УДК 621.3.052.63:004.8
DOI: 10.31673/2412-9070.2025.020614

Н. В. ГАЛАГАН, канд. техн. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-8582-3126
Л. Н. БЕРКМАН, доктор техн. наук, професор;
ORCID: 0000-0002-6772-1596
Н. С. ХАБ'ЮК, ст. викладач;
ORCID: 0009-0005-7917-5528
М. М. ШРАМ, аспірант,
ORCID: 0009-0007-0640-1349
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ОПТИМІЗАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОБ'ЄКТИ НА БАЗІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Головною задачею при проєктуванні мереж майбутнього є створення інтелектуальної системи керування для оптимізації навантаження на об'єкти інфокомунікаційної мережі. Із збільшенням спектру та кількості послуг різко збільшується навантаження на мережу. Швидкість та затримка надання послуг є основними критеріями оцінки роботи системи. Для забезпечення цих показників необхідно оптимізувати мережну інфраструктуру. Нині активно розробляються методи розподілу обчислень різних послуг.

Важливим етапом у цьому напрямі технологій є CDN (Content Deliveri Networc) – мережа доставки контенту. Перевага даної технології полягає в тому, що сервери розміщуються якомога ближче до клієнтів з урахуванням територіальних ознак. Найважливішою технологією, що дозволяє використовувати безпосередньо ресурси базових станцій, є технологія MEC (Mobile Edbe Computing) - граничні обчислення. MEC дозволяє розташовувати свої вузли безпосередньо на базових станціях БС або групах БС.

Також перевагою MEC є можливість займати обчислювальний простір вузла на короткий час. Граничні обчислення дозволяють вирішувати такі проблеми, як мережева затримка, низька швидкість передавання даних.

Сьогодні у мережах зв'язку спостерігаються тенденції автоматизації та розвитку гнучкої мережевої структури. Організація мереж зв'язку проходить свій шлях від ручного перемикання до гнучкої віртуалізованої архітектури, на яку переходять оператори останніми роками. Також (у контексті структури стандартів (3GPP)) віртуалізація мережевих функцій (Network Functions Virtualization, NFV) успішно оцінюється операторами зв'язку та показує збільшення ефективності мережі, у тому числі з погляду оптимізації мережевої топології.

Крім того, в рамках мереж (5G) створення наднадійного зв'язку з ультрамалими затримками (Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC) та масової міжмашинної взаємодії (Massiv Mashine-Type Communication, mMTC) може бути ускладненим для мереж із централізованою топологією. Більш того, моніторинг мереж, зокрема, обладнання операторського класу показує, що не існує ідеальної статичної топології мережі, в якій її елементи були б рівномірно завантажені протягом тривалого часу обслуговування.

У статті надано рішення для автоматичного розподілу додатків на MEC – вузлах. Невід'ємною перевагою такого рішення є можливість розміщення на серверах не лише додатків оператора, а й сторонніх. Рішення Rex-platform дозволяє автоматизувати спосіб вивантаження додатків на оптимальний вузол MEC. Завдяки запропонованій платформі можна скоротити відстань між абонентами та додатком до мінімуму і, таким чином, зменшити затримку, знизити навантаження на центральну хмару постачальника послуги і відповідно на мережу оператора зв'язку.

Ключові слова: технологія MEC, мережі 5G, URLLC, MMT, інфораційно ентропійний метод, транспортна мережа, інваріантна система управління, комбінована система.

© Галаган Н. В., Беркман Л. Н., Хаб'юк Н. С., Шрам М. М., 2025

Вступ

Попит абонентів, що збільшується з кожним днем, на інтернет-послуги створює велику проблему, викликану завантаженістю транспортних мереж операторів зв'язку. Впровадження технологій MEC дозволяє знизити навантаження на мережу, проте сьогодні чіткого надання методу розподілу додатків між вузлами MEC немає.

Питання використання MEC - вузлів вимагає розгляду різних аспектів функціонування мереж зв'язку, наприклад, у разі вивантаження на вузол MEC програми з низьким способом в обслуговуваному вузловому районі ефективність такої дії буде прагнути до нуля. Навпаки, розміщуючи додаток з великим попитом на території обслуговування вузла, отримуємо високу ефективність через завантаження транспортної мережі та покращення якості послуги, що передається. При цьому слід звернути увагу, що попит на додатки не є незмінним у часі і може змінюватися в залежності від часу доби, дня тижня і т.д.

Таким чином, потрібен алгоритм, що здійснює вивантаження необхідних додатків у необхідний часовий проміжок і на необхідний MEC - вузол з метою розвантаження транспортної мережі та збільшення QoS за допомогою мінімального ресурсу оператора. Це - основна проблема, яку вирішує запропонована інтелектуальна система управління вузлами MEC [1].

Запропонована платформа дозволяє [4]:

1. Використовувати важливий ресурс оператора зв'язку іншими учасниками як постачальники послуг;
2. Розміщувати додатки постачальників послуг на обмежений час в інфраструктурі мережевого оператора для покращення якості послуг, що надаються, наблизивши їх до кінцевих користувачів;
3. Виконувати функцію MEC-оркестратора оператора зв'язку та хмарної інфраструктури постачальника послуг з можливістю взаємодії через API;
4. Забезпечити незалежність оператора мережі від постачальника послуг.

