

УДК 654.1:654.9

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.018122

Галаган Н.В., к.т.н.; Каток В.Б., к.т.н.;
Беркман Л.Н., д.т.н.; Захаржевський А.Г., к.т.н.;
Демусь А.Я.

ФУНКЦІОНАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ

Halahan N.V., Katok V.B., Berkman L.N., Zakharzhevskiy A.H., Demus A.Y. Functional-statistical models of control and management objects. In a modern infocommunication network, the object of control and management can be any information network equipment, as well as the entire network as a whole. In this case, the network is considered as a complex system that is subject to management. The complexity of the control and management process is largely determined by the complexity of the objects. To describe the functioning of the object, it would be advisable to build its mathematical model. The state of an object is most fully characterized by a mathematical functional-statistical model – a system of equations or operators that describe the dependence of the initial parameters of an object, system or unit on external or internal influences during operation. Based on the analysis of this model, it is possible to formulate the main tasks solved by the automatic control and management system, as well as synthesize the optimal network management system, determine the degree of automation and its effectiveness.

When constructing a mathematical functional-statistical model, it is necessary to take into account that a network as a control object can consist of systems of various classes and types. Such systems can be autonomous and non-autonomous, stationary and non-stationary, closed and open. Therefore, to construct a mathematical functional-statistical model, it is necessary to use a sufficiently generalized mathematical apparatus, which, with appropriate changes, can be extended to individual cases.

Keywords: network management, control and management system, functional-statistical model, control and management object, synthesis, optimal system, delay, availability factor, Monte Carlo method

Галаган Н.В., Каток В.Б., Беркман Л.Н., Захаржевський А.Г., Демусь А.Я. Функціонально-статистичні моделі об'єктів контролю та управління. У сучасній інфокомунікаційній мережі об'єктом контролю та управління може бути будь-яке обладнання інформаційної мережі, а також уся мережа в цілому. При цьому мережа розглядається як складна система, що підлягає управлінню. Складність процесу контролю та управління здебільшого обумовлюється складністю об'єктів. Для опису функціонування об'єкта доцільно буде побудувати його математичну модель. Найбільш повно стан об'єкта характеризує математична функціонально-статистична модель – це система рівнянь або операторів, котрі описують залежність вихідних параметрів об'єкта, системи чи блока від зовнішніх або внутрішніх впливів під час функціонування. На основі аналізу цієї моделі можливо сформулювати основні задачі, що вирішуються автоматичною системою контролю та управління, а також синтезувати оптимальну систему управління мережею, визначити ступінь автоматизації та її ефективність.

При побудові математичної функціонально-статистичної моделі необхідно враховувати те, що мережа як об'єкт управління може складатися з систем найрізноманітніших класів і видів. Такі системи можуть бути автономними і неавтономними, стаціонарними та не стаціонарними, замкнутими і розімкнутими. Тому для побудови математичної функціонально-статистичної моделі необхідно використовувати достатньо узагальнений математичний апарат, який при відповідних змінах може бути застосований для будь-якої системи управління.

Ключові слова: управління мережею, система контролю та управління, функціонально-статистична модель, об'єкт контролю та управління, синтез, оптимальна система, затримка, коефіцієнт готовності, метод Монте-Карло

Вступ

У статті досліджено критерії оптимізації процесів контролю та управління. До таких параметрів перш за все належать:

- час, необхідний для виконання процесу в цілому і його складових;
- ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності виконання завдання різними мережевими елементами, що входять в об'єкт та об'єктом в цілому;
- ймовірність помилки;
- затримка передачі управляючої інформації;

- коефіцієнт готовності;
- відсоток втрати пакетів;
- точність роботи різних складових інфокомунікаційної мережі (величина відхилення параметрів від норми);
- обсяг споживання енергії та інші важливі показники.

У статті запропоновано функціонально-статистичні моделі, що дозволяють визначити ймовірнісні характеристики інфокомунікаційної мережі як об'єкта управління. Пропоновані моделі дозволяють безпосередньо визначити ймовірності появи поступових відмов систем об'єкта. При цьому можуть бути використані чотири математичні моделі, засновані на методах інтегрування диференціальних рівнянь, методі Монте-Карло, методі квазілінійних обурень та методі канонічних розкладів.

Метод інтегрування диференціальних рівнянь – як метод прямого обчислення багатовимірних щільностей ймовірностей вихідних параметрів об'єкта за допомогою диференціальних рівнянь.

Метод Монте-Карло полягає у багаторазовому виборі випадкової величини параметрів систем з наступним визначенням закону розподілу вихідних параметрів об'єкта.

Метод квазілінійних обурень полягає у поданні вихідних параметрів у вигляді ряду Тейлора з наступним визначенням закону розподілу можливостей вихідних параметрів.

Запропоновано математичну модель об'єкта, засновану на методі квазілінійних збурень як найбільш простому і що дозволяє отримувати практично важливі результати, методі інтегрування диференціальних рівнянь та умов його застосування, а на базі методу Монте-Карло.

Аналіз останніх досліджень. В [1] розглянуто інформаційно-ентропійний метод, який дозволяє визначити кількість управляючої інформації. Цей метод є основним для дослідження систем управління на основі теорії інформації.

В [2] представлені методи багатокритерійної оптимізації параметрів інфокомунікаційних мереж. Ця робота стала основою для розробки моделі об'єкту управління.

В роботах [3-5] досліджено моделі багатопозиційних сигналів, на базі яких здійснюється синтез динамічної системи, яка знаходиться під впливом різноманітних управляючих сигналів.

В роботах [6-9] розглядаються моделі систем управління на базі об'єктно-орієнтованого методу. Ці моделі побудовані на базі інформаційно-ентропійного методу.

Постановка завдання. Уданій статті запропоновано математичну модель об'єкту, яка заснована на методі квазілінійних збурень як найбільш ефективному, що дозволяє отримувати практично важливі результати, засновані на методі інтеграції диференціальних рівнянь, на базі методу Монте-Карло.

Ця модель дозволить здійснити ефективний синтез будь-якої системи управління на базі об'єктно-орієнтованого підходу.

Метою роботи є визначення математичної моделі мережевого елемента як об'єкту контролю та управління на базі законів розподілення вихідних параметрів мережевого елемента методом інтегрування диференціальних рівнянь.

Виклад основного матеріалу дослідження

Визначення математичної моделі мережного елемента як об'єкту контролю і управління. В процесі управління мережею функціонування контрольованого об'єкту мережі можна розглядати як багатовимірну динамічну систему, що включає автоматизовані системи управління (СУ) спільно з керованим об'єктом (рис. 1). На цю систему, разом із закономірними і випадковими управляючими діями або сигналами контролю, впливають різні випадкові перешкоди у вигляді зовнішніх збурень, що діють, як правило, на об'єкт, і внутрішніх, діючих на різні функціональні блоки СУ.

Збурений стан об'єкту при контролі і управлінні можна описати системою рівнянь, математичною функціональною моделлю, що є в загальному випадку:

$$\sum_{p=1}^m M_{lp}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q)x_p = F_l(t, \tau, X, Z) \quad (1)$$

$$l = 1, 2, \dots, m,$$

де $X\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ – вектор випадкових функцій часу, що характеризують вихідні параметри об'єкту;

$Z\{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k\}$ – вектор випадкових функцій часу, що характеризують зовнішні і прямі внутрішні збурення і управляючі дії (на рис. 1).

F_l – нелінійна функція часу;

$M_{lp}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q)$ – многочлен відносно оператора диференціювання $\frac{d}{dt}$ із змінним в часі випадковим вектором коефіцієнтів $Q\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$;

t – поточне значення часу;

τ – момент часу, до якого аналізується об'єкт.

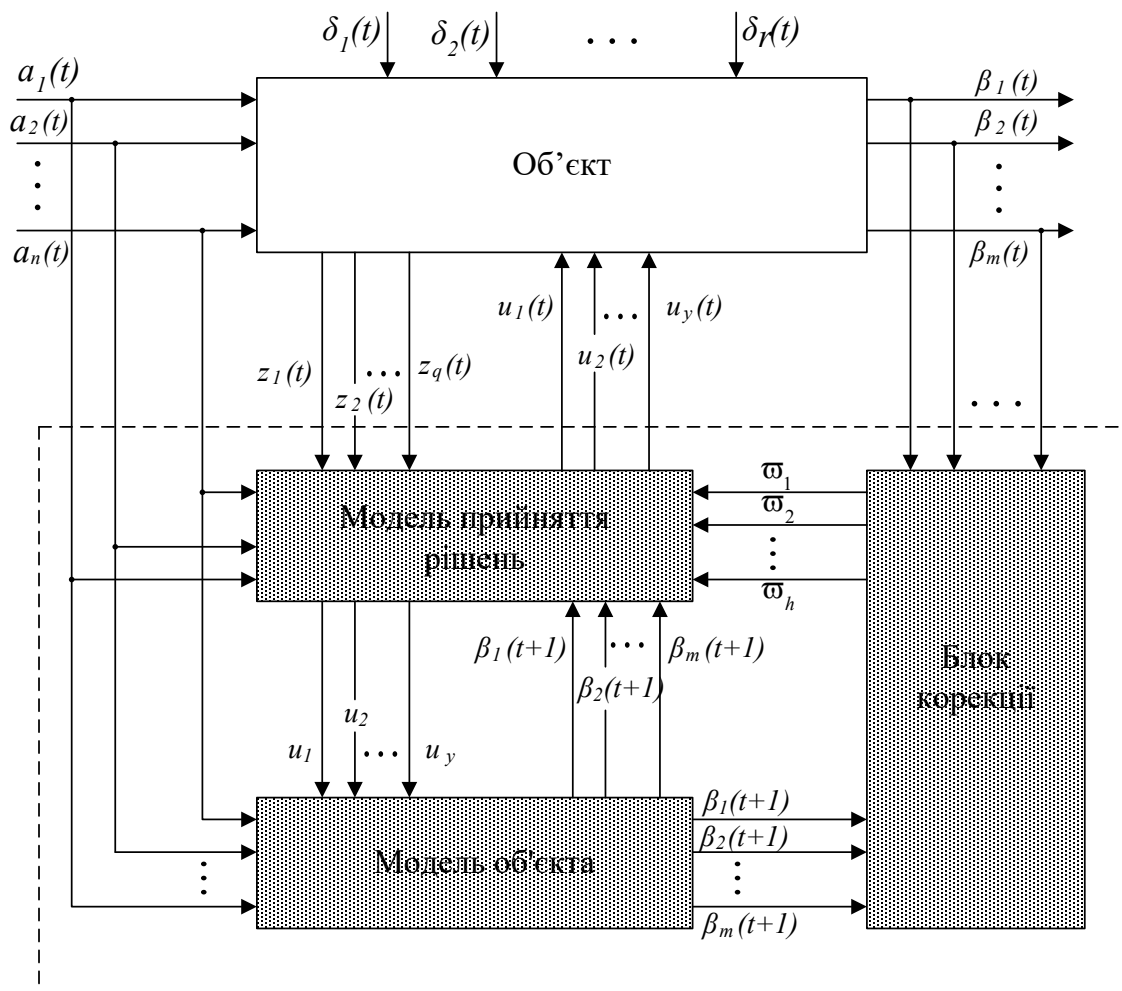


Рис. 1. Модель об'єкту управління

Система рівнянь (1) і залежності від етапу і вибраного алгоритму контролю може описувати динамічний стан об'єкту, керованого системами автоматизованого управління. Наприклад, в мережі FN, об'єкт контролю (КО) – це модем, програмний комутатор, маршрутизатор і так далі. Процес управління об'єктом полягає в забезпеченні відповідності параметрів КО певної норми. Відхилення параметрів від норми повинно бути не більш допустимого значення. При цьому на об'єкт діють випадкові збурення, а також випадкові і не випадкові дії. Випадковість внутрішніх збурення обумовлюється: допусками виробництва; раптовим відхиленням параметрів елементів від розрахункових; поступовим відходом параметрів елементів від розрахункових;

чутливістю устаткування, що входить в систему управління; різними шумами, що діють в каналах передачі інформації ін.

Внутрішні збурення можна розділити на прямі і непрямі. До прямих внутрішніх збурень відносяться всі збурення, що діють на канали передачі інформації (випадкова кінцева точність і чутливість окремих мережевих елементів, а також всілякі шуми на входах цих елементів). До непрямих внутрішніх збурень відносяться збурення, що впливають на вихідні параметри при зміні параметрів мережевих елементів (точність налаштування окремих мережевих елементів, зміна умов експлуатації і режиму роботи СУ).

Випадковість зовнішніх збурень обумовлюється; випадковістю помилок функціонування об'єкту і системи управління, випадковими відхиленнями параметрів мережного елементу від розрахункових, погрішностями виготовлення об'єкту, помилками при передачі і прийомі інформації, помилками СУ, випадковими збуреннями довкілля.

Випадковість параметрів сигналів, що управляють або корисного, може обумовлювати, зокрема, випадковість факту появи цих сигналів. Таким чином, як дія, що управляє, так і збурення, що діють на об'єкт, слід розглядати в статистичному плані.

Стан будь-якої динамічної системи, що знаходиться під впливом сигналів, що управляють, і збурень, визначається деякими вихідними параметрами, певним чином пов'язаними з діями на систему через відповідний системі рівнянь (1) вектор-оператор динамічної системи, заданий або сукупністю математичних операцій $A(t, \tau, X, Z, Q)$, або сукупністю лінійних або нелінійних диференціальних рівнянь (1).

У зв'язку з випадковим характером різних дій і збурень вихідні параметри, об'єкту будуть також випадковими функціями часу.

Кожній групі номінальних умов при $t = \tau_0, x_{01}, x_{0m}, \zeta_{01}, \dots, \zeta_{0k}$, номінальної області G0 відповідає своє номінальне вирішення системи (1):

$$x_{0i} = \varphi_{0i}(\tau_0, \tau, X_0, Z_0). \quad (2)$$

Кожній групі реальних умов в момент часу $t = \tau_1, x_1, x_m, \zeta_1, \dots, \zeta_k$ реальної області G1 відповідає своє реальне вирішення системи (3):

$$x_i = \varphi_i(\tau_1, \tau, X, Z). \quad (3)$$

Система рівнянь (1) по числу нелінійних операторів і вихідним параметрам може бути представлена у вигляді m окремих рівнянь. Для простоти покладемо, що число вихідних параметрів дорівнює числу операторів, хоча їх може бути більше. Для v -го параметра система рівнянь (1) стане рівнянням:

$$M_{lg}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q)x_g = F_l(t, \tau, x_g, Z). \quad (4)$$

Для мережного елементу цьому рівнянню при лінеаризації можуть відповідати імпульсна $\omega(t, \tau, \mu, x_v, Z, Q)$, перехідна $h(t, \tau, \mu, x_v, Z, Q)$, передаточна $W(t, \tau, p, x_v, Z, Q)$ функції системи, амплітудна $A(t, \tau, \omega, x_v, Z, Q)$ і фазова $\varphi(t, \tau, \omega, x_v, Z, Q)$ частотні характеристики системи.

Для об'єктів, що реалізують функції управління маршрутом в мережі з комутацією пакетів, число вихідних параметрів рівне або більше числа ступенів свободи, які визначаються можливими маршрутами проходження пакетів в цій мережі.

Наприклад, рівняння маршрутизації можна записати у вигляді:

$$M_\gamma(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q_\gamma)x_\gamma = F_\gamma(t, \tau, \frac{d}{dt}, Z_\gamma) \quad (5)$$

$$M_\beta(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q_\beta)x_\beta = F_\beta(t, \tau, \frac{d}{dt}, Z_\beta) \quad (6)$$

$$M_\omega(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q_\omega)x_\omega = F_\omega(t, \tau, \frac{d}{dt}, Z_\omega) \quad (7)$$

де x_γ – відхилення параметра часу затримки передачі пакету від норми; x_β – відхилення параметра імовірності втрати пакету від норми; x_ω – відхилення швидкості передачі інформації від нормованої величини, а також рівняння, що описують коефіцієнт передачі мережного елементу:

$$M_v(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q_v)x_v = F_v(t, \tau, \frac{d}{dt}, Z_v) \quad (8)$$

$$M_\psi(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q_\psi)x_\psi = F_\psi(t, \tau, \frac{d}{dt}, Z_\psi) \quad (9)$$

$$M_\phi(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q_\phi)x_\phi = F_\phi(t, \tau, \frac{d}{dt}, Z_\phi) \quad (10)$$

де v – відхилення амплітудно-частотної характеристики від норми; ψ – відхилення фазо-частотної характеристики від норми; ϕ – відхилення джитера від норми.

У рівняннях (5) – (10) число збурень і управляючих дій може бути будь-яким.

Регульовані параметри можуть бути як залежними, так і незалежними. При функціонуванні мережного елементу (наприклад, модему) зазвичай вважають, що відхилення параметрів від норми відбуваються з відносно великою частотою, але є невеликими по значенню і практично мало впливають на працездатність мережі. Тому при складанні і аналізі рівнянь, що характеризують функціонування мережного елементу АФЧХ каналу можна нехтувати. Крім того, в загальному випадку відхилення АФЧХ каналу компенсується адаптивним коректором або властивістю інваріантності OFDM сигналу. Таким чином, в деяких окремих випадках можна розглядати рівняння функціонування об'єкту по одному з регульованих вихідних параметрів (наприклад, імовірність помилки) незалежно від інших параметрів (наприклад, від АФЧХ).

При контролі об'єкту системи регулювання окремих параметрів можуть виявитися розімкненими, і тоді залежно від вибраного критерію оцінки готовності систем аналіз і синтез системи контролю і управління можуть значно спроститися.

Аналіз рівняння збуреного стану об'єкту в процесах контролю і управління дозволяє визначити функціональний стан об'єкту, синтез системи контролю і оцінки її ефективності. Проте повнішою характеристикою статичного і динамічного стану об'єкту є імовірнісний опис за допомогою законів розподілу імовірності значень параметрів і векторів-операторів.

Оцінка законів розподілу вихідних параметрів мережного елементу методом інтеграції диференціальних рівнянь. Для визначення диференціального закону розподілу системи випадкових вихідних параметрів $x_1, \dots, x_m$ можна скористатися методикою, відомою в теорії автоматичного управління:

Передбачимо, що отримані рішення (2), відомий диференціальний закон розподілу імовірностей $f_0(\tau_0, \tau, X_0, Z_0)$ систем випадкових величин $x_{01}, \dots, x_{0m}, \zeta_{01}, \dots, \zeta_{0k}$ і функція F_i , має кусково-неперервні часткові похідні по координатах x_i , вирішення системи (1) ϕ_i мають другі часткові похідні по x_i також по x_i і t і перші похідні по ζ_i , то диференціальний закон розподілу системи випадкових величин $x_1, \dots, x_m$ визначається рівністю:

$$f(X, Z, t, \tau) = f_0[\phi_1(X, Z, t_0, \tau), \dots, \phi_m(X, Z, t, \tau)]I_\phi \quad (11)$$

$$I_\phi = \begin{vmatrix} \frac{\partial \phi_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \phi_1}{\partial x_m} & \frac{\partial \phi_1}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial \phi_1}{\partial \zeta_k} \\ \frac{\partial \phi_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \phi_m}{\partial x_m} & \frac{\partial \phi_m}{\partial \zeta_1} & \dots & \frac{\partial \phi_m}{\partial \zeta_k} \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad (12)$$

де I_φ – яковіан перетворення.

Проте в рівняння (11) входять невідомі функції φ_i і $\partial\varphi_i/\partial x_j$, що не дозволяє до кінця довести рішення.

Закон розподілу імовірності f можна визначити з рівняння, складеного за умови, що в даний момент часу t $I_\varphi > 0$, тобто $|I_\varphi| = I_\varphi$. Приватні похідні від закону розподілу (11) по I і x_j , необхідні для складання рівняння:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial f_0}{\partial \varphi_i} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} \cdot I_\varphi + f_0 \frac{\partial I_\varphi}{\partial t}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial f_0}{\partial \varphi_i} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j} \cdot I_\varphi + f_0 \frac{\partial I_\varphi}{\partial x_j}, \quad (14)$$

Якщо помножити кожен член рівності (14) на $\partial x_j / \partial t$ і отриманий результат почленно скласти з рівнянням (13), то можна отримати рівняння:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial f}{\partial x_j} = I_\varphi \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial f_0}{\partial \varphi_i} \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial x_j}{\partial t} \right) + f_0 \left(\frac{\partial I_\varphi}{\partial x_j} + \sum_{j=1}^m \frac{\partial I_\varphi}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial x_j}{\partial t} \right), \quad (15)$$

де $F_j = \frac{dx_j}{dt}$ після спрощень і еквівалентних перетворень (15) можна представити у вигляді лінійного рівняння:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{j=1}^m F_j \frac{\partial f}{\partial x_j} + f \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial x_j} = 0, \quad (16)$$

з якого, вирішуючи задачу Коші, знаходимо закон розподілу f . Рівняння (16) справедливе і для яковіана $I_\varphi < 0$. Із загальної теорії диференціальних рівнянь відомо, що для інтеграції рівнянь (16) необхідно знайти $m+1$ перших інтегралів системи звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dt}{I} = \frac{dx_1}{F_1} = \frac{dx_2}{F_2} = \dots = \frac{dx_m}{F_m} = - = \frac{df}{f \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial x_j}}. \quad (17)$$

За m перших інтегралів системи (17) можуть бути прийняті вирази:

$$x_i = \varphi_i(X, Z, \tau_0, \tau) \quad (18)$$

Загальний інтеграл рівнянь (16):

$$f \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial \varphi_j} d\tau_1 \right\} = \Phi[\varphi_\mu(\tau_0, \tau, x_j, \zeta_j)] \quad (19)$$

де $\Phi(\varphi_\mu)$ – довільна формула n перших інтегралів системи (17), визначувана з врахуванням початкових умов; μ – індекс, що набуває значень $1, \dots, m$.

Після перетворення (19) отримуємо диференціальний закон розподілу:

$$f(X, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial \eta_j} d\tau_1 \right\} dZ \quad (20)$$

Якщо врахувати реальні межі зміни величин $\zeta_1, \dots, \zeta_k$, то рівняння (20) можна переписати у вигляді:

$$f(X, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots \int_{\zeta_{k\min}}^{\zeta_{k\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial \eta_j} d\tau_1 \right\} dZ \quad (21)$$

де $\eta_j = \varphi_j[\tau_0, \tau, \varphi_\gamma(\tau, \tau_0, x_\sigma, \zeta_\nu), \zeta_\nu]$ при індексах j, γ, σ , що набувають значень $1, \dots, m, i, \nu$, що набуває значень $1, \dots, k$.

Для оцінки спільних законів розподілу перехідної функції об'єкту необхідно на його вхід подати одиничний перепад і по описаній методиці визначити закон:

$$f(h_1, \dots, h_m, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots k \dots \int_{\zeta_{k\min}}^{\zeta_{k\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial \eta_j} d\tau_1 \right\} dZ. \quad (22)$$

При цьому може виявитися, що немає необхідності проводити оцінку диференціального закону розподілу для кожного моменту часу; при обмеженій спектральній щільності процесів без особливої втрати інформації його можна визначити через інтервал часу:

$$\Delta t = \frac{2\pi}{\omega} \quad (23)$$

де ω – смуга пропускання об'єкту контролю.

Для визначення диференціального m -мірного закону розподілу імпульсних функцій можна скористатися якобіаном перетворення $I = (f_h \rightarrow f_\omega)$ з урахуванням того, що:

$$\omega(t, \tau, \mu, X, Z, Q) = h'(t, \tau, \mu, X, Z, Q).$$

Спільний диференціальний закон розподілу передавальної функції, амплітудно- і фазо-частотних характеристик визначається при гармонійних діях на об'єкт. Скориставшись описаною методикою при дії гармонійних сигналів, можна отримати:

- закон розподілу передатної функції об'єкту:

$$f(W_1, \dots, W_m, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots k \dots \int_{\zeta_{k\min}}^{\zeta_{k\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial \eta_j} d\tau_1 \right\} dZ; \quad (24)$$

- закон розподілу амплітудно-частотної характеристики об'єкту:

$$f(A_1, \dots, A_m, t, \tau) = - \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots k \dots \int_{-\zeta_{k\min}}^{\zeta_{k\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial \eta_j} d\tau_1 \right\} dZ; \quad (25)$$

- закон розподілу фазо-частотної характеристики об'єкту:

$$f(\varphi_1, \dots, \varphi_m, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots k \dots \int_{-\zeta_{k\min}}^{\zeta_{k\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^m \frac{\partial F_j}{\partial \eta_j} d\tau_1 \right\} dZ \quad (26)$$

Без втрати інформації ці закони можна визначити на частотній осі через дискрети:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T_n}, \quad (27)$$

де T_n – мінімальний час регулювання одного з вихідних параметрів.

