

УДК 004.7

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.011548

Кравченко В.І., к.т.н.; Демусь А.Я.;  
Захаржевський А.Г., к.т.н.; Чумак О.І.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖ МАЙБУТНЬОГО НА БАЗІ САМООРГАНІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

**Kravchenko V.I., Demus A.Ya., Zakharzhevskiy A.H., Chumak O.I. Research on methods for predicting parameters of future networks based on self-organization of dynamic models.** Future networks (FN) are characterized by a variety of structures, protocols, algorithms and types of models, high reliability of information transmission, enabling the provision of a wide range of services with the required quality and acceptable cost. Therefore, one of the main tasks is to optimize the parameters of the FN network and, consequently, determine the best parameters for the selected vector of criteria. Of particular interest for calculating network parameters and predicting changes in parameters are self-organizing models of complex objects. The article presents methods of forecasting and modeling in networks of the future. It is determined that the main provisions of the theory of self-organization of predictive models are related to the main provisions of the general theory of communication. The mechanisms of self-organization and self-identification of networks of the future are investigated and a substantiated methodology for mathematical modeling of the corresponding network processes based on dynamic systems is proposed with the provision of certain parameters and indicators of the quality of functioning of the specified networks.

**Keywords:** networks of the future, mathematical modeling, self-organization, optimization, criteria vector, self-identification

**Кравченко В.І., Демусь А.Я., Захаржевський А.Г., Чумак О.І. Дослідження методів прогнозування параметрів мереж майбутнього на базі самоорганізації динамічних моделей.** Мережі майбутнього (FN) характеризуються розмаїттям структури, протоколів, алгоритмів і видів моделей, високою достовірністю передачі інформації, уможливаючи надання широкого спектра послуг із потрібною якістю та прийнятною вартістю. Тому одним з основних завдань є оптимізація параметрів мережі FN і, отже, визначення найкращих параметрів за вибраним вектором критеріїв. Особливий інтерес для розрахунку параметрів мережі і прогнозування зміни параметрів представляють самоорганізуючі моделі складних об'єктів. У Статті представлені методи прогнозування та моделювання в мережах майбутнього. Визначено, що основні положення теорії самоорганізації прогнозуючих моделей пов'язані з основними положеннями загальної теорії зв'язку. Досліджено механізми самоорганізації та самоідентифікації мереж майбутнього і запропоновано обґрунтовану методику математичного моделювання відповідних мережних процесів на базі динамічних систем із забезпеченням визначених параметрів і показників якості функціонування зазначених мереж.

**Ключові слова:** мережі майбутнього, математичне моделювання, самоорганізація, оптимізація, вектор критеріїв, самоідентифікація

### Вступ

У статті представлені моделі прогнозування та моделювання параметрів мереж майбутнього, які набувають дедалі ширшого спектру застосування у світовій практиці керування та прийняття рішень. У процесі вирішення проблем прогнозування та моделювання розроблено велику кількість засобів, процедур, методів, методик. На їх основі створено безліч прогнозуючих та моделюючих систем.

У наш час при проектуванні сучасних мереж майбутнього важливо приділити особливу увагу прогнозуванню та моделюванню параметрів мереж.

Самоорганізація відноситься до емпіричних методів моделювання. Ці методи в своїй сфері застосування мають деякі переваги у порівнянні з теоретичними та напівемпіричними методами побудови моделей. В тих випадках, коли ми спостерігаємо лише параметри досліджуваного об'єкту, але не знаємо структури та механізму взаємодії між елементами складної системи, поведінка якої визначає значення параметрів, підхід самоорганізації виявляється єдиним надійним засобом для побудови моделей прогнозування. За допомогою самоорганізації розв'язок можна визначити, навіть якщо іншими способами отримати

результати неможливо. Моделі, отримані за допомогою самоорганізації, мають специфічну сферу застосування і особливо ефективні для прогнозування параметрів мереж майбутнього як на короткі, так і на довгі періоди.

**Аналіз останніх досліджень.** У 1,2 представлено рекомендації Міжнародного союзу електрозв'язку по принципам створення системи управління на базі TMN. В 3-6 представлені сучасні системи зв'язку з поліпшеними показниками надійності пропускної здатності та завадозахищеності. У 7-9 представлені приклади сучасних систем управління на базі об'єктно-орієнтованого підходу. Показано застосування механізмів ситуаційного управління для підвищення ефективності та живучості функціонування інфокомунікаційних мереж. У 10-11 наведено методи підвищення завадостійкості передавання інформації на базі багатопозиційних сигналів.