Розглядаючи перспективи розвитку мереж зв'язку, необхідно зазначити, що запропонована платформа могла б підтримувати дослідження в епоху 5G з урахуванням ключових потенційних особливостей мереж зв'язку 6G.

Як відомо, основна задача системи управління забезпечити ефективне функціонування мережі із визначеною точністю її параматрів.

При цьому, чим більше вимоги до точності параметрів, тим необхідно збільшувати кількість управляючої інформації. При зростаючій кількості послуг і збільшеними вимогами до точності параметрів кількості управляючої інформації і також вимоги до кількості каналів системи управління будуть такими, що система управління може поглинути основну мережу. Тому необхідно при проектуванні системи управління мереж майбутнього розраховувати кількість управляючої інформації на базі інформаційно-ентропійного методу.

Основна частина

Розглянемо спосіб запропонованого інформаційно-ентропійного методу розрахунку.

Нехай процес функціонування мережі в кожний момент часу t характеризується вектором змінних станів $\{x_1(t), x_2(t),..., x_n(t)\}$ або функціоналом $\Phi\{x_1(t), x_2(t),..., x_n(t)\}$. Вказані змінні станів є випадковими величинами зі своїми законами розподілу $p(x_i)$. Управління мережею – процес приведення змінних стану мережі за заданий час з початкового стану до оптимального. Наприклад, x_i - час доставки інформації між двома вузлами мережі. Якість функціонування мережі характеризується середньою затримкою повідомлень, яка обчислюється середньою величиною затримки на всіх вузлах. Завдання управління мережею має на меті мінімізацію і підтримку на рівні, не більше за задане середнє очікування і зменшення дисперсії середньої затримки повідомлень в мережі [2].

При цьому вимоги до точності управління мережею часто поєднуються з вимогами збільшення швидкості протікання процесу. У термінах теорії інформації є визначення: процес управління мережею є процес зменшення невизначеності стану мережі, що може бути чисель-

но представлено, як зміна ентропії мережі в процесі управління, оскільки ентропія визначає відхилення параметрів мережі за даний момент часу.

Відомо, що середня кількість інформації при перенесенні сигналу дорівнює різниці ентропії розподілу імовірностей цієї величини до і після отримання сигналу. Таким чином, визначивши зміну ентропії керованого процесу функціонування мережі в процесі управління, можна визначити кількість інформації, необхідну для отримання заданого відхилення ймовірності змінних стану мережі.

Вичерпною характеристикою координат процесу кожного заданого моменту часу - є розподіл імовірностей цих величин.

Цей вид ентропії будемо називати ентропією розподілу ймовірностей координат керованого процесу або просто ентропією процесу. Вказані поняття ентропії мають однакові математичні вирази [2].

Ентропія розподілу ймовірностей координат керованого процесу виражається тією ж формулою, що і інформаційна ентропія:

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot \log p(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, \dots, dx_n .$$

Але за визначенням щільності ймовірності:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x_i) dx_i = 1.$$

Тому:

$$H = \sum_{i=1}^{n} H_i, \tag{1}$$

де H_i - ентропія ***i-ї*** з незалежних величин.

Отже, ентропія незалежних параметрів процесу дорівнює сумі ентропії кожної координати.

Якщо процес характеризується лише одним параметром *x,* то ентропія:

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot \log p(x) dx. \tag{2}$$

Якщо параметр *x* може приймати лише дискретні значення, імовірності яких дорівнюють $p_1, p_2, \dots, p_m$, то ентропія такого параметру виражається формулою:

$$H = -\sum_{i=1}^{m} p_j \log p_j . \cdot \tag{3}$$

Для підтвердження цього положення знайдемо екстремум ентропії.

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot \log p(x) dx , \tag{4}$$

при умовах:

$$\left.\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1; \\ &\int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx = \bar{x}^2 = \sigma^2. \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Умова екстремуму функціонала:

$$H + \lambda_1 \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx + \lambda_2 \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} (-p \log p + \lambda_1 p + \lambda_2 x^2 p) dx ,$$

полягає в рівності:

$$\frac{d}{dp}(-p \log p + \lambda_1 p + \lambda_2 x^2 p) = -\log e - \log p + \lambda_1 + \lambda_2 x^2 = 0.$$

Звідки:

$$p = Ce^{\lambda_2 x^2},$$

де $C=const$; $\lambda=const$.

Ентропія в замкнених системах управління. Нехай стан процесу (функціонування мережі) в кожний даний момент часу характеризується сукупністю станів $x_1, x_2, \ldots, x_n$, які назвемо координатами процесу. Координати процесу завжди мають відхилення відносно бажаних значень, тобто містять випадкові складові [1].

Одним з основних завдань управління функціонуванням *ІМ* є зменшення відхилень процесу від бажаного. При цьому, вимога до точності управління підвищується.

