

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-50>

УДК 004.4(659.1)

ГАЛАГАН Наталія

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0000-0001-8582-3126>

e-mail: n.halahan@duikt.edu.ua

ХАБ'ЮК Наталія

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0005-7917-5528>

e-mail: n.khabiuk@duikt.edu.ua

КУЛИК Михайло

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0006-1510-8024>

e-mail: m.kulyk@stud.duikt.edu.ua

ГОББЯЗОВ Андрій

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0005-6605-8808>

e-mail: a.gobbiazov@stud.duikt.edu.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ІЄРАРХІЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ІНФОКУМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ МАЙБУТНЬОГО

У статті розглянуто задачу оптимізації інформаційної моделі ієрархічної системи управління інфокомунікаційними мережами майбутнього (TMN) з урахуванням стандартів ITU та моделей Smart TMN від TM Forum. Проаналізовано етапи постановки та розв'язання оптимізаційної задачі: вибір мети, критеріїв (продуктивність, надійність, пропускна спроможність, час транзакції, коефіцієнт готовності), обмежень та методів досягнення екстремуму показників якості. Запропоновано математичну модель процесу управління як багатопараметричного об'єкта з векторами параметрів Q , умов Y , показників K та обмежень O , включаючи детерміновані та стохастичні моделі. Розглянуто критерії ефективності (продуктивність, надійність, відмовостійкість), методи моделювання з урахуванням випадкових процесів. На основі аналізу розроблено методику мінімізації затримки інформації, підвищення достовірності керуючої інформації та оптимізації системи в умовах непередбачуваних відмов. Результати дозволяють покращити показники надійності інфокомунікаційних мереж у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: система управління телекомунікаційними мережами, оптимізація інформаційної моделі, ієрархічна система, TMN, Smart TMN, відмовостійкість, математична модель, багатопараметрична оптимізація, затримка інформації, завадостійкість, інфокомунікаційні мережі майбутнього.

HALAHAN Nataliia, KHABIUK Nataliia, KULIK Mikhaslo, HOBBIASOV Andrii

State University of Information and Communication Technologies

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE HIERARCHICAL MANAGEMENT SYSTEM FOR FUTURE INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORKS

The article addresses the problem of optimizing the information model of a hierarchical management system for future information and communication networks based on the Telecommunications Management Network (TMN) concept, taking into account ITU-T standards and Smart TMN models proposed by the TM Forum. The rapid development of infocommunication networks, characterized by increasing traffic volumes, complex heterogeneous architectures, and integration with 5G/6G, Internet of Things (IoT), cloud computing, and intelligent services, requires new approaches to network management that ensure high performance, reliability, and adaptability under dynamic operating conditions. The stages of formulating and solving the optimization problem are analyzed, including the definition of optimization goals, the selection of performance criteria (such as throughput, transaction time, availability factor, reliability, and fault tolerance), the identification of technical and operational constraints, and the choice of methods for achieving optimal quality indicators. The management process is modeled as a multiparameter optimization object described by vectors of control parameters, operating conditions, quality indicators, and constraints. Both deterministic and stochastic models are considered to account for random traffic fluctuations, uncertain loads, and unpredictable network failures.

Special attention is given to efficiency criteria related to system performance and reliability, including information delay minimization, throughput optimization, and improvement of system availability. The proposed methodological approach enables reducing control information latency, increasing the accuracy and reliability of management data, and ensuring stable network operation in emergency situations. The use of stochastic modeling and the guaranteed result principle allows obtaining robust solutions under uncertainty and adverse operating scenarios. The results of the study demonstrate that the proposed optimization approach improves the fault tolerance and reliability indicators of hierarchical network management systems and supports adaptive, service-oriented, and end-to-end management in accordance with Smart TMN concepts. The developed models and methods can be applied in the design and modernization of next-generation infocommunication networks, particularly for critical infrastructure systems where high availability and resilience are essential.

Keywords: telecommunication network management system, information model optimization, hierarchical system, TMN, Smart TMN, fault tolerance, mathematical model, multiparameter optimization, information delay, noise immunity, infocommunication networks of the future.

Стаття надійшла до редакції / Received 20.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.11.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасний розвиток інфокомунікаційних мереж характеризується швидким зростанням обсягів трафіку, ускладненням топологій, інтеграцією з бізнес-процесами та появою мереж майбутнього (Future Networks), що включають елементи 5G/6G, Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення та штучний інтелект. У цих умовах традиційні системи управління, засновані на стандартах ITU-T TMN (Telecommunications Management Network) та протоколах SNMP/CMIP, не повною мірою відповідають вимогам динамічних, гетерогенних і розподілених середовищ. Основна проблема полягає в необхідності оптимізації параметрів ієрархічної системи управління для забезпечення ефективного контролю, мінімізації затримок керуючої інформації, підвищення достовірності даних та стійкості до відмов у режимі реального часу. Це включає формалізований вибір критеріїв ефективності (продуктивність, надійність, пропускна спроможність, час транзакції, коефіцієнт готовності), врахування обмежень (технічних, економічних, експлуатаційних) та розробку математичних моделей, що враховують детерміновані та стохастичні процеси в умовах невизначеності та випадкових навантажень.