**Постановка завдання.** У даній статті представлено метод Групового Врахування Аргументів (МГВА) в його нечіткій модифікації з нечіткими входами та виходом, котрий знаходить знання про об'єкт безпосередньо з вибірки даних. Це індуктивний переборний метод самоорганізації, котрий має переваги для досить складних об'єктів, що не мають визначеної теорії, зокрема для об'єктів з розмитими характеристиками. Алгоритми МГВА знаходять єдину оптимальну для кожної вибірки модель за допомогою повного перебору всіх можливих моделей-кандидатів та операції їх оцінки за зовнішнім точним чи балансным критерієм на незалежній підвибірці даних. Поставлена задача може бути вирішена за допомогою Методу Групового Врахування Аргументів (МГВА) в його нечіткій модифікації з нечіткими входами та виходом, котрий знаходить знання про об'єкт безпосередньо з вибірки даних.

**Метою роботи** є визначення методів та моделей, отриманих за допомогою самоорганізації при проектуванні мереж майбутнього.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Фізичне поле можна представити як безперервну безліч взаємодіючих часток. При цьому на дану частку поля може робити найбільший вплив стан як сусідніх (принцип ближньої дії), так і вельми видалених часток (принцип дальньої дії), або матриці вхід-вихід. Поле може бути тривимірним або плоским, двовірним або лінійним, тобто одновимірним.

Мета моделювання фізичних полів – визначити рівняння, яке б досить точний описувало стан кожної частки поля. У математичній фізиці модель поля отримують, виходячи з апріорної інформації про закони взаємодії часток, наприклад таких, як принцип нерозривності і збереження маси. Взаємодія елементів поля вказується людиною – автором моделі.

При використанні методів самоорганізації обчислювальна машина перебирає велике число рівнянь різної структури (складності) і вибирає одне з них (або систему рівнянь), яке забезпечує мінімум зовнішнього критерію на заданих дослідних даних. Критерій вказується людиною. По глибині мінімуму критерію можна визначити, чи удалося машині знайти модель чи ні.

Моделі можуть бути точковими (одновимірними) або просторовим (дво- і тривимірними). Крім того, моделі розрізняються по числу чинників, що враховуються (скалярні або векторні моделі).

Якщо модель будується за даними спостережень, в яких не вказано просторове розміщення датчиків (або контрольних станцій), то вона називається точковою. Є підстава діяти так, ніби всі дані зібрані в одній точці простору.

Модель називається просторовою, або моделлю поля, якщо у вихідних даних міститься інформація про розміщення контрольних-вимірювальних станцій в просторі. Просторові моделі вимагають наявності не менше трьох вимірювальних станцій по кожній осі. Моделі з одним аргументом називаються одновимірними, а з декількома – багатовимірними.

**Диференціальні рівняння дифузії.** Стале поле дифузії речовини в однорідному середовищі описується рівняннями закону Фіка:

одновимірне поле:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} = 0, \quad \text{або} \quad D_x \frac{\partial q}{\partial x} + q = 0;$$

двовимірне поле:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} = 0;$$

тривимірне поле:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} = 0;$$

Динамічний (перехідний) процес встановлення поля у часі описується рівняннями, що містять додатково першу похідну за часом (рівняння параболічного типу):

$$\frac{\partial q}{\partial t} + D_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} = 0,$$

або:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + D_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} &= 0; \\ \frac{\partial q}{\partial t} + D_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} &= 0. \end{aligned}$$

Якщо поле поширюється в потоці, що має швидкість руху  $U_x$ , то додається ще один член (скорочено далі записується лише рівняння одновимірної дифузії уздовж осі водотоку);

$$\frac{\partial q}{\partial t} + D_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + U_x \frac{\partial q}{\partial x} = 0.$$

Нарешті, якщо речовина є неконсервативною, а руйнується з швидкістю  $\gamma$ , то буде присутній ще один доданок  $\gamma q$ :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + D_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + U_x \frac{\partial q}{\partial x} + \gamma q = 0.$$

Якщо концентрація забруднюючої речовини вимірюється по абсолютній величині, то в правій частині приведених вище рівнянь слід поставити не нуль, а деяку постійну – інтенсивність потоку забруднення, розподіленого по простору поля. При змінній інтенсивності в правій частині рівняння слід поставити  $f(t)$ , а при нерівномірному розподілі потоку –  $f(t, x)$ . Кінцево-різницевий аналог рівняння в загальному випадку матиме вигляд

$$\begin{aligned} (q_{+10} - q_{00}) + D_x (q_{+10} - 2q_{00} + q_{-10}) + U_x (q_{0+1} - q_{00}) + \\ + \gamma q_{00} = f(t_{00}, x_{00}). \end{aligned}$$