Необхідно зазначити, що в літературі з теорії інформації, часто отримання інформації про який-небудь процес подібне до поняття про зміну ентропії самого цього процесу. Нагадаємо, що поняття приросту ентропії стану процесу є величина відхилення відносно деякого бажаного проходження процесу. Отже, зміна ентропії стану процесу є об'єктивною характеристикою. Ця зміна не може бути досягнута тільки шляхом отримання інформації, тобто «відображенням» або «зображенням» процесу. Для зміни ентропії, у вказаному її розумінні, необхідна організована зміна процесу, тобто управління.

Отримання певної кількості інформації в процесі необхідне, але ще недостатнє для здійснення управління.

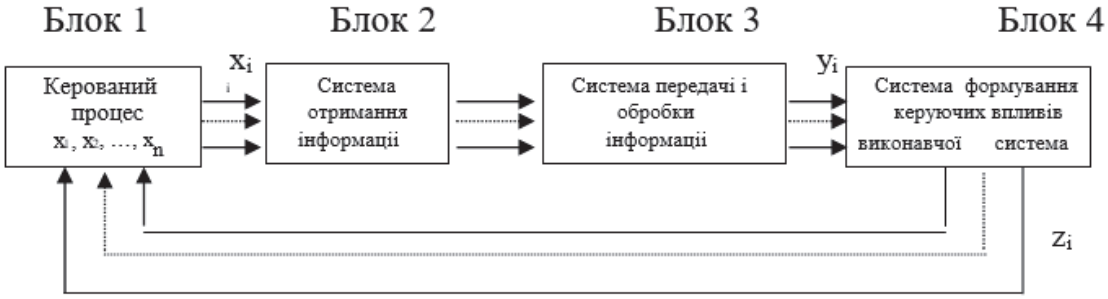

Рис. 1. Замкнена схема процесу управління

На рис. 1 зображена замкнута схема процесу управління. Інформація про керований процес (блок 1), (координати *Xi)* приймається за допомогою системи отримання інформації (блок 2). Отримана інформація обробляється в системі передачі і обробки інформації (блок 3). Оброблена інформація поступає в систему формування управляючих впливів *Zi* - виконавчу систему (блок 4).

Управляючі впливи X_i впливають на керований процес в напрямку зменшення ентропії процесу.

При розгляді передачі і перетворення інформації величини $x_1, x_2, \ldots, x_n$ потрібно трактувати як вхідні величини системи отримання і перетворення інформації, а $y_1, y_2, \ldots, y_n$ - як вихідні величини цієї системи. Отже, кількість переданої і перетвореної інформації виражається логарифмом відношення щільності імовірності вхідних величин після отримання сигналу на виході [5].

Кількість інформації залежить від вхідних і вихідних величин. Для загального опису процесу передачі і перетворення інформації зручно розглядати математичне очікування або середню кількість інформації при передачі однієї величини $(x \to y)$ і виражається формулою:

$$I = M[H(x)] - M_y[H_y(x)]. \qquad (6)$$

Величина $M_y[H_y(x)]$ є усередненою характеристикою ефекту дії завад, а також запізнення при передаванні сигналу.

Отже, середня кількість інформації при передачі $x \to y$ дорівнює різниці ентропії розподілу імовірностей вхідної величини до отримання сигналу і усередненої ентропії розподілу ймовірностей цієї величини після отримання сигналу.

Слід зауважити, що у разі нормального розподілу ймовірностей вхідної і вихідної величин середня кількість інформації при передаванні $x \to y$ можемо виразити через коефіцієнт кореляції z вхідної і вихідної величин.

Зазначимо, що величини $x_1, x_2, \ldots, x_n$ так само як і величини $y_1, y_2, \ldots, y_n$ розглядаємо як компоненти *n-мірних* векторів і передаання $x_1, x_2, \ldots, x_n \to y_1, y_2, \ldots, y_n$ можна називати передаванням *n-ого* вектора $x \to y$.

При розгляді понять передачі інформації в системах управління, необхідно проаналізувати інформаційні процеси при перетворенні координат і втрати інформації при проходженні сигналу через послідовно ввімкнені системи.

У системах отримання передачі і обробки інформації (рис.1) часто здійснюється перетворення координат. Перетворення координат:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, \ldots, x_n),$$
$$y_2 = f_2(x_1, x_2, \ldots, x_n),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$y_n = f_n(x_1, x_2, \ldots, x_n)$$

називається взаємно однозначним, якщо перетворення:

$$\frac{D(y_1, y_2, \ldots, y_n)}{D(x_1, x_2, \ldots, x_n)} = \begin{vmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \ldots\ldots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \ldots\ldots & \frac{df_2}{dx_n} \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \frac{df_n}{dx_2} & \ldots\ldots & \frac{df_n}{dx_n} \end{vmatrix}.$$

відмінне від нуля. Тут $f_1, f_2, \ldots, f_n$ - деякі функції, що диференціюються.

Зазначимо, що середня кількість інформації, яку передають, не змінюється при взаємно однозначному перетворенні координат.

Інформація проходить послідовно від системи отримання інформації до системи передачі, обробки інформації і виконавчу систему. Система передачі, обробки інформації і виконавча система не мають безпосереднього впливу з боку керованого процесу, бо передбачається лише однонаправлена дія управляючих координат z_i на керований процес.