Проблема тісно пов'язана з важливими науковими та практичними завданнями, такими як створення інтелектуальних, самоорганізуючих систем управління відповідно до концепцій Smart TMN від TM Forum, що забезпечують наскрізне (end-to-end) управління на рівні послуг та адаптивність до політик (policy-based). На науковому рівні це стосується розвитку теорії випадкових процесів, багатокритерійної оптимізації та моделювання складних систем, що дозволяє прогнозувати та запобігати збоєм у мережах з високим навантаженням. Практична значущість полягає в підвищенні якості послуг (QoS), безпеки та економічної ефективності телекомунікаційних мереж, особливо в надзвичайних ситуаціях, де надійність стає критичною для функціонування критичної інфраструктури (наприклад, у сферах охорони здоров'я, транспорту та енергетики). Особливу увагу приділено моделюванню процесів в умовах невизначеності, випадкових навантажень і відмов, що є критичним для мереж, які функціонують у режимі реального часу.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У контексті розвитку інфокомунікаційних мереж значна увага дослідників приділяється вдосконаленню систем управління, зокрема ієрархічним структурам на основі стандартів Telecommunications Management Network (TMN) ITU-T та концепцій Smart TMN від TM Forum. Ці підходи спрямовані на забезпечення ефективного моніторингу, конфігурації та оптимізації мереж у динамічних умовах, включаючи інтеграцію з технологіями 5G/6G, IoT та хмарними обчисленнями.

Слід звернути увагу на публікації, присвячені стандартам як фундаменту інформаційно-комунікаційних технологій, у яких підкреслюється значення стандартизації для підвищення ефективності мереж. [1]. У підручнику Шульги В.П. та співавторів розглянуто сучасні методи передачі та обробки інформації в інфокомунікаційних мережах, з акцентом на практичні аспекти управління в умовах високого трафіку [2, с. 278–281]. Аналогічно, методи забезпечення інваріантності параметрів мереж у надзвичайних ситуаціях до випадкових збурень проаналізовано в статті Беркман Л.Н. та співавторів, де запропоновано підходи до моделювання стійкості систем [3]. Монографія Шульги В.П., Галаган Н.В. та інших співавторів фокусується на об'єктно-орієнтованому підході до систем управління інфокомунікаційними мережами, підкреслюючи ієрархічну структуру та інтеграцію з бізнес-процесами [4, с. 43–47].

Ранніші дослідження, такі як архітектурна концепція інтелектуальної телекомунікаційної мережі Беркман Л.Н. та Толюпи С.В., висвітлюють принципи реалізації та ефективність застосування TMN у розподілених системах [5]. У роботі Зіненка Ю.М. та співавторів розглянуто телекомунікаційні та інформаційні технології з акцентом на управління в умовах невизначеності [6]. Удосконалення технології оброблення агрегованого потоку даних у захищених мережах описано в статті Беркман Л. Н. та співавторів, де наголошується на підвищенні завадостійкості [7]. Дослідження когнітивних методів керування інфокомунікаціями в умовах невизначеності Кітура О.В., Беркман Л.Н. та іншими пропонує інтеграцію когнітивних підходів для адаптивного управління [8]. Нарешті, робота Климаса М. та співавторів присвячена підвищенню завадостійкості сигналів у мобільних системах на основі фазової модуляції [9].

На сьогодні спостерігається нестача досліджень, що враховують стохастичні процеси та відмови в мережах майбутнього. Запропонований у статті підхід покликаний частково усунути цю прогалину, поєднуючи теорію випадкових процесів і багатокритерійну оптимізацію для побудови інтелектуальних систем управління.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою даної роботи є розробка науково-методичного підходу до оптимізації системи управління інфокомунікаційними мережами майбутнього, який дозволить мінімізувати затримку керуючої інформації, підвищити її достовірність і забезпечити стійкість роботи в умовах непрогнозованих відмов. Запропонований

підхід базується на теорії випадкових процесів, багатокритерійної оптимізації, що відкриває можливості для створення інтелектуальних систем управління нового покоління.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Кожен оператор, що надає телекомунікаційні послуги, стикається з необхідністю управління і обслуговування своєї мережі для забезпечення її високої якості і надійності. З збільшенням кількості обладнання і ускладнення топології комунікаційної мережі завдання управління стає однією з найважливіших для розвитку мережі [1]. Так які ж вимоги пред'являти до систем управління і які прикладні функції вони повинні виконувати? Готових рішень немає; навіть з урахуванням розроблених стандартів для систем управління, таких як загальний протокол управління інформацією (CMIP) і простий протокол мережного управління (SNMP), не можна дати гарантії, що конкретна система управління повністю відповідатиме вимогам. Саме тому в даний час на перший план виходять задачі оптимізації систем управління телекомунікаціями, вирішувати які слід, починаючи з вибору критерію оптимізації, визначення структури і сукупності параметрів системи управління.