Це рівняння називається рівнянням параболічного типу. Воно дійсне при безконечній швидкості поширення забруднення по ширині водотоку. Для обліку кінцевої швидкості поширення слід додати в рівняння другу похідну за часом (рівняння гіперболічного типу):

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + a \frac{\partial q}{\partial t} + D_x \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - U_x \frac{\partial q}{\partial x} + \gamma q = f(t, x),$$

$$(q_{0+1} - 2q_{00} + q_{0-1}) + a(q_{+10} - q_{00}) + D_x(q_{+10} - 2q_{00} + q_{-10}) + \\ + U_x(q_{0+1} - q_{00}) + \eta q_{00} = f(t_{00}x_{00}).$$

Відмітимо, що процес турбулентної дифузії речовин в газі або в рідині ще не має сповна певного і адекватного опису – математичного. Параболічне рівняння, засноване на законах Фіка і збереження маси, не описує утворення плям і струменів, спостережуваних у водоймищах. Гіперболічне рівняння (що виводиться лише для одновимірного випадку), засноване на теорії сумісного удару твердих часток, також є лише деяким наближенням до адекватного опису турбулентного руху. Утворення вказаних особливостей можуть пояснити лише інтегро-диференціальні рівняння, все ще недостатньо досліджені в математиці.

Ось чому при самоорганізації моделі турбулентної дифузії важно не забути надати машині можливість вибрати разом з іншими аргументами суми аргументів – аналоги інтегральних доданків рівняння дифузії. Зворотний перехід від різницевих рівнянь до інтегро-диференціальних допомагає з'ясувати дійсний вигляд безперервних рівнянь і складні закони, приховані у вихідній таблиці дослідних даних, якщо таблиця дослідних даних містить достатню інформацію.

Дані вимірюються за допомогою датчиків, встановлених на контрольних станціях, або виходять за допомогою лабораторних аналізів. На станціях в простому випадку може вимірюватися лише одна змінна. Отримувана при цьому модель є одновимірною і виражається одним рівнянням. При вимірі декілька взаємопов'язаних змінних модель виходить багатовимірною і може визначатись системою взаємозв'язаних рівнянь.

Виміри на контрольних станціях виконуються дискретно, наприклад один раз в 1 г або на 1 добу. Свідчення безперервних датчиків зазвичай усереднюються також за певний період знімання даних, що викликає необхідність переходу від безперервних диференціальних рівнянь до їх кінцево-різницевого аналогів, тобто до дискретної математики.

Дискретна математика використовує заміну в диференціальних рівняннях похідних і диференціалів – кінцевими різницями, вимірюваними у вузлах прямокутної рівномірної просторової сітки. Наприклад, осі тривимірного простору з координатами  $x$ ,  $y$  і  $z$  дискретизуються на рівні ділянки – кроки, що приймаються за одиницю виміру простору.

Для переходу від безперервного диференціального рівняння до кінцево-різницевого аналога похідні замінюють табличними різницями. У інтегро-диференціальних рівняннях інтегралі замінюють відповідними сумами. Наприклад, для дворівневого завдання на площині  $t$ - $q$  діють такі визначення похідних і інтегралів через «передні» табличні різниці і суми (формули Ейлера):

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \approx [(q_{+10} - q_{00}) - (q_{00} - q_{10})] = \Delta^2 q;$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} \approx (q_{+10} - q_{00}) = \Delta q;$$

$$t = t_{00}; q = q_{00};$$

$$\int_1^N q dt \approx \sum_1^N q_i;$$

$$\int_1^N \int_1^N q dt^2 \approx \sum_1^N \sum_1^N q_i \text{ і т.д.}$$

Індекс часу далі пишеться на першому місці, тобто перший індекс відноситься до часу  $t$ , а другий – до осі  $q$ .

У вказаному прямому перетворенні безперервних диференціальних рівнянь в кінцево-різницево аналогів використовуються найбільш прості формули заміни похідних табличними різницями, відповідні формулі Ейлера:

$$q_{+1} = q_0 + \Delta_t \left( \frac{\partial q}{\partial t} \right)_0 \text{ при } \Delta t = 1.$$

Складніші формули, наприклад формула трапецій

$$q_{+1} = q_0 + \frac{\Delta t}{2} \left[ \left( \frac{dq}{dt} \right)_{+1} + \left( \frac{dq}{dt} \right)_0 \right],$$

використовуються з метою найбільшого збігу інтеграла безперервного рівняння і кривої покрокової інтеграції різницевого рівняння при крупнішому кроці, тобто для підвищення швидкості збіжності рішення.

При моделюванні фізичних полів необхідно будувати просторовий розподіл поля. Такі моделі необхідні для прогнозування подальшого розвитку полів як в часі, так і в просторі. Прикладами можуть служити поширення забруднення в екологічній системі (водосховищі, повітряному просторі), радіоактивне поле реактора і так далі.

На відміну від моделей із зосередженими параметрами, характерних тим, що всі спостереження відносяться до однієї і тієї ж точки і не залежать від просторових координат, дані моделі є просторовими (полями), тобто в моделі, наряду з тимчасовим розвитком окремих параметрів, повинне враховуватись їх просторовий розподіл. Для таких просторових моделей, або моделей з розподіленими параметрами, потрібно декілька точок виміру або вимірвальних станцій по кожній координаті. Відповідною структурою математичної моделі є диференціальне рівняння в часткових похідних, в якому є похідні за часом і просторовим координатам  $x$ ,  $z$  і ін. Аргументами функцій, які знаходяться як вирішення рівняння в часткових похідних, є разом з параметрами часу  $t$  і просторові координати  $x$ ,  $y$ ,  $z$  .... Контрольні станції здійснюють виміри

$$q_{j,-\tau}^i \text{ і } u_{j,-\tau}^i,$$

де  $i$  – номер контрольної станції;  $j$  – номер компоненти;  $\tau$  – тимчасове запізнювання виміру.

Так,  $u_{2,-3}^1$  означає запізнювання на три тимчасові одиниці, вимір другої компоненти дії на першій контрольній станції, а  $q_{1,0}^2$  – вимір без запізнення першої компоненти вихідної величини на другій контрольній станції. Як і для звичайних диференціальних рівнянь при квантуванні просторових і тимчасових координат, так і для диференційних рівнянь в часткових похідних виходять дискретні моделі у вигляді різницевого рівнянь. Таким чином, для диференційного рівняння в часткових похідних

$$\frac{\partial y}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + V_x \frac{\partial y}{\partial x} + V_z \frac{\partial y}{\partial z} = f(x, z, t)$$

за допомогою різниць:

$$\frac{\partial y}{\partial t} \approx y_{000} - y_{00-1}, \quad \frac{\partial y}{\partial x} \approx y_{000} - y_{0-10}, \quad \frac{\partial y}{\partial z} \approx y_{000} - y_{-100},$$

а також:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \approx (y_{000} - y_{0-10}) - (y_{0-10} - y_{0-20}) = y_{000} - 2y_{0-10} + y_{0-20};$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \approx (y_{000} - y_{-100}) - (y_{-100} - y_{-200}) = y_{000} - 2y_{-100} + y_{-200};$$

можна задати різницевого рівняння у вигляді лінійного полінома:

$$y_{000} = F(y_{00-1}, y_{0-10}, y_{-100}, y_{0-20}, y_{-200}) + f(x, z, t),$$

де індекси при  $y_{ijr}$  позначають:  $i$  – зрушення по осі  $x$ ;  $j$  – зрушення по осі  $z$ ;  $r$  – зрушення по осі  $t$ . Відповідний шаблон, який потрібний для оцінки коефіцієнтів цієї моделі за допомогою методу найменших квадратів, показаний на рис. 1.

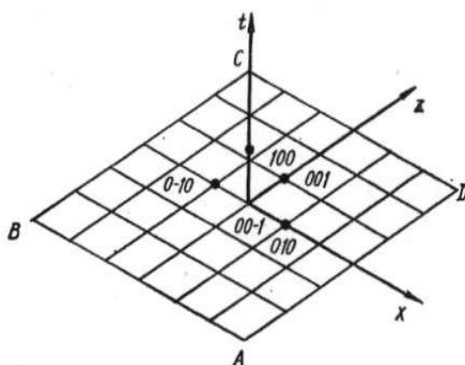


Рис. 1. Тривимірний шаблон для моделювання фізичних полів

Використовуються спостереження в різних точках полів, дані про положення, інтенсивність і моменти часу дії. Для поля забруднення води або повітря це, наприклад, означає спостереження на різних контрольних станціях, даних про положення джерел забруднення, інтенсивності і моменти викиду забруднюючих і шкідливих речовин. Вихідні величини вибираються відповідно до постановки завдання.

Надалі розрізнятимемо завдання інтерполяції, екстраполяції і прогнозування. Під інтерполяцією розуміється моделювання поля в області, лежачій усередині многогранника, кутовими точками якого є вимірювальні пункти або контрольні станції (рис. 2, а). Визначення поширення різних величин за межами цього многогранника називатимемо відповідно екстраполяцією.

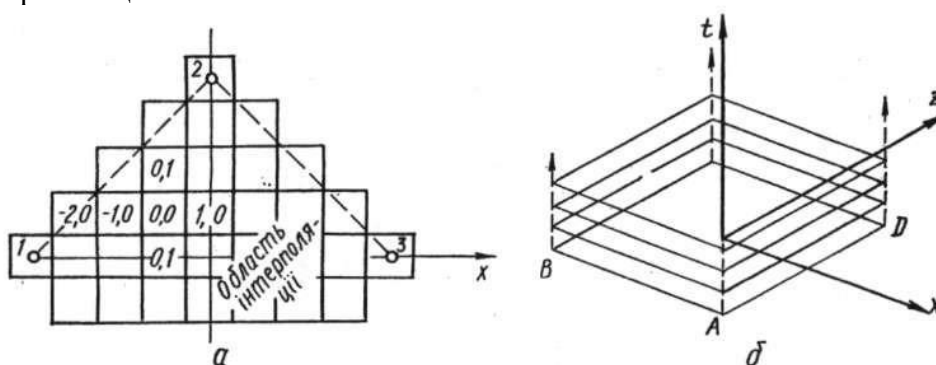


Рис. 2. Двох- (а) і тривимірна (б) області інтерполяції

Екстраполяція може здійснюватися як по одній координаті, так і по багатьом, як і показано на рис. 2, а – у напрямі осей  $x$  і  $z$  за межами даних, лежачих в області інтерполяції, тобто обчисленій моделі дифузії

$$y_{100} = F_1(y_{000}, y_{00-1}, y_{0-10}, y_{0-20}, y_{-100}) + f(x, z, t);$$

$$y_{010} = F_2(y_{000}, y_{00-1}, y_{0-10}, y_{-100}, y_{-200}) + f(x, z, t).$$

На відміну від цього прогноз виходить з покрокової інтеграції різницьових рівнянь в області інтерполяції у напрямі осі  $t$  (рис. 3.12, б):

$$y_{001} = F_3(y_{000}, y_{0-10}, y_{-100}, y_{0-20}, y_{-200}) + f(x, z, t).$$

Моделі характеризуються компактним шаблоном, тобто у зв'язку з допущенням безперервності вони враховують лише інформацію про найближчу околицю (тимчасовою, просторовою) поточної точки поля. Шаблон задає точки поля, які використовуються для знаходження моделі. Для відображення однієї першої похідної досить вимірів в двох сусідніх точках поля, для відображення другої похідної – в трьох точках і так далі. Приклади побудови шаблонів типових диференціальних рівнянь з двома незалежними змінними ( $t, x$ ) містяться в таблиці 1.

Таблиця 1

Типові шаблони і відповідні їм диференціальні рівняння для двох чинників  $t$  і  $x$