Якщо ж керований процес надає безпосередній зворотний вплив на управляючі координати (виконавчу систему), то його можна привести до випадку однонаправленої дії додаткової інформації в систему отримання інформації.

Питання ставиться так: чи може кількість інформації при передаванні $x_i \to z_i$ перевищувати кількість інформації при передаванні $x_i \to y_i$. Негативна відповідь на це запитання приводиться без доказу, в зв'язку з достатньою вірогідністю.

Середня кількість інформації при проходженні послідовно сполучених систем може тільки убувати або (у граничному разі відсутності додаткових завад) залишатися незмінною:

$I_{xz} \le I_{xy}$,

де: $I_{xz} = M[H(x)] - M_z[H_z(x)]$ - середня кількість інформації при передачі $x \to y \to z$;

$I_{xy} = M[H(x)] - M_y[H_y(x)]$ - середня кількість інформації при передачі $x \to y$.

Звичайно, в теорії інформації розглядається передача інформації через розімкнені системи. Для процесів управління характерні замкнені контури циркуляції інформації [5].

Розглянемо загальну схему процесу управління, представлену на рис.1.

Відзначимо, що модель системи такого типу є адаптивною і відповідно, практично обробляє усі плинні прогнозовані збурення, які впливають на виконавчу систему.

Контур циркуляції в даній системі можна подати у вигляді:

$$x \to y \to z \to x \text{ або } x \to z \to x.$$

Для отримання загальних співвідношень, справедливих для будь-яких ланцюгів замкненого контура (в які можуть входити і люди-оператори), необхідно використовувати досить загальне поняття передачі інформації. Розімкнемо контур в якій-небудь точці, наприклад, в точці з'єднання вимірювальної системи (системи отримання інформації) з керованим процесом (об'єктом). Іншими словами, припинимо надходження інформації від керованого процесу до вимірювальної системи. Подамо на вхід вимірювальної системи інформацію, тобто деяке значення x від стороннього джерела. Тоді після проходження сигналу через систему управління і керований об'єкт на виході утвориться значення x'. Таким чином, в розімкненій системі має місце передача інформації типу $x \to x'$.

Як відомо з основних співвідношень теорії інформації, кількість інформації при передачі $x \to x'$ дорівнює:

$$I = M[H(x)] - M_x[H_x(x')], \tag{7}$$

де $H(x)$ - ентропія x,

$M_x[H_x(x')]$ - усереднене за x значення ентропії після отримання сигналу x'.

Для скорочення запису використані позначення:

$$H(x_1, x_2, \ldots, x_n) = H(x),$$

де $x_1, x_2, \ldots, x_n$ - координати (параметри) керованого процесу.

Співвідношення (3.14) можна представити у вигляді:

$$I = H(x) - H_x(x') + S, \tag{8}$$

де $S = M[H(x)] - M_x[H_x(x')]$.

Величина S називається приростом ентропії приведених шумів. Зміст цієї величини наступний. Величина $H_x(x')$ є ентропією координат на виході (ентропія процесу) при заданому сигналі x на вході. Ця ентропія має кінцеву величину внаслідок впливу різного роду похибок і завад, причому вона відображає сумарний ефект дії похибок і завад вимірювачів, системи передачі і перетворення інформації, виконавчої системи, а також збурюючих сил безпосередньо на керований процес. Дія цих завад, ніби приведена до виходу контуру - керованим координатам x'. Член $M_x[Hx(x')]$ – це та ж величина, усереднена за вхідною величиною x.

Таким чином, приріст ентропії приведених завад S є різниця ентропії завад, приведених до виходу, і тієї ж ентропії, усередненої за вхідними величинами.

Якщо замкнути контур дискретного управління, то на вхід сприймаючої системи будуть впливати координати керованого процесу в деякий момент часу $t-1$, а величиною x' будуть координати того ж керованого процесу в момент часу t, то величини x та x будуть мати:

$$x = x(t-1);\ x' = x(t).$$

Величини $H(x')$ і $H_x(x')$ при замкненому контурі дискретного управління звертаються до значень ентропії керованого процесу відповідно в $(t-1)$-й і t-й моменти часу.

Рівняння (8) приймає вигляд:

$$I(t) = H(t-1) - H(t) + S(t),$$

або

$$H(t) - H(t-1) = S(t) - I(t), \tag{9}$$

де $H(t-1)$ і $H(t)$ - значення ентропії керованого процесу відповідно в $(t-1)$-й і t-й моменти часу;

$I(t)$ - кількість інформації, передана за відповідний інтервал часу від джерела до одержувача (яким є той же керований процес).

Отже, приріст ентропії, керованого дискретним чином процесу, за інтервал дискретності дорівнює різниці приросту ентропії приведених завад і кількості інформації, переданої в замкненому контурі $(x(t-1) \to x(t))$ за той же інтервал часу. Позначимо індексом 0 початковий момент часу і з співвідношення , знаходимо:

$$H(t) = H(0) - \sum_{i=0}^{t} I(i) + \sum_{i=0}^{t} S(i). \tag{10}$$

Ентропія керованого дискретним чином процесу дорівнює різниці початкової ентропії цього процесу, складеної з сумарним приростом ентропії завад, і сумарної кількості інформації, переданої через контур *(x(t-1)→x(t))*.

Для стаціонарного процесу *H(t) = H(t-1) і S(t) = I(t).*

Тому, для підтримки стаціонарного керованого процесу необхідно передавати через контур управління протягом інтервалу дискретності кількість інформації, яка дорівнює відповідному приросту ентропії приведених завад. Зазначимо, що для некерованого процесу кількість інформації *I(t)* дорівнює нулю, *H(t) - H(t-1) = S(t),* тобто приріст ентропії приведених завад дорівнює приросту ентропії некерованого процесу за відповідний інтервал часу.

Отже, для управління процесом функціонування мережі необхідно передавати протягом інтервалу дискретності управління, управляючу інформацію, обсяг якої визначається як сума необхідного зменшення ентропії процесу функціонування мережі за цей інтервал часу і сумарного приросту ентропії некерованого процесу за цей же інтервал часу.

У загальному випадку, якщо процес характеризується вектором *{X1(t),X2(t),...Xn(t)},*то ентропія дорівнює:

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} \ldots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2, \ldots, x_n) \cdot \log p(x_1, x_2, \ldots, x_n) dx_1, \ldots, dx_n .$$

Оскільки важко визначити заздалегідь реальний закон розподілу *p(x),* зробимо припущення, що *p(x)* має нормальний закон розподілу. У цьому випадку ентропія, як відомо, визначається як:

$$H = \log (4{,}13\sigma).$$

Таким чином, приріст (зменшення) ентропії в (9) буде визначатися як:

$$H(t) - H(t-1) = \log \frac{\sigma_1(t)}{\sigma_1(t-1)} + \ldots \log \frac{\sigma_n(t)}{\sigma_n(t-1)}, \qquad (11)$$

і для оцінки кількості інформації, яка передається в системі управління мережею, ми повинні оцінити відношення дисперсій відхилення параметрів повідомлень, що досліджуються в мережі в різних ситуаціях, а така оцінка може бути зроблена за вимогами до параметрів основної мережі [6].

Ентропія та інформація в розімкнених системах управління. Як відомо, складні системи схильні до дії незакономірних збурень, що різко змінюються. Тому система управління повинна підтримати вимогу до точності параметрів мережі, незважаючи на стохастичний характер зовнішніх збурень. Системи управління, що володіють такими властивостями, називаються інваріантними (тобто не змінюють свої параметри).

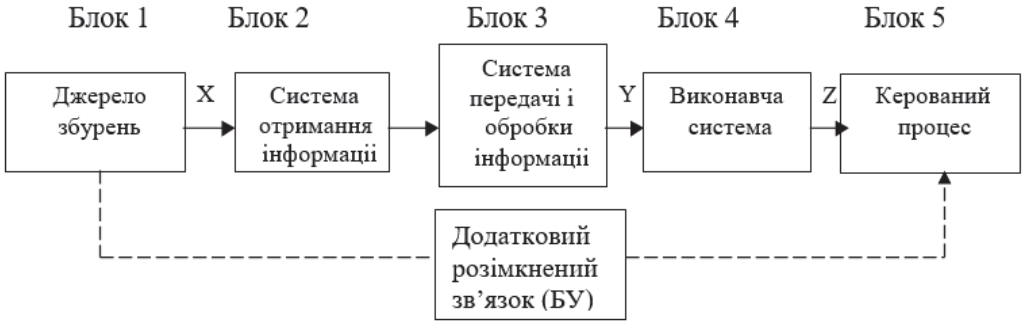

Рис. 2. Інваріантна система управління в розімкнутому вигляді

Таким чином, блок 1 (рис. 2) відповідно відображає джерело стохастичних збурень, блоки 2, 3 і 4 - безпосередньо систему управління (отримання інформації, передачі і обробки інформації, виконавча система), а блок 5 - це керований процес, тобто керована інформаційна мережа. Скорочено цей контур може бути представлений у вигляді:

$$X \rightarrow Y \rightarrow Z.$$

Як відомо, технічна реалізація абсолютно інваріантних систем складна. Їх потрібно розглядати як граничні характеристики, до яких прагнуть, але досягнути важко. Тому, в ряді систем

досягається інваріантність не повна, а часткова, або система інваріантна до ε, де під ε розуміємо похибку системи. Системою інваріантною до ε назвемо таку систему, в якій зберігаються межі абсолютно інваріантної системи і існує динамічна похибка σ, що характеризує міру інваріантності. Користуючись основними визначеннями, згідно теорії інформації, можна указати таку абсолютно інваріантну систему, яка буде відрізнятися від вихідної наявністю динамічної похибки σ при максимально необхідній кількості інформації ΔH**.** Порівняння таких систем для однієї множини вхідних сигналів дозволить отримати оцінку інваріантності. При цьому ΔH і буде мірою ε-інваріантності для даного типу множини вхідних сигналів.