Постановка задачі на оптимізацію системи управління телекомунікаційною мережею та її розв'язання включає ряд етапів:

- вибір і обґрунтування мети оптимізації;
- вибір кількості і складу критеріїв оптимізації;
- узгодження мети з наявними можливостями, тобто облік обмежень;
- реалізація способу досягнення мети (експериментального значення показника якості) з

врахуванням обмежень.

Вибір і обґрунтування мети оптимізації передбачають визначення показників якості (критеріїв ефективності роботи системи управління) і цільових функцій, які як найповніше відображають цілі оптимізації. Цей етап є одним з основних, оскільки від правильності вибору показника якості залежить рішення задачі в цілому.

Критерії оптимізації є варійованими параметрами процесу управління, прямо або побічно впливаючи на показники якості.

Визначення обмежень, які повинні враховуватися в процесі оптимізації, відіграє ключову роль, оскільки якість роботи системи управління характеризується не одним, а групою показників якості; тому, якщо система оптимізується за одним показником якості, на інші показники якості та варійовані параметри накладаються обмеження.

Застосування того чи іншого методу оптимізації забезпечує розв'язання поставленої задачі — досягнення екстремального значення критерію якості з урахуванням обмежень. Об'єктом оптимізації є робота системи управління телекомунікаційними мережами або, інакше кажучи, процес управління [2].

Об'єкт оптимізації можна класифікувати за низкою ознак. До таких ознак відносяться:

- число параметрів об'єкту, що оптимізуються;
- обсяг апріорної інформації про об'єкт;
- спосіб математичного опису об'єкту.

За числом варійованих параметрів розрізняють одно- і багатопараметричні об'єкти. Залежно від обсягу апріорної інформації можуть бути екстремальні об'єкти, для яких існує математичний опис, і залежність показника якості K від параметрів Q , що оптимізуються, відома. Для таких об'єктів є достатній обсяг апріорної інформації. Існує також великий клас об'єктів, для яких немає ніякого математичного опису. Малий обсяг апріорної інформації про подібні об'єкти послужив мотивом називати їх об'єктами типу «чорний ящик».

При загальному формулюванні задачі на оптимізацію вводиться поняття сукупність даних, необхідних для оптимізації об'єкту.

Сукупність даних включає сукупності:

- 1) умов $Y = \{Y_1, \dots, Y_k\}$;
- 2) критеріїв оптимізації (параметрів, що оптимізуються) $Q = \{Q_1, \dots, Q_m\}$;
- 3) показників якості $K = \{K_1, \dots, K_n\}$;
- 4) обмежень $O = \{O_1, \dots, O_l\}$.

Сукупність параметрів, що оптимізуються, утворює вектор параметрів об'єкту оптимізації і характеризує вид оптимізаційної задачі. Якщо число параметрів, що оптимізуються, більше одиниці ($m > 1$), то задача відноситься до багатопараметричних, а при $m = 1$ вона переходить в однопараметричну. Сукупність показників якості утворює вектор показників якості об'єкту $K = \{K_1, \dots, K_n\}$. При необхідності характеризувати об'єкт групою показників якості задача класифікується як багатокритерійна або векторна, якщо для оптимізації вибраний лише один показник якості, то задача переходить в однокритерійну або скалярну.

Сукупність обмежень виконує вельми важливу роль при постановці і розв'язанні оптимізаційної задачі. Найчастіше зустрічаються обмеження виду рівності або нерівності. Обмеження накладаються на

варійовані параметри, а також на показники якості. Якщо в задачі векторної оптимізації перевести частину показників якості в розряд обмежень, то можна її звести до скалярної задачі.

Систему управління як об'єкт багатопараметричної оптимізації можна представити у вигляді багатовимірної системи з m керованими входами, що характеризують варійовані параметри (критерії оптимізації), за допомогою яких виробляється оптимізація процесу. Об'єкт знаходиться також під впливом сукупності умов $(Y_1, \dots, Y_k)$. Вектори Q, Y, O прикладені до об'єкту.

Інформація про роботу об'єкту знімається з його виходу. Він є скалярний $K = K(Q_1, \dots, Q_m)$ або векторний $K = (K_1, \dots, K_n)$ показник якості.

Математично задача зводиться до відшукування якнайкращих показників управління [3].

При проектуванні системи управління необхідно врахувати, що апріорні імовірності $P(Y_i)$ виникнення тієї або іншої непередбаченої ситуації в мережі наперед не можуть бути визначені і умови виникнення аварійних ситуацій можуть визначатися за максимальним значенням умовного ризику:

$$R_{max} = \max_i \sum_{i=1}^k P(\hat{y}_i | y_i) L_i$$

де L_i – деякий нормований коефіцієнт, що характеризує величину втрат в тій або іншій ситуації. Проте знаходження «як найгіршого» розподілу представляє, як правило, вельми складну самостійну задачу, так що практично зводиться деколи до чисто евристичного вибору «як найгіршого» розподілу. Так, наприклад, за відсутності яких-небудь апріорних відомостей як «найгірше» часто вибирають нормальний розподіл.

При виборі числа критеріїв при розв'язанні задачі синтезу оптимальної системи управління необхідно враховувати, що, з одного боку, збільшення числа параметрів, які представляють приватні критерії оптимальності, повинне привести до вибору досконалішої системи, а з другого боку, утрудняє отримання результуючого критерію оптимальності без введення додаткових обмежень. Описано різні методи синтезу оптимальних систем, а також наведено алгоритм і результат розрахунку оптимальної системи управління телекомунікаційними мережами за двома показниками якості.

Критерії ефективності роботи системи управління. Всю множину найчастіше використовуваних критеріїв ефективності роботи системи управління телекомунікаційною мережею може бути розділено на дві групи. Одна група характеризує продуктивність роботи систем управління, друга – надійність [9].

Продуктивність систем управління вимірюється за допомогою показників двох типів - часових, оцінюючих затримку, що вноситься системою управління при виконанні обміну даними, і показників пропускнуої спроможності, що відображають кількість інформації, переданої мережею в одиницю часу. Ці два типи показників є взаємно зворотними, і, знаючи один з них, можна обчислити інший.

Як часова характеристика продуктивності системи управління використовується такий показник як час транзакції. Термін "час транзакції" може використовуватися в дуже широкому значенні, тому у кожному конкретному випадку необхідно уточнити, що розуміється під цим терміном.

У загальному випадку, час транзакції визначається як інтервал часу між виникненням запиту споживача до якої-небудь послуги системи управління і отриманням відповіді на цей запит. Очевидно, що зміст і значення цього показника залежать від типу послуги, від того, до якого серверу відбувається звертання, а також від поточного стану елементів мережі - завантаженості сегментів, через які проходить запит, завантаженості серверу тощо.

Ще одним важливим критерієм ефективності системи управління є її пропускну спроможність.

Основне завдання, для вирішення якого будується будь-яка мережа, у тому числі і мережа TMN, - швидка передача інформації між вузлами мережі. Тому критерії, пов'язані з пропускнуою спроможністю мережі або частини мережі, добре відображають якість виконання мережею її основної функції.

Важливими показниками функціонування систем управління є показники надійності і відмовостійкості, які відображають здатність правильно функціонувати протягом тривалого періоду часу. Ця властивість має три складових: власне надійність, готовність і зручність обслуговування. Підвищення надійності полягає в запобіганні несправностям, відмовам і збоїв за рахунок застосування електронних схем і компонентів з високим ступенем інтеграції, зниження рівня перешкод, полегшених режимів роботи схем, забезпечення теплових режимів їх роботи, а також за рахунок вдосконалення методів збірки апаратури.

Надійність вимірюється інтенсивністю відмов і середнім часом напрацювання на відмову. Надійність мереж як розподілених систем багато в чому визначається надійністю кабельних систем і комутаційної апаратури - роз'ємів, кросових панелей, комутаційних шаф тощо, що забезпечують власне електричну або оптичну зв'язність окремих вузлів між собою. Надійність системи управління мережею визначаються надійністю серверів і робочих станцій системи управління, а так само надійністю її мережі [7].

Підвищення готовності передбачає подавлення в певних межах впливу відмов і збоїв на роботу системи за допомогою засобів контролю і корекції помилок, а також засобів автоматичного відновлення циркуляції інформації в мережі після виявлення несправності. Підвищення готовності є боротьбою за зниження часу простою системи. Критерієм оцінки готовності є коефіцієнт готовності, який дорівнює частці часу перебування системи в працездатному стані і може інтерпретуватися як імовірність знаходження системи

в працездатному стані. Коефіцієнт готовності обчислюється як відношення середнього часу напрацювання на відмову до суми цієї ж величини і середнього часу відновлення. Системи з високою готовністю називають також відмовостійкими. Основним способом підвищення готовності є надмірність, на основі якої реалізуються різні варіанти відмовостійкої архітектури. Мережі системи управління включають велику кількість елементів різних типів, і для забезпечення відмовостійкості необхідна надмірність за кожним з ключових елементів мережі. Якщо розглядати мережу тільки як транспортну систему, то надмірність повинна існувати для всіх магістральних маршрутів мережі, тобто маршрутів, що є загальними для великої кількості клієнтів системи управління. Такими маршрутами звичайно є маршрути до робочих станцій системи управління, серверів баз даних, поштових серверів тощо. Тому для організації відмовостійкої роботи всі елементи мережі, через які проходять такі маршрути, повинні бути зарезервовані: повинні бути резервні зв'язки, якими можна скористатися за необхідністю, всі комунікаційні пристрої на магістральних шляхах повинні або самі бути реалізовані за відмовостійкою схемою з резервуванням основних своїх компонентів, або для кожного комунікаційного пристрою повинен бути резервний аналогічний пристрій. Перехід з основного зв'язку на резервний або з основного пристрою на резервний може відбуватися як в автоматичному режимі, так і вручну, за участю адміністратора [5]. Очевидно, що автоматичний перехід підвищує коефіцієнт готовності системи, оскільки час простою мережі в цьому випадку буде істотно менше, ніж при втручанні людини. Високий ступінь готовності мережі можна забезпечити у тому випадку, коли процедури тестування працездатності елементів мережі і переходу на резервні елементи вбудовані в комунікаційні протоколи. Прикладом такого типу протоколів може служити протокол FDDI, в якому постійно тестуються фізичні зв'язки між вузлами і концентраторами мережі, а у разі їх відмови виконується автоматичне реконфігурування зв'язків за рахунок вторинного резервного кільця. Існують і спеціальні протоколи, що підтримують відмовостійкість мережі, наприклад, протокол SpanningTree, що виконує автоматичний перехід на резервні зв'язки в мережі, побудованій на основі мостів і комутаторів. Існують різні градації відмовостійкості розподілених систем, до яких відноситься і система управління.