Шаблон	Таблиця	Модель												
$\begin{array}{ c c } \hline 0, & 1, \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} \rightarrow$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,0}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	-	-	$\frac{\partial y}{\partial t} + a_1 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,0})$								
$y_{1,0}$	$y_{0,0}$													
-	-													
$\begin{array}{ c c } \hline 0, - & \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c c } \hline 0, & 1, \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} \rightarrow$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,0}</math></td> <td><math>y_{0,1}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$	-	-	-	$\frac{\partial y}{\partial t} + a_1 \frac{\partial y}{\partial x} + a_2 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,0}, y_{0,-1})$						
$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$												
-	-	-												
$\begin{array}{ c c } \hline 0, - & \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c c } \hline 0, & 1, \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c } \hline 0, \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,0}</math></td> <td><math>y_{0,1}</math></td> <td><math>y_{0,-1}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$	$y_{0,-1}$	-	-	-	-	$\frac{\partial y}{\partial t} + a_1 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial y}{\partial x} + a_3 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,0}, y_{0,1}, y_{0,-1})$				
$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$	$y_{0,-1}$											
-	-	-	-											
$\begin{array}{ c c c } \hline & 0, - & \\ \hline & 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c c c } \hline - & 0, & 1, \\ \hline 1, & 0 & 0 \\ \hline 0 & & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c } \hline 0, \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,0}</math></td> <td><math>y_{0,1}</math></td> <td><math>y_{0,-1}</math></td> <td><math>y_{-1,0}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,0}$	-	-	-	-	-	$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial y}{\partial t} + a_3 \frac{\partial y}{\partial x} + a_4 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,0}, y_{0,1}, y_{0,-1}, y_{-1,0})$		
$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,0}$										
-	-	-	-	-										
$\begin{array}{ c c c } \hline & 0, - & \\ \hline & 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c c c c } \hline - & - & 0, & 1, \\ \hline 2, & 1, & 0 & 0 \\ \hline 0 & & & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c } \hline 0, \\ \hline 1 \\ \hline \end{array}$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,0}</math></td> <td><math>y_{0,1}</math></td> <td><math>y_{0,-1}</math></td> <td><math>y_{-1,0}</math></td> <td><math>y_{-2,0}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,0}$	$y_{-2,0}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{\partial^3 y}{\partial t^3} + a_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + a_3 \frac{\partial y}{\partial t} +$ $+ a_4 \frac{\partial y}{\partial x} + a_5 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,0}, y_{0,1}, y_{0,-1}, y_{-1,0}, y_{-2,0})$
$y_{1,0}$	$y_{0,0}$	$y_{0,1}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,0}$	$y_{-2,0}$									
-	-	-	-	-	-									
$\begin{array}{ c c } \hline 0, - & \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c } \hline 1, \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \rightarrow$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,-1}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,-1}$	-	-	$\frac{\partial y}{\partial t} + a_1 \frac{\partial y}{\partial x} + a_2 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,-1})$								
$y_{1,0}$	$y_{0,-1}$													
-	-													
$\begin{array}{ c c } \hline - & \\ \hline 1, - & \\ \hline 2 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c c } \hline 0, - & \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c } \hline 1, \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \rightarrow$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,-1}</math></td> <td><math>y_{-1,-2}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,-2}$	-	-	-	$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial y}{\partial t} + a_3 \frac{\partial y}{\partial x} + a_4 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,-1}, y_{-1,-2})$						
$y_{1,0}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,-2}$												
-	-	-												
$\begin{array}{ c c } \hline - & \\ \hline 3, - & \\ \hline 2 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c c } \hline - & \\ \hline 1, - & \\ \hline 2 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c c } \hline 0, - & \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow$ $\begin{array}{ c } \hline 1, \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \rightarrow$	<table border="1"> <tr> <td><math>y_{1,0}</math></td> <td><math>y_{0,-1}</math></td> <td><math>y_{-1,-2}</math></td> <td><math>y_{-2,-3}</math></td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table>	$y_{1,0}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,-2}$	$y_{-2,-3}$	-	-	-	-	$\frac{\partial^3 y}{\partial t^3} + a_1 \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} + a_2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + a_3 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} +$ $+ a_4 \frac{\partial y}{\partial t} + a_5 \frac{\partial y}{\partial x} + a_6 y = f(t, x)$ $y_{1,0} = f_1(t, x) + f_2(y_{0,-1}, y_{-1,-2}, y_{-2,-3})$				
$y_{1,0}$	$y_{0,-1}$	$y_{-1,-2}$	$y_{-2,-3}$											
-	-	-	-											

Якщо на таблицю вихідних даних накласти шаблон (лінійний, Г-подібний або хрестоподібний), то він охопить ряд цифр. Кожному положенню шаблону на полі таблиці даних відповідає одне умовне рівняння. Переміщаючи шаблон, отримують перевизначені систему, що містить умовних рівнянь зазвичай в 5-10 разів більше, ніж невідомих. Система по правилах процедури Гауса перетворюється в певну систему нормальних рівнянь з квадратною інформаційною матрицею. Вирішення системи нормальних рівнянь дає однокроковий прогноз по осі, співпадаючій з напрямом руху шаблону (наприклад, по осі часу).

Існують два способи «навчання» шаблону: 1) якщо шаблон для здобуття умовних рівнянь переміщається по всій площині таблиці даних, то виходить деяка усереднена прогноуюча модель для всього часу спостереження процесу; 2) якщо ж при навчанні шаблон переміщають лише по одному із стовпців таблиці, то отримують модель для інтервалу часу, що відповідає даному стовбцю (наприклад, модель для сезону року або для місяця і т. п.). При покроковому прогнозі сезонні і місячні моделі використовують по черзі, відповідно до їх календарної зміни.

Для фізичних полів зазвичай відома структура їх математичних рівнянь, що дозволяє заздалегідь визначити тип часткових моделей – шаблонів і їх істотні аргументи. Для того, щоб придати алгоритму самоорганізації необхідну свободу рішення, порядок рівнянь має бути підвищений на одну або дві одиниці. При визначенні оцінок коефіцієнтів моделі можуть бути застосовані комбінаторні і багаторядні алгоритми групового обліку аргументів.

Для розрахунку критеріїв таблиця спостережень ділиться на повчальну і перевірочну вибірки. Кращим виявляється той шаблон, для якого критерій селекції набуває найменшого значення. При цьому в якості критерію селекції застосовують комбіновані критерій, найчастіше комбінацію критерію мінімуму зсуву і критерію точності покрокової інтеграції на  $K$  кроків вперед. За допомогою критерію мінімуму зсуву вибирається найбільш несуперечна модель, тоді як критерій покрокової інтеграції, узятий з деяким коефіцієнтом ваги  $\lambda = \beta$ , забезпечує регуляризацию вибору моделі (однозначність і нечутливість до завад). На рис. 3.13, а показаний шаблон, що дозволяє отримати найбільш просування в нижній частині поля екстраполяції, на рис. 3.13, б – в середній його частині і на рис. 3.13, в – у верхній частині поля.

Залежно від аргументів, що враховуються в моделі, можна використовувати різні методи її побудови.

*Метод I* характеризується вживанням інтерполяції і двохступеневою структурою. На першому етапі в межах області інтерполяції обчислюються значення змінних для всіх точок сітки, наприклад за допомогою кубічних сплайнів. Потім на другому етапі будується система різницевих рівнянь, за допомогою якої, здійснюється екстраполяція і прогноз. Приведений в розділі 3.4.2 приклад відповідає такому двоетапному підходу.

*Метод II* враховує тимчасову зміну внутрішніх дій (джерел викидів). Отримані при цьому моделі непридатні для подальшої екстраполяції за межі області розташування контрольних станцій.

*Метод II.1 Використання інформації контрольних станцій.* Для  $i$ -й контрольної станції отримуємо наступну прогноуючу модель:

$$y_{j(1)}^i = \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^m P_{si}(y^s),$$

де  $\underline{y}^s = (y_{1(0)}^s, y_{1(-1)}^s, y_{1(-2)}^s, \dots, y_{i(-g)}^s, \dots, y_{n(-g)}^s)$  – вектор вимірюваних величин;  $P$  – оператор полінома;  $n$  – число контрольних станцій;  $m$  – число вимірюваних величин;  $g$  – максимальне тимчасове запізнювання. Для  $m = 3$  і  $g = 2$  отримуємо прогноз першої вимірюваної величини першої точки виміру (контрольній станції) у вигляді суми двох поліномів:

$$y_{1(1)}^1 = P_{21}(y_{1(0)}^2, y_{1(-1)}^2, y_{1(-2)}^2, y_{2(0)}^2, y_{2(-1)}^2, y_{2(-2)}^2) + P_{31}(y_{1(0)}^3, y_{1(-1)}^3, y_{1(-2)}^3, y_{2(0)}^3, y_{2(-1)}^3, y_{2(-2)}^3).$$

Таким чином, вимірювана змінна  $i$ -ї станції виражається залежно від вимірюваних величин сусідніх станцій з деякими тимчасовими запізненнями.

*Метод II.2 Облік інформації про «функцію джерела».* У функції джерела враховуються внутрішні дії, наприклад поступлення речовини або води з дна водоймища. В цьому випадку прогноз для  $i$ -ї станції має вигляд

$$y_{j(1)}^{(i)} = \sum_{s=1}^p Q_{sj}(\underline{u}^s),$$

де  $p$  – число дій (джерел викидів);  $\underline{u}^s = (u_{1(0)}^s, u_{1(-1)}^s, \dots, u_{1(-g)}^s, \dots, u_{n(0)}^s, \dots, u_{n(-g)}^s)$ ;  $Q$  – оператор полінома. Для  $n = 2$  і  $p = 2$  набувають першого вимірюваного значення першої контрольної станції з суми двох поліномів:

$$y_{1(1)}^1 = Q_{11}(u_{1(0)}^1, u_{1(-1)}^1, u_{1(-2)}^1, u_{2(0)}^1, u_{2(-1)}^1, u_{2(-2)}^1) + Q_{21}(u_{1(0)}^2, u_{1(-1)}^2, u_{1(-2)}^2, u_{2(0)}^2, u_{2(-1)}^2, u_{2(-2)}^2).$$

*Метод II.3 Облік інформації про початкові і граничні умови.* Загальний підхід до моделювання виходить при об'єднанні методів II.1 і II.2, тобто при використанні інформації про дії і про довколишні точки вимірів. При цьому прогнозується  $i$ -а точка вимірів

$$y_{j(1)}^i = \sum_{s=1}^m P_{si}(y^s) + \sum_{s=1}^p Q_{sj}(\underline{u}^s).$$

Необхідно враховувати зовнішні дії, наприклад температуру, вологість, силу вітру і ін. Ці величини можуть бути адитивно додані у вищезгадані вирази.

*Методи III .1 і III.2.* В цьому випадку методи II.1, II.2 і II.3 комбінуються з методом I, тобто застосовуються інтерполяційні моделі з метою обчислення значень вихідної змінної в точках сітки області інтерполяції.

## Висновки

Досліджено використання методів самоорганізації, які дають змогу здійснювати системний аналіз та ідентифікацію складних об'єктів. Запропоновано застосування ітераційного Методу Групового Урахування Аргументів в телекомунікаціях, на основі якого одержано оптимальні альтернативні моделі, що дозволяють здійснити вибір за показниками найкращих систем управління.

Розроблено методіку самоорганізації моделі математичного моделювання мережних процесів на базі динамічних систем, яка найбільш адекватна і дає змогу визначити основні параметри мережі із забезпеченням потрібних параметрів і показників якості функціонування цих мереж;

Досліджено самоорганізацію моделі оптимальної складності за допомогою алгоритму об'єктивного системного аналізу з метою вирішення: ідентифікації фізичної моделі, придатної для короткострокового прогнозу і нефізичних моделей для довгострокового прогнозу. Алгоритм ОСА дозволяє найбільш ефективним способом вибрати малу за об'ємом з множини характеристичних змінних, результати цього вибору не суперечать результатам рангового кореляційного аналізу.

## Список використаної літератури:

1. ITU-T Recommendation M.3108.1. ITU-T Study Group 4 (1997-2000) approved under the WTSC Resolution No. 1 procedure. 26th of March 1999.

2. TU-T Recommendation M.3020 (1995). TMN interface specification methodology 3. Network Environments, Managing Ray Hunt, John Vargo Encyclopedia of Informator Systems. 2003 pp 279-301.
3. До питання оцінки ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж / С.І. Мешков, В.В. Григорович, О.І. Чумак // Вісник ДУІКТ. – 2012. – Т.10, №1. – С. 68-72.
4. Дослідження методу статистичного моделювання для оцінки надійності системи зв'язку / Мешков С.І., Григорович В.В., Недашківський О.Л. [та ін.] // Вісник ДУІКТ. – 2012. – Т.10, № 3. – С. 85-89.
5. Дослідження надійності функціонування системи зв'язку / Мешков С.І., Григорович В.В., Недашківський О.Л. [та ін.] // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології COMINFO'2012, 01-05 жовтня. – Livadia, 2012. – С. 88.
6. Основна задача управління та шляхи її розв'язання / Мешков С.І., Варфоломєєва О.Г., Чумак О.І. // Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті: матеріали VIII наукової конференції Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, 24-25 листопада. – К., 2011. – С.164-167.
7. Turovsky O. Determination of the lower border of Cramer-Rao for evaluation of the carrier frequency of the radio technical communication channel signal. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2020. Vol. 9, no. 4. P. 5838–5845. URL: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/243942020>.
8. Галаган Н.В., Каток В.Б., Беркман Л.Н., Захаржевський А.Г., Демусь А.Я. Функціонально-статистичні моделі об'єктів контролю і управління. *Наукові записки ДУІКТ*. №1(7), С. 7-14 К.:ДУІКТ, 2025. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2025.018122>.
9. Галаган Н.В., Харлай Л.О., Мелешко Т.В., Сорокун А.Д., Демусь А.Я. Застосування механізмів ситуаційного управління для підвищення ефективності функціонування інфокомунікаційних мереж. *Наукові записки ДУІКТ*. №2(8), -С. 38-45 К.:ДУІКТ, 2025. URL: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2025.022483>.
10. Geyer F., Scheffler A., Bondorf S. Network Calculus with Flow Prolongation – A Feedforward FIFO Analysis enabled by ML. IEEE Transactions on Computers. 2022. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1109/tc.2022.3204225>.
11. Klymash. M., Berkman, L., Otrokh, S., Pilinsky, V., Chumak, O., Hryshchenko, O. (2021) Increasing the multi-position signals noise immunity of mobile communication systems based on high-order phase modulation. Selected Papers of the XXI International Scientific and Practica Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2021). 147-157.

#### *Автори статті*

**Кравченко Владислав** – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-4758-7027

**Демусь Альона** – магістр, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій Київ, Україна.

ORCID: 0009-0007-4760-6375

**Захаржевський Андрій** – кандидат технічних наук, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-7019-9949

**Чумак Михайло** – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

#### *Authors of the article*

**Kravchenko Vladyslav** – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies. Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-4758-7027

**Demus Alona** – master, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0007-4760-6375

**Zakharzhevskiyi Andrii** – Candidate of Sciences (technical), State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-7019-9949

**Chumak Mykhailo** – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

---

Надійшла до редакції: 16.04.2026

Прийнята до друку: 27.04.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Кравченко В.І., Демусь А.Я., Захаржевський А.Г., Чумак О.І.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>