Використовуючи оцінки інваріантності до ε, отримаємо вираз, що визначає необхідну кількість інформації ΔH:

$$\Delta H = K(\log\frac{\sigma_1}{\overline{\sigma}_1} + \log\frac{\sigma_2}{\overline{\sigma}_2} + ... + \log\frac{\sigma_n}{\overline{\sigma}_n}), \qquad (12)$$

де σ_i - можливі середньоквадратичні відхилення параметрів інформаційної мережі, що контролюються, від необхідних значень;

$\overline{\sigma}_i$ - середньоквадратична допустима похибка параметрів інформаційної мережі, що контролюються, від необхідних значень;

$$i=1, 2,..., n;$$

K - коефіцієнт, який залежить від типу каналу зв'язку, що використовується.

Необхідно зазначити, система управління інформаційною мережею повинна володіти як можливістю адаптації до стійких плинних змін режиму, так і властивістю інваріантності, що дозволяє системі бути нечутливою до випадкових збурень. Таким чином, система управління повинна мати комбіновану структуру, яка об'єднує описані вище адаптивну (замкнену) і інваріантну (розімкнену). Структура її представлена на рис.3, де БУ – блок узгодження.

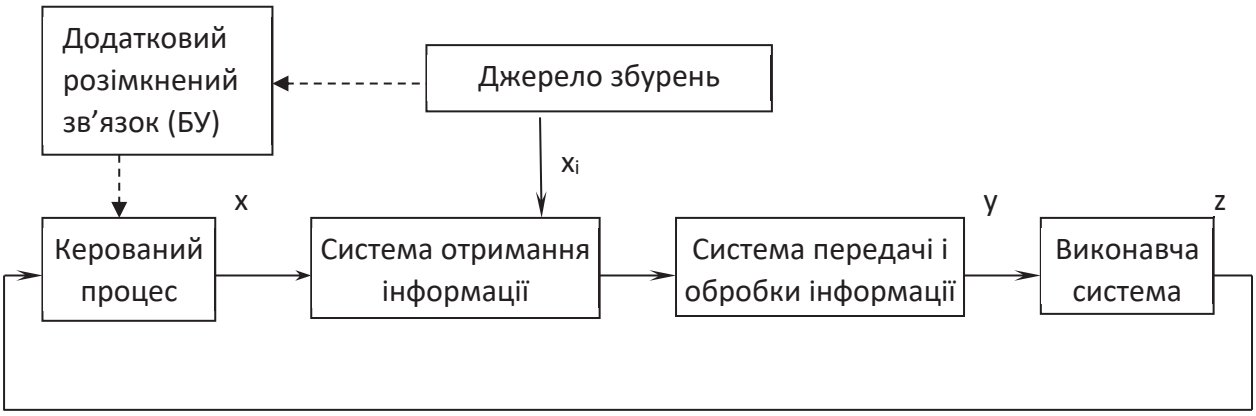

Рис. 3. Структура комбінованої системи управління

Таким чином, середня кількість інформації, яку необхідно передати в системі управління повинна дорівнювати сумі виразів (11) і (12). При цьому буде забезпечено як властивість адаптивності, так і інваріантності.

Описаний метод дозволяє знайти необхідний мінімум інформації, при якому параметри мережі матимуть задану точність. Якщо кількість інформації в системі управління буде меншою, то точність параметрів буде менше заданої.

Очевидно, з точки зору теорії інформації і динамічної точності, необхідно, щоб система управління забезпечувала задану точність параметрів мережі при мінімальному обсязі управляючої інформації [6].

Отже, з двох систем управління переваги будуть надані тій, яка вимагає меншу кількість управляючої інформації, це дозволяє знизити вимоги до якості каналів передавання даних, що використовуються системами управління.

Тому інформаційно-ентропійний метод дозволяє визначити нетрадиційним способом кількість керуючої інформації у системі управління будь-якої телекомунікаційної мережі. Таку

оцінку за допомогою інших практичних методів майже неможливо отримати, так як обмежена кількість вихідних даних, особливо для мереж, на яких застосовуються різні технології. Практична цінність забезпечується можливістю врахування ємності управляючої інформації з переліком вимог до точності параметрів основної мережі. Така оцінка визначається деякою дисперсією відхилення від математичного очікування. Чим більші вимоги до точності параметрів управляючої мережі, тим більша потрібна ємність управляючої інформації.

Запропонована комбінована система управління (рис.3) дозволяє управляти телекомунікаційною мережею у двох режимах, одночасно забезпечуючи як властивості адаптивності, так і інваріантності параметрів мережі.

Зазначимо, що перший режим (назвемо його адаптивним) використовується у всіх системах управління. Він визначається тим, що виконує контроль параметрів телекомунікаційної мережі, на підставі якого система управління приймає рішення. Структура такої системи представлена на рис.1.

Другий режим (розімкнена система) дозволяє усунути аварійні ситуації, тому що аналізує спрогнозовані збурювальні фактори, враховуючи які, виконує коригування параметрів мережі. Структура такої системи представлена на рис. 2.

І, нарешті, комбінована структура (рис. 3) дозволяє реалізувати обидва режими. Кількість інформації, яка передається та обробляється системою управління з одного боку, визначає основні властивості керованої телекомунікаційної мережі, а з другого - зумовлює її структуру та основні властивості.

Розрахунок обсягу управляючої інформації для забезпечення необхідної точності параметрів мережі. Інформаційно-ентропійний метод полягає в тому, що кількість управляючої інформації визначається як різниця ентропій телекомунікаційної мережі перед ввімкненням СУ і після встановлення режиму нормальної роботи. При цьому враховується необхідна кількість управляючої інформації, яка необхідна для підтримки режиму нормальної роботи. Режим нормальної роботи мережі визначається середньє квадратичним відхиленням контрольованих параметрів від допустимих значень. Кількість каналів та їх параметри залежать від обсягу управляючої інформації.

Наведемо методику, яка реалізує інформаційо-ентропійний метод і дозволяє визначити необхідні параметри каналів зв'язку системи управління, забезпечує необхідну точність управління характеристиками основної телекомунікаційної мережі [2].

Як зазначено вище, одним з основних завдань проектування СУ є визначення мінімально необхідної кількості управляючої інформаціі, що забезпечує необхідну точність на керуючій мережі. У термінах теорії інформації «управління мережею» — це процес зменшення невизначенності її стану, що чисельно характеризує зміни відповідної ентропії, оскільки ентропія визначає відхилення параметрів мережі у кожному фіксованому моменті часу.

Вихідними даними для розрахунку є відомості про:

- об`єкт управління;
- параметри об`єктів управління;
- відхилення параметрів вказаних об`єктів.

У кожному конкретному випадку при виборі об`єктів управління та їх параметрів виходять з необхідної точності розрахунків та потреб системи управління.

Завдання розрахунку обсягу управляючої інформації доцільно реалізувати в інтерактивному режимі, завдяки якому користувач в зручній для себе формі вибирає об`єкти та параметри управління.

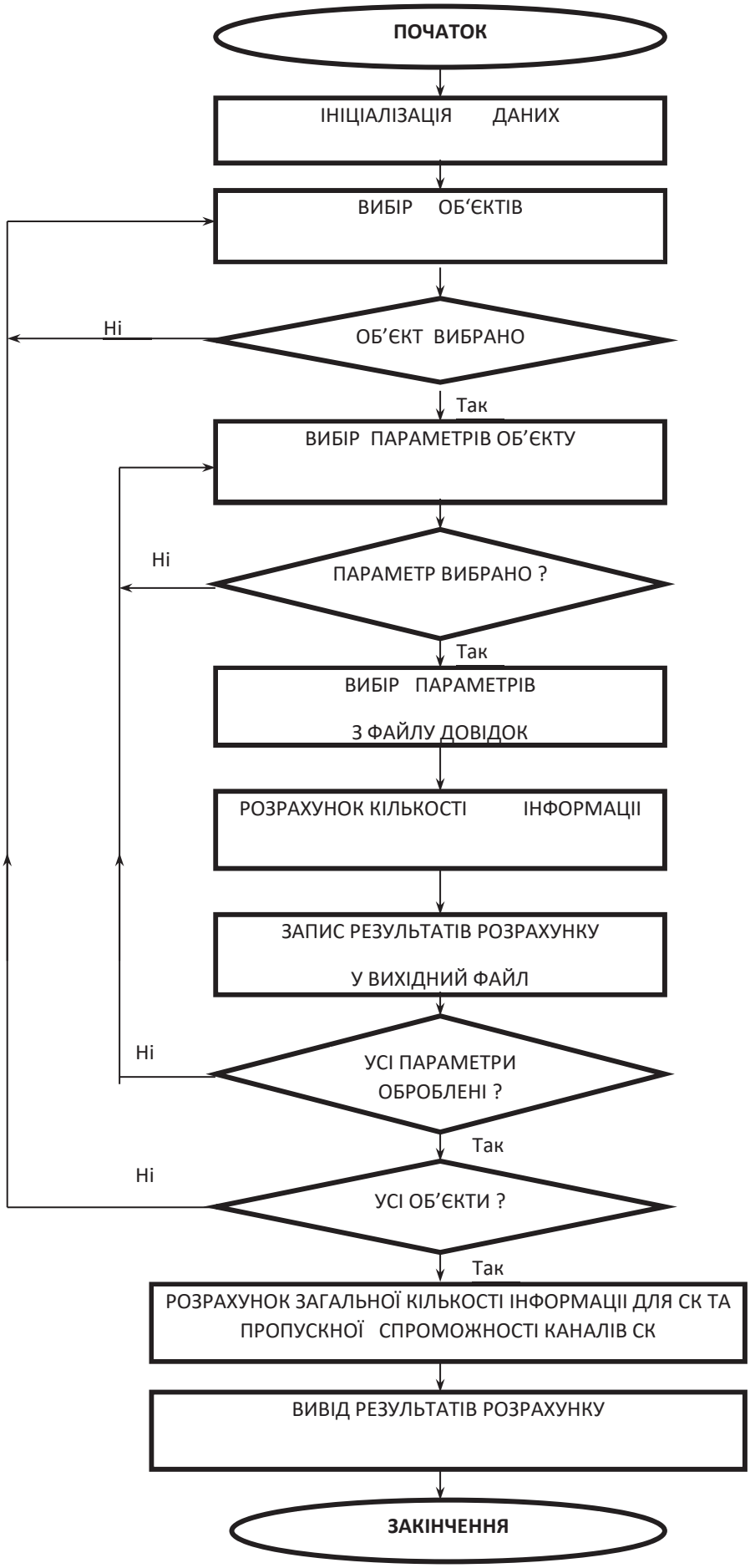

Рис. 4. Алгоритм головної процедури

Висновки

У статті запропоновано технологію CDN (Content Deliveri Networc) - мережа доставки контенту. Перевага даної технології полягає в тому, що сервери розміщуються якомога ближче до клієнтів з урахуванням територіальних ознак.

Розроблено комбіновану структуру системи управління, яка забезпечує системі як властивість адаптивності до плинно спрогнозованих збурювань, так і інваріантності до випадкових збурюючих факторів. Інформаційно-ентропійний метод дає можливість розрахувати кількість каналів зв`язку для СУ з заданою пропускною спроможністю для управління параметрами мережі з необхідною точністю. Інформаційно-ентропійний метод розрахунку кількості каналів для системи управління є універсальним, тобто придатним для будь-якого типу телекомунікаційної мережі.

Запропонований інформаційно-ентропійний метод розрахунку реалізований з використанням оцінки параметрів реальної системи управління.

Запропоновано метод отримання узагальненого критерію при оптимізації систем управління, який дозволяє одержати ефективні значення параметрів керованої мережі з врахуванням поставлених до них вимог дозволить ефективно впровадити інтелектуальні системи управління.

Розроблено способи врахування різних збурюючих факторів у випадках, коли відомі закони розподілу і коли апріорна інформація про них відсутня.

Список літератури

1. *Беркман Л.Н., Стеклов В.К., Тарасенко И.А. Features of designing of a management system of an intellectual network // Львів: матеріали міжнародної конференції "Сучасні проблеми засобів телекомунікацій, комп'ютерної інженерії та підготовки кадрів", 2000, -С. 4-8.*
2. *Стеклов В.К., Беркман Л.М. Особливості проектування системи управління інтелектуальною мережею // Львів: вісник державного університету "Львівська політехніка", №387.-2000.-С.19-22.*
3. *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.*
4. *Дослідження когнітивних методів керування інфокомунікаціями в умовах невизначеності / О. В. Кітура, Л. Н. Беркман, Л. В. Дакова [та ін.] // Зв'язок. 2021. No4(152). С. 7–13.*
5. *The intelligent control system for infocommunication networks / L. Berkman, O. Barabash, O.Tkachenko [etal.] // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2020.*
6. *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.*

N. Halahan, L. Berkman, N. Khabiuk, M. Shram

OPTIMIZATION OF LOAD ON FACILITIES BASED ON INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS

The main task in designing the networks of the future is to create an intelligent control system to optimize the load on the objects of the information communication network. With the increase in the spectrum and number of services, the load on the network increases dramatically. The speed and delay of service provision are the main criteria for evaluating the performance of the system. To ensure these indicators, it is necessary to optimize the network infrastructure. Currently, methods of distributing calculations of various services are being actively developed.

An important step in this direction of CDN (Content Delivery Network) technologies is the content delivery network. The advantage of this technology is that servers are placed as close as possible to clients, taking into account territorial characteristics. The most important technology that allows you

to directly use the resources of base stations is the MES (Mobile Edbe Computing) technology - edge computing. MES allows you to place your nodes directly on BS base stations or BS groups.

Also, the advantage of MES is the ability to occupy the computing space of the node for a short time. Edge computing allows you to solve many problems such as network latency, low data transfer speed.

Today, the trends of automation and development of a flexible network structure are observed in communication networks. The organization of communication networks is moving from manual switching to a flexible virtualized architecture, which operators have been switching to in recent years. Also (in the context of the standards structure (3GPP), network functions virtualization (NFV) is successfully evaluated by communication operators and shows an increase in network efficiency, including from the point of view of network topology optimization.

In addition, within networks (5G), creating ultra-reliable low latency communication (URLLC) and massive machine-type communication (mMTC) may be difficult for networks with a centralized topology. Moreover, network monitoring, in particular, carrier-class equipment, shows that there is no ideal static network topology, in which there is and its elements would be uniformly loaded during a long service time.

The article provides a solution for the automatic distribution of applications on MES - nodes. An inherent advantage of such a solution is the possibility of hosting not only the operator's applications, but also third-party applications on the servers. The Rex-platform solution allows you to automate the method of downloading applications to the optimal MES node. Thanks to the proposed platform, it is possible to reduce the distance between subscribers and the application to a minimum and thus reduce the delay, reduce the load on the central cloud of the service provider, respectively, on the network of the communication operator.

Keywords: MES technology, 5G networks, URLLC, MMT, information entropy method, transport network, invariant control system, combined system.