УДК 621.391.833 DOI: 10.31673/2412-9070.2023.031020

Л. Н. БЕРКМАН, доктор техн. наук, професор;
О. В. ДРОБИК, канд. техн. наук, професор;
А. Г. ЗАХАРЖЕВСЬКИЙ, канд. техн. наук, здобувач;
В. О. ВЛАСЕНКО, канд. техн. наук,
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА УМОВ ВПЛИВУ ВИПАДКОВИХ ЧИННИКІВ НА БАЗІ ТЕОРІЇ КАТАСТРОФ

Проблема створення захищених інфокомунікаційних мереж спеціального призначення на базі каналів загального доступу з апріорно невідомими структурою та алгоритмами функціонування оптимізованих за критеріями структурно-функціональної цілісності потребує подальшого розгляду і розв'язання. Знайдені шляхи вирішення наукової проблеми сприятимуть побудові захищених інфокомунікаційних мереж спеціального призначення на базі каналів загального доступу за допомогою математичного апарату визначення сідлової точки в процесі оптимізації мережі, що забезпечить надійність і живучість мережі в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: інфокомунікаційна мережа; багатокритеріальна оптимізація; випадкові чинники.

Вступ

Проблема створення захищених інфокомунікаційних мереж спеціального призначення на базі каналів загального доступу з апріорно невідомими структурою та алгоритмами функціонування оптимізованих за критеріями структурно-функціональної цілісності потребує подальшого розгляду і розв'язання. Для уникнення надзвичайних ситуацій у захищеній інфокомунікаційній мережі спеціального призначення потрібно дослідити можливості застосування математичного апарату теорії масового обслуговування, теорії оптимізації, теорії катастроф, основи теорії ймовірностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Було здійснено аналіз та порівняння сучасних підходів щодо можливостей узгодження суперечливих критеріїв під час синтезу систем керування. Досліджено їх переваги та недоліки. Запропоновано підхід, що дає змогу поєднати суперечливість критеріїв з одночасним урахуванням обсягів переданої керувальної інформації, її вірогідності, затримки сигналів та вартості синтезованої системи керування.

Мета статті — аналіз актуальності використання методу багатокритеріальної оптимізації під час синтезу систем керування сучасними телекомунікаційними мережами спеціального призначення.

Основна частина

Під час багатокритеріальної оптимізації захищеної інфокомунікаційної мережі спеціального призначення в режимі надзвичайних ситуацій потрібно знати параметри мережі, за яких значення показників якості будуть найкращі. Фактично необхідно здійснити синтез комунікаційної мережі спеціального призначення за умов впливу випадкових чинників.

Задача оптимізації проєктування без належного врахування дії випадкових чинників, що на неї впливають, унеможливлює наближення синтезованої моделі до її реального втілення, до адекватного опису процесів, що відбуваються в мережі [5].

І критерій отимальності, і обмеження за фіксованими значеннями керованих змінних x є певною мірою випадковими величинами, тобто функціями від вектора зовнішніх чинників y:

$$\min_{x\in D} Q(x,y), \tag{1}$$

де D — діапазон розв'язків, $D = \{x/g_i(x,y) \geq 0,\ i = 1,2,\ldots,m\}$.

Розв'язання задачі (1) передбачає можливість таких ситуацій:

• оптимальний розв'язок x^* потрібно визначити до того, як відбудеться вплив чинника y, тобто вибрана оптимальність не залежить від їх конкретних значень;

• оптимальний розв'язок x^* потрібно визначити після того, як відбудеться вплив чинника і будуть відомі його параметри.

Для зовнішнього впливу, що описується вектором y, задано закон розподілу, але описаний він з точністю до вектора параметрів Q. Інакше кажучи, нам задано функцію густини ймовірності $f(y,a)$, але не відомі параметри Q, що належать розглядуваному діапазону D_a.

Залежно від наявної інформації щодо виду закону розподілу випадкових величин вибір критерію оптимальності і характер обмежень доводиться вибирати, орієнтуючись або на самий гірший випадок для нашої ситуації (щодо можливих значень вектора y), або ж на деякі найбільш поширені чи, у певному розумінні, «середні» значення щодо критерію і обмежень [1]. Якщо ж вихідні дані дають змогу брати до уваги тільки те, що yDy, то критерій оптимальності визначається з гарантуванням забезпечення найкращого результату в самому найгіршому за невизначеністю в разі, коли

$$Q(x) = \max_{y\in Dy} Q(x,y). \tag{2}$$

Зрозуміло, що в інших випадках він дасть набагато кращий результат. Аналогічно можна підійти і для обмежень:

$$g_i(x) = \min_{y\in Dy} g_i(x,y). \tag{3}$$

У результаті дістаємо

$$Q = Q(x_1,x_2,\dots,x_n), \tag{4}$$

якщо виконуються умови:

$$g_i(x_1,x_2,\dots,x_n) \geq 0, \quad i = 1,2,\dots,m\ , \tag{5}$$

$$x_j^- \leq x_j \leq x_j^+, \quad j = 1,2,\dots,n, \tag{6}$$

і за відсутності інформації про вплив зовнішніх чинників y (випадок повної невизначеності) задача зводиться до умови детермінованої оптимізації:

$$\min_{x\in D}\max_{y\in D_y} Q(x,y), \tag{7}$$

де $D = \left\{ \frac{x}{\left|\min\limits_{y\in D_y} g_i(x,y) \geq 0\right|}, i = 1,2,\dots,m \right\}$.

З огляду на те, що y завжди має випадковий характер, можна вибрати найкращі в певному розумінні (порівняно з (6)) критерії оптимальності. Оскільки знання законів розподілу в критерії (6) не надає можливості вибрати найкращий розв'язок порівняно з ситуацією повної невизначеності, то критерій оптимальності й обмеження потрібно змінити так, щоб здобутий результат був найкращим якби «у середньому», у розумінні для тих ситуацій, що описуються законом розподілу $f(y)$.

Якщо закони розподілу випадкових впливів відомі, за критерій оптимальності можна взяти, наприклад, математичне сподівання (середнє арифметичне зважене значення) випадкової функції $Q(x,y)$:

$$Q(x) = M\{Q(x,y)\} = \int_{y\in D_y} Q(x,y)df(y). \tag{8}$$

Інший варіант — це допустима дисперсія цього впливу (квадрат середньоквадратичного відхилення значень функції $Q(x,y)$ від заданого рівня Q^+):

$$Q(x) = M\{[Q(x,y) - Q^+]^2\} = \int_{y\in D_y} [Q(x,y) - Q^+]^2 df(y). \tag{9}$$

Також як такий критерій може бути використана ймовірність того, що значення $Q(x,y)$ перевищить деякий наперед заданий рівень Q^-:

$$Q(x) = P\{Q(x,y) > Q^-\}. \tag{10}$$

Всі ці три підходи (7) – (9), що можуть бути використані як критерій оптимальності й обмежень для випадку відомих законів розподілу, зумовлюють розв'язання тієї самої задачі стохастичного програмування.

Усереднену задачу стохастичного програмування можна сформулювати в такий спосіб: треба відшукати певний вектор керованих змінних x, що забезпечив би таке:

$$\min_x \int_{y\in D_y} Q(x,y)df(y), \tag{11}$$

за умови

$$\int_{y\in D_y} g_i(x,y)df(y) \geq 0, \quad i = 1,2,\dots,m. \tag{12}$$

Отже, маємо задачу стохастичного програмування з імовірними обмеженнями, що зводиться до визначення вектора керованих змінних x, що забезпечує:

$$\min_x \int_{y\in D_y} Q(x,y)df(y), \tag{12}$$

за умови, що

$$P\{g_i(x,y) \geq 0, \quad i = 1,2,\dots,m\} \geq P, \tag{13}$$

де $0 \leq P \leq 1$ — деяка задана ймовірність виконання системи обмежень вихідної задачі (1).

У термінах теорії ймовірностей задача стохастичного програмування може бути подана як пошук вектора керованих змінних x, що забезпечує:

$$\max_x P\{Q(x,y \leq Q^+\}. \tag{14}$$

Відомі закони розподілу випадкових чинників, заданих із точністю до вектора параметрів a, дають змогу перетворити вирази (7) – (9) на функції від цих змінних. Однак про вектор параметрів a нам нічого не відомо. Єдина інформація — це те, що він належить до певного діапазону D_a. У цьому разі переходять до комбінованого критерію, що поєднує в собі і вираз (2) і один із виразів (5) – (7). Такий прийом уможливлює перехід від задачі (1) до однієї з типових задач стохастичного програмування. Як приклад, усереднена задача стохастичного програмування для нашого випадку може бути сформульована так:

знайти вектор керованих змінних x, що забезпечує

$$\min_{x}\max_{a\in D_a}\int_{y\in D_y} Q(x,y)df(y,a), \tag{15}$$

за умови

$$\left[\max_{a\in D_a}\int_{y\in D_y} g_i(x,y)df(y,a)\right]0,\ i=1,2,\ldots,m. \tag{16}$$

Доходимо висновку, що визначення оптимального розв'язку x^*, що не залежить від конкретної реалізації можливих вхідних впливів y, зводиться до вирішення задачі нелінійної оптимізації і може бути записано як

$$\min_{x\in D} Q(x). \tag{17}$$

При цьому задача оптимізації передбачає, що конкретним реалізаціям випадкових чинників y будуть відповідати різні оптимальні розв'язки $x^* = x^*(y)$. Інакше кажучи, у разі зміни умов у задачі оптимізації існує можливість «переформатувати» оптимальний розв'язок на новий [5].

Як уже зазначалося, задля уникнення надзвичайних ситуацій у захищеній інфокомунікаційній системі спеціального призначення потрібно використовувати математичну теорію катастроф, яка зосереджена на математичному описі різких якісних перебудов, стрибків у поведінці систем, зокрема нелінійних динамічних систем. Ця теорія пов'язана з методами розв'язування диференціальних рівнянь, що слугують для опису таких систем.

Одним із основних понять теорії катастроф є біфуркація (роздвоєння, утворення вилки) або катастрофа — якісна стрибкоподібна перебудова системи з плавною зміною параметрів.

До точки біфуркації система має один шлях розвитку, її поведінка цілком передбачувана. Точка біфуркації — такий період у розвитку системи, коли колишній стійкий, лінійний, передбачуваний шлях розвитку системи стає неможливим. Це точка критичної нестійкості розвитку, в якій система перебудовується, вибирає один із двох можливих шляхів подальшого розвитку, тобто відбувається певний фазовий перехід. Особливість точки біфуркації в тому, що точно передбачити вибір шляху, яким піде подальший розвиток системи, неможливо [6].

У цій точці система перебуває в стані нестійкої рівноваги і стає чутливою до зневажливо малих впливів, що вирішують її долю. У точці біфуркації розвитку системи утворюється непереборний елемент випадковості, невизначеності, непередбачуваності.

Пройшовши через точку біфуркації, вибравши один із шляхів розвитку, система, прямуючи по ньому, знову стає стійкою, хід розвитку — лінійним. Поведінка системи знову стає цілком передбачуваною до наступної біфуркації.

Отже, розвиток системи, що містить періоди біфуркацій, поєднує випадковість і необхідність, детермінізм та непередбачуваність, можливість вибору з кількох розв'язків поблизу точки біфуркації, несподівано сильного відгуку на слабку дію (і навпаки, слабкого відгуку на сильний вплив, коли точку біфуркації пройдено).

У захищеній інфокомунікаційній системі спеціального призначення використовується режим комутації пакетів. Потрібно дослідити черги вимог, які виникають через нерівновагу між інтенсивністю вхідного потоку та швидкістю оброблення заявок у комутаторі. Це можна зробити за допомогою математичної моделі двовимірної потокової системи:

$$\dot{x} = a(x)x - xy,$$
$$\dot{y} = xy - \mu y.$$

Отримана система є динамічною моделлю, яка залежить від інтенсивності вхідного потоку — «запит системи» та швидкості оброблення заявок у комутаторі — «стан системи».

В основу запропонованої моделі покладено такі ідеалізовані уявлення про характер взаємозв'язку між інтенсивністю вхідного потоку та швидкістю оброблення заявок у комутