наведено на рис. 1, б. Зазначимо, що самоорганізація моделей динамічних систем принципово не відрізняється від самоорганізації статичних моделей. Єдина відмінність – очевидне скорочення наявних у нашому розпорядженні точок за рахунок кількості  $g$  запам'ятовуваних точок та використання відповідних шаблонів. Якщо ввести узагальнену змінну

$$v_r(t) = u_1(t-k), k = 0, 1, \dots, g; j = 1, \dots, m \quad (8)$$

а також узяти

$$V_{m(g+1)+1}(t) = y(t-j), j = 1, \dots, g, \quad (9)$$

то можна скористатись алгоритмом самоорганізації.

Сучасні інфокомунікації конче потребують нових методів дослідження. Запропонована методика самоорганізації моделі мережі на базі динамічних систем найбільш адекватна і дає змогу визначити основні параметри мережі з необхідною точністю.

### Висновки

На даний час однією з актуальних задач є створення адекватних моделей, які дозволяють оцінити параметри окремих об'єктів конвергентної мережі та визначити властивості, характерні для функціонування мережі в цілому.

Досліджено застосування методів самоорганізації, які дають змогу здійснювати системний аналіз та ідентифікацію складних об'єктів, дозволяють отримати точні довгострокові прогнози щодо розвитку тих параметрів сучасної конвергентної мережі, які відповідають необхідному спектру послуг.

Проаналізовано особливості самоорганізуючих моделей складних об'єктів. Визначено, що основні положення теорії самоорганізації нефізичних прогнозуючих моделей пов'язані з основними положеннями загальної теорії зв'язку. Встановлено, що для моделей короткострокового прогнозу вибираються:

- фізичні моделі, де (в разі відсутності процедури довизначення) деякі із змінних можуть бути замінені подібними з ними змінними;
- чинники, що швидко змінюються;
- повний інформаційний базис (вся множина чинників фізичної моделі);
- змінні з одним інтервалом усереднення (наприклад, лише середні значення).

Для моделей довгострокового прогнозу вибираються:

- нефізичні моделі, які визначаються як рівняння, що відрізняються від рівнянь математичної фізики і містять лише частину чинників; Нефізичні моделі з неповним інформаційним базисом або із зайвими (по фізичних характеристикам процесу) змінними дають достатню точність;

- чинники, що викликані плинними діями;

- скорочений інформаційний базис (незначне число чинників);

- змінні з двома-трьома інтервалами усереднення змінних (наприклад, для вибору інтервалу усереднення при синхронізації багатопозиційного сигналу OFDM).

Досліджено механізми самоорганізації та самоідентифікації конвергентних мереж і запропоновано строго обґрунтовану методику математичного моделювання відповідних

мережних процесів на базі динамічних систем, яка найбільш адекватна, дає змогу визначити основні параметри мережі з необхідною точністю функціонування зазначених мереж.

**Список використаних джерел:**

1. Методи оптимізації: Підручник для вищих навчальних закладів за напрямом «Телекомунікації»/ В.Б. Толубко, Л.Н. Беркман – ДУТ, 2016. – 442 с.
2. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А.Г. Ивахненко. – К.: Наук. думка, 1982. – 296 с.
3. Стеклов В.К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: підручник для ВНЗ / Стеклов В.К., Беркман Л.Н., Кільчицький Є.В. – К.: Техніка, 2004. – 576 с.
4. Стеклов В.К. Теорія електричного зв'язку: підручник / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – К.: Техніка, 2006. – 548 с.

Надійшла: 8.07.2018

Рецензент: д.т.н. Шелест М.Є.