Таким чином, при обумовлених допущеннях теоретично виявляється можливим точно визначити m -мірні диференціальні закони розподілу вихідних параметрів і векторів-операторів. Необхідний об'єм обчислювальних робіт можна виконати лише на обчислювальних машинах.

На практиці завдяки відсутності кореляції між вихідними параметрами окремих систем об'єкту задача визначення спільного закону розподілу m -параметрів зводиться до завдання визначення закону розподілу для кожного параметра, тобто при $j=1$ і знаходження добутку цих законів. Описана методика в цьому випадку значно спрощується.

Висновки

В статті запропонована модель автоматизованої системи управління інфокомунікаційною мережею, яка складається з двох складових моделей: об'єкта управління (інфокомунікаційна мережа та її елементи) і моделі прийняття рішень системою управління.

Визначено основні критерії, за якими виконується оптимізація характеристик процесу контролю і управління при побудові математичної функціонально-статистичної моделі системи управління. До цих критеріїв відносяться: час, необхідний для виконання процесу в цілому і його складових; імовірність безвідмовної роботи; імовірність виконання завдання різними мережними елементами, що входять в об'єкт, і об'єктом в цілому; імовірність помилки; затримка передачі управляючої інформації; коефіцієнт готовності; відсоток втрати

пакетів; точність роботи різних складових інфокомунікаційної мережі (величина відхилення параметрів від норми); вартість тощо.

Розроблено функціонально-статистичні моделі, що дозволяють визначити імовірнісні характеристики інфокомунікаційної мережі як об'єкту управління на базі методів інтегрування диференціальних рівнянь, Монте-Карло, квазілінійних збурень і канонічних розкладань.

Визначено математичну модель інфокомунікаційної мережі як багатовимірної динамічної системи, що включає автоматизовані системи управління (СУ) спільно з керованим об'єктом.

Список використаної літератури:

1. Л.Н. Беркман, Л.О. Комарова, О.І. Чумак. Основні поняття та теореми теорії інформації : навч. посіб. Київ : ДУІКТ, 2015. 91 с.
2. 6G Wireless Communication Systems: Applications, Opportunities and Challenges / K. Anoh et al. *Future Internet*. 2022. Vol. 14, no. 12. P. 379. URL: <https://doi.org/10.3390/fi14120379>.
3. Ramirez Villamarin C., Suazo E., Oraby T. Regularization by deep learning in signal processing. *Signal, Image and Video Processing*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11760-024-03083-7>.
4. Ferreira M. F. S., Pinto A. N., Hübel H. Quantum Communications. *Fiber and Integrated Optics*. 2020. P. 1–2. URL: <https://doi.org/10.1080/01468030.2020.1712536>
5. Digital Signal Processing Using Deep Neural Networks / B. Shevitski et al. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2023. URL: <https://doi.org/10.2172/1984848>.
6. Zeybek M., Kartal Çetin B., Engin E. Z. A Hybrid Approach to Semantic Digital Speech: Enabling Gradual Transition in Practical Communication Systems. *Electronics*. 2025. Vol. 14, no. 6. P. 1130. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics14061130>.
7. Balaji C., Sivaram P. Adaptive Beamforming and Energy-Efficient Resource Allocation for Sustainable 6G THz Networks. *IETE Journal of Research*. 2025. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1080/03772063.2025.2460672>.

Автори статті

Галаган Наталія – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-8582-3126

Каток Віктор – кандидат технічних наук, головний радник з питань науково-технічної політики АТ «Укртелеком», Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-2063-7872

Беркман Любова – доктор технічних наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-6772-1596

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

ORCID: 0000-0001-7019-9949

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

ORCID: 0009-0007-4760-6375

Authors of the article

Halahan Nataliia – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-8582-3126

Katok Viktor – Candidate of Sciences (technical), Chief Advisor on Scientific and Technical Policy of JSC "Ukrtelecom", Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-2063-7872

Berkman Liubov – Doctor of Sciences (technical), Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-6772-1596

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

ORCID: 0000-0001-7019-9949

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

ORCID: 0009-0007-4760-6375