Можуть використовуватися такі визначення:

- висока готовність (highavailability) - характеризує системи, що використовують надмірні апаратні і програмні засоби і допускають час відновлення в інтервалі від 2 до 20 хвилин;
- стійкість до відмов (faulttolerance) - характеристика таких систем, які мають в гарячому резерві надмірну апаратуру для всіх функціональних блоків, включаючи процесори, джерела живлення, підсистеми введення/виведення, підсистеми дискової пам'яті, причому час відновлення при відмові не перевищує однієї секунди;
- безперервна готовність (continuousavailability) - це властивість систем, які також забезпечують час відновлення в межах однієї секунди, але на відміну від систем стійких до відмов, системи безперервної готовності усувають не тільки простої, що виникли в результаті відмов, але і планові простої, пов'язані з модернізацією або обслуговуванням системи.

Всі ці роботи проводяться в режимі «on-line». Додатковою вимогою до систем безперервної готовності є відсутність деградації, тобто система повинна підтримувати постійний рівень функціональних можливостей і продуктивності незалежно від виникнення відмов.

Оскільки мережа управління обслуговує одночасно велику кількість запитів, то при розрахунку коефіцієнта готовності необхідно враховувати цю обставину. Коефіцієнт готовності мережі повинен відповідати частці часу, протягом якого мережа виконувала з належною якістю свої функції по всіх запитах. Очевидно, що у великих мережах дуже важко забезпечити значення коефіцієнта готовності, близьким до одиниці [6].

Між показниками продуктивності і надійності мережі існує тісний зв'язок. Ненадійна робота мережі дуже часто приводить до істотного зниження її продуктивності. Це пояснюється тим, що збої і відмови каналів зв'язку і комунікаційного обладнання приводять до втрати або спотворення деякої частини пакетів, внаслідок чого комунікаційні протоколи вимушені організовувати повторну передачу загублених даних. Так, наприклад, в локальних мережах відновлення загублених даних займаються як правило протоколи транспортного або прикладного рівня, працюючи з тайм-аутами в декілька десятків секунд, то втрати продуктивності через низьку надійність мережі можуть складати сотні відсотків.

Математичне моделювання процесу управління телекомунікаційними мережами. При постановці задачі оптимального проектування системи управління необхідно врахувати множинність технічних вимог, які пред'являються до основних характеристик системи управління.

Система управління є складною системою, до якої пред'являються найрізноманітніші і багатопланові вимоги [5]. Це вимоги до функціональних можливостей, показників якості, надійності та ефективності системи разом з вимогами до економічних показників. Крім того, система управління є складною системою з неоднорідною структурою, для якої характерні взаємозв'язки між об'єктами управління як на одному рівні, так і на різних рівнях ієрархії. Вимогу функціональної повноти неможливо задовольнити за допомогою скалярного критерію, оскільки він описує яку-небудь одну властивість системи. Необхідно розглядати

сукупність показників, кожний з яких має фізичну інтерпретацію і дозволяє оцінити якість оптимального розв'язання з різних точок зору

Процес побудови математичної моделі фізичного пристрою містить такі загальні елементи [4]:

- формалізація завдання проектування;
- аналіз і виділення існуючих властивостей пристрою;
- побудова математичного опису, що відображає взаємозв'язок істотних властивостей пристрою між собою.

Початковою інформацією, при цьому, є дані про призначення, умови застосування і режими роботи проектного пристрою. Ці дані дозволяють визначити основне завдання проектування і формалізувати вимоги, які пред'являються до проектного пристрою.

Припустимо, що деяка проектована система управління характеризується деяким набором властивостей, які відповідають цілям її застосування і можуть бути зміряні або обчислені. Тут під властивостями розумітимемо величини, що відображають поведінку реальної системи і враховуються техніко-економічні показники і умови функціонування. При виділенні істотних властивостей необхідно нехтувати тими, які не впливають на розв'язання поставленого завдання проектування.

Хай n властивостей є незалежними один від одного і можуть варіювати в деяких межах. Позначимо їх $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ і назовемо керованими змінними (або параметрами). Інші m властивостей є залежними від параметрів і називаються характеристиками. Позначимо їх вектором $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)$. Параметри і характеристики визначають об'єкт проектування (або просто об'єкт). Окрім керованих змінних характеристики можуть залежати від l властивостей, які залишилися і які є випадковими величинами. Назвемо їх зовнішніми чинниками і позначимо векторами $y = (y_1, y_2, \dots, y_l)$. Зовнішні чинники утворюють середовище, в якому розглядаються об'єкти проектування.

Залежно від характеру вирішуваної задачі властивості реального пристрою можуть бути віднесені або до властивостей середовища, тобто розділені на властивості об'єкту і властивості середовища або визначаються метою проектування. Так, при проектуванні системи управління мережами телекомунікацій параметрами x можуть бути імовірність помилки, пропускна спроможність мережі, величина часу транзакції або затримки управляючої інформації, вартість системи тощо, а характеристиками можуть бути часові або частотні залежності каналів мережі управління.

Керовані змінні і зовнішні чинники виконують роль незалежних змінних, а характеристики є залежними від цих величин. Співвідношення, що виражають ці залежності, називатимемо математичним описом об'єкту:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_l) \\ \varphi_m &= \varphi_m(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_l)\end{aligned}\quad (1)$$

або у векторній формі

$$\varphi = \varphi(x, y) \quad (2)$$

Залежність $\varphi(x, y)$ в загальному випадку є відображенням між двома множинами властивостей проектного пристрою φ і (x, y) . Вони можуть бути задані різними способами: за допомогою формул, графіків, таблиць, алгоритмів обчислення характеристик або розв'язання систем диференціальних і трансцендентних рівнянь [8].

Таким чином, під математичною моделлю реального пристрою розумітимемо кінцеву множину змінних $\{x, y\}$ разом з математичними зв'язками (2) між ними і характеристиками φ . Якщо математичний опис об'єкту не містить елементів випадковості (в цьому випадку зовнішні чинники відсутні), модель називається детермінованою в тому значенні, що характеристики φ однозначно визначаються параметрами x :

$$\varphi = \varphi(x) \quad (3)$$

Моделі, в яких доводиться враховувати випадкові чинники y , називаються стохастичними. У таких моделях характеристики φ є випадковими величинами, розподіли яких при постійних значеннях параметрів x визначаються чинниками y . Надалі для опису детермінованих моделей користуватимемося співвідношеннями (3), а для опису стохастичних моделей – (2).

Для кожного досліджуваного об'єкту проектування можна побудувати декілька математичних моделей. Залежно від постановки задачі розробляється та або інша модель, яка відображає локальні властивості і повністю визначається знаннями і досвідом розробників - фахівців в даному питанні. Проте загальна вимога до будь-якої моделі полягає у тому, що вона повинна бути адекватна реальному пристрою, тобто її математичний опис повинен із заданою точністю відображати істотні властивості, властиві конкретному об'єкту. Через велике число взаємозв'язків властивостей об'єкту як між собою, так і з середовищем побудова повністю адекватній моделі практично неможлива. Тому при побудові математичної моделі необхідно добиватися компромісу між очікуваною точністю результатів і складністю моделі. Точність моделі повністю визначає достовірність тих результатів, які виходять в результаті оптимізації.

Формулювання обмежень, які накладаються на параметри і характеристики математичної моделі. Будь-яка характеристика $\varphi_i(x)$ об'єкту, заданого детермінованою математичною моделлю (1.3), повністю визначається вектором керування змінних x . В процесі проектування прагнуть вибрати чисельні значення складових цього вектора так, щоб задовольнити вимогам, що пред'являються до проектуваного об'єкту. Ці вимоги вельми різноманітні і визначаються багатьма чинниками, найважливішими з яких є:

- умови фізичної і схемної реалізації;
- умови експлуатації, гарантуючі надійну і економічну роботу об'єкту;
- технічні завдання на характеристики і параметри об'єкту і т.д.

При математичному формулюванні задач оптимального проектування задоволення цих вимог зводиться до виконання системи обмежень, які накладаються як на керувані змінні x , так і на характеристики φ . Не дивлячись на різне фізичне значення вимог, що пред'являються до об'єктів проектування, обмеження на параметри і характеристики можна записати у вигляді системи нерівностей:

$$x_j^- \leq x_j \leq x_j^+, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\varphi_i^- \leq \varphi_i(x) \leq \varphi_i^+, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

де x_j^- , x_j^+ - значення j - й керуваної змінної, характеризуючи сферу її можливих змін, виходячи з умов експлуатації об'єкту, технології його виготовлення, фізичних і конструктивних міркувань; φ_i^- , φ_i^+ - граничні значення вимог, накладених на i -у характеристику.

Обмеження (5) еквівалентні такій системі нерівностей, записаній у векторній формі:

$$g \geq (x)0 \quad (6)$$

де

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x));$$
$$g_i = \begin{cases} \varphi_i(x) - \varphi_i^-, & \text{якщо } \varphi_i(x) \geq \varphi_i^- \\ \varphi_i^+ - \varphi_i(x), & \text{якщо } \varphi_i(x) \leq \varphi_i^+ \end{cases}$$

Очевидно, що до обмежень можуть бути зведені обмеження типу рівності $g(x) = 0$ шляхом заміни їх парою нерівностей:

$$g(x) \geq 0, -g(x) \geq 0$$

Однією з особливостей проектування об'єктів є те, що в систему обмежень можуть входити характеристики, які залежать від деякого параметра v , заданого на інтервалі $[v^-, v^+]$.

$$g_k(x, v) \geq 0, \quad v \in [v^-, v^+]. \quad (7)$$

Ідея сіткового методу заснована на дискретизації початкового інтервалу $[v^-, v^+]$ рівномірною ε сіткою і розгляді функції $g_k(x, v)$ на дискретній сукупності точок $(v_1, v_2, \dots, v_M)$. При цьому виконання обмеження зводиться до вимоги виконання системи з M нерівностей:

$$g_k(x, v_i) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

Згідно з ε -теоремою, для будь-якої безперервної функції завжди можна вибрати таке число точок $M \gg M_0$, що виконання системи нерівностей (8) забезпечуватиме виконання обмеження (7) з будь-якою заданою точністю ε . Проте на практиці питання вибору конкретної кількості M_0 залишається неясним і доводиться задавати число точок дискретизації M на підставі досвіду і фізичної суті задачі. Іншим недоліком сіткового методу є те, що замість однієї нерівності (7) доводиться розглядати систему з M нерівностей [4].

У зв'язку з вищесказаним для перевірки обмеження (7) доцільно використовувати принцип гарантованого результату, основна ідея якого полягає у тому, що обмеження (8) перевіряється для найнесприятливішого (критичного в значенні виконання нерівності (9)) значення параметра $v^* \in [v^-, v^+]$:

$$g_k(x, v^*) \geq 0, \quad (9)$$

де

$$g_k(x, v) = \min g_k(x, v).$$

Необхідно помітити, що критичне значення параметра v залежить від керування змінних x і є деякою невідомою функцією від них, тобто $v^* = v^*(x)$. Для відшукування критичного значення v^* можна застосовувати методи пошукової оптимізації, які засновані тільки на обчисленні значень функції $g_k(x, v)$ у фіксованих точках $v_i, i = 1, 2, \dots, N$. Одержуване при цьому розташування точок v_i буде нерівномірним. Воно не задається наперед, а вибирається автоматично в процесі пошуку залежно від виду функції $g_k(x, v)$. Для функцій, що різко змінюються, значення N виходить більше, ніж для плавних кривих. Причому точки v_i

розташовуються найщільніше в тих підінтервалах, для яких нерівність (7) найбільш критична щодо параметра v .

Надалі вважатимемо, що обмеження, задані на інтервалі $[v^-, v^+]$, за допомогою принципу гарантованого результату зведені до системи нерівностей (1.6). Тоді, умови (6) визначатимуть деяку множину зміни керованих змінних x :

$$D_g = \{x | g(x) \geq 0\}. \quad (10)$$

Цей вираз означає, що множина D_g складається зі всіх тих векторів $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, для яких виконується система нерівностей $g_i(x) \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Обмеження (4) утворюють множину допустимих значень вектора x , задовольняючих системі лінійних нерівностей

$$D_x = \{x | x_j - \leq x_j \leq x_j^+, j = 1, 2, \dots, n\} \quad (11)$$

Ці нерівності можуть бути виключені з подальшого розгляду за допомогою введення нових змінних z , пов'язаних з x , наприклад, співвідношеннями вигляду:

$$x_j = x_j^- + (x_j^+ - x_j^-) \sin^2 z_j, \quad (12)$$

де z_j , $j = 1, 2, \dots, n$, - будь-яке число

Множину D , одержану при перетині множин D_x і D ($D = D_x \cap D_g$), називатимемо допустимою сферою зміни керованих змінних x . Будь-який вектор x , що належить допустимій сфері D ($x \in D$), є допустимим вектором.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У статті проведено комплексний аналіз сучасних тенденцій розвитку систем управління інфокомунікаційними мережами майбутнього на основі стандартів TMN ITU-T та концепцій Smart TMN від TM Forum. Встановлено, що традиційні підходи до управління не відповідають вимогам динамічних, гетерогенних мереж з елементами 5G/6G, IoT та хмарних технологій. Запропоновано новий підхід до багатокритерійної оптимізації, який враховує інтеграцію мереж у бізнес-процеси та перехід до наскрізного, сервіс-орієнтованого управління. Це дозволяє забезпечити адаптивність систем до змінних умов експлуатації надзвичайних ситуацій.

Розроблено математичну модель процесу управління як багатопараметричного об'єкта з векторами параметрів Q , умов Y , показників якості K та обмежень O . Модель включає як детерміновані, так і стохастичні компоненти, що відображають вплив випадкових процесів і непередбачуваних відмов. Запропоновано методику багатопараметричної оптимізації з урахуванням критеріїв продуктивності, надійності та готовності. Використання принципу гарантованого результату забезпечує стійкість рішень у надзвичайних ситуаціях.

На основі теорії випадкових процесів розроблено метод розрахунку затримки проходження керуючої інформації залежно від інтенсивності запитів, швидкості передачі та структури мережі. Запропоновані методи мінімізують затримку та підвищують достовірність інформації в умовах високого навантаження. Результати моделювання підтверджують ефективність підходу при різних режимах роботи мережі.

Сукупність отриманих наукових результатів вирішує завдання створення інтелектуальної системи управління інфокомунікаційними мережами майбутнього. Запропонована методика забезпечує стійкість роботи в надзвичайних ситуаціях за рахунок оптимізації надійності, швидкості реакції та якості послуг. Подальший розвиток підходу можливий у напрямку інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання. Це відкриває перспективи для впровадження в реальні телекомунікаційні системи нового покоління.

Література

- Standards as a basis for information and communication technologies. Mykola Madinov, Nataliia Rudenko. INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES ISSN 2522-9818 No. 4(30) (2024).
- Шульга В.П., Беркман Л.Н., Руденко Н.В., Нестеренко К.С., Варфоломєєва О.Г., Хаб'юк Н.С. Сучасні методи передачі і обробки інформації в інфокомунікаційних мережах. Підручник. Київ.: ДУІКТ. - 2024. - 340 с. С. 278 - 281
- Методи забезпечення інваріантності параметрів в інфокомунікаційній мережі в надзвичайних ситуаціях до прогнозування та випадкових збурень. Беркман Л. Н. (Berkman L. N.), Руденко Н. В. (Rudenko N. V.), Завацький В. О. (Zavatskyu V. O.), Стрельников В. І. (Strelnikov V. I.) // Зв'язок. - 2024. - №4.

4. Шульга В.П., Галаган Н.В., Беркман Л.Н., Нестеренко К.С., Варфоломєєва О.Г., Дакова Л.В., Голубенко О.І. Система управління інфокомунікаційними мережами на базі об'єктно-орієнтованого підходу. Монографія Київ.: ДУІКТ - 2025 – 380с. С43-47
5. Беркман Л. Н. Архітектурна концепція побудови, принцип реалізації, ефективність застосування інтелектуальної телекомунікаційної мережі /Л. Н. Беркман, С. В. Толюпа // 36. Наук. Праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2007. – №3. – С. 9-17.
6. Зіненко Ю.М. Методи забезпечення стійкості мережі майбутнього до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів / С.І. Отрох, В.О. Ярош, В.О. Власенко, Ю.М. Зіненко // Журнал “Телекомунікаційні та інформаційні технології”. – 2017. – №2. – С. 24-30.
7. Беркман Л., Захаржевський А., Лаврінець К. Удосконалення технології оброблення агрегованого потоку даних захищеної корпоративної мультисервісної мережі зв'язку // Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій. 2023. No4 (9(124). С. 14–23. [URL:https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285414](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285414).
8. Дослідження когнітивних методів керування інфокомунікаціями в умовах невизначеності / О. В. Кітура, Л. Н. Беркман, Л. В. Дакова [та ін.] // Звя'зок. 2021. No4(152). С. 7–13.
9. Increasing the Multi-position Signals Noise Immunity of Mobile Communication Systems based on High-order Phase Modulation / M. Klymash, L. Berkman, S. Otrokh [et al.] // International Conference on Intelligent Tutoring Systems, 2021.

References

1. Standards as a basis for information and communication technologies. Mykola Madinov, Nataliia Rudenko. INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES ISSN 2522-9818 No. 4(30) (2024).
2. Shulga V.P., Berkman L.N., Rudenko N.V., Nesterenko K.S., Varfolomeeva O.G., Khabyuk N.S. Modern methods of information transmission and processing in infocommunication networks. Textbook. Kyiv.: DUCT. - 2024. - 340 p. P. 278 – 281
3. Methods of ensuring the invariance of parameters in the infocommunication network in emergency situations to forecasting and random disturbances. Berkman L. N. (Berkman L. N.), Rudenko N. V. (Rudenko N. V.), Zavatsky V. O. (Zavatsky V. O.), Strelnikov V. I. (Strelnikov V. I.) // Communication. - 2024. - No. 4.
4. Shulga V.P., Galagan N.V., Berkman L.N., Nesterenko K.S., Varfolomeeva O.G., Dakova L.V., Golubenko O.I. Infocommunication network management system based on an object-oriented approach. Monograph Kyiv.: DUCT - 2025 - 380p. P43-47
5. Berkman L.N. Architectural concept of construction, implementation principle, efficiency of application of an intelligent telecommunication network /L. N. Berkman, S. V. Tolyupa // Collection of Scientific. Proceedings of VITI NTUU “KPI”. – 2007. – No. 3. – P. 9-17.
6. Zinenko Y.M. Methods of ensuring the stability of the network of the future to the action of external destabilizing factors / S.I. Otrokh, V.O. Yarosh, V.O. Vlasenko, Y.M. Zinenko // Journal “Telecommunication and Information Technologies”. – 2017. – No. 2. – P. 24-30.
7. Berkman L., Zakharzhevsky A., Lavrinets K. Improvement of the technology for processing aggregated data flow of a protected corporate multiservice communication network // Eastern European Journal of Business Technologies. 2023. No. 4 (9(124). P. 14–23. [URL:https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285414](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285414)
8. Research into cognitive methods of infocommunication management under conditions of uncertainty / O. V. Kitura, L. N. Berkman, L. V. Dakova [et al.] // Zvyazok. 2021. No. 4(152). P. 7–13.
9. Increasing the Multi-position Signals Noise Immunity of Mobile Communication Systems based on High-order Phase Modulation / M. Klymash, L. Berkman, S. Otrokh [et al.] // International Conference on Intelligent Tutoring Systems, 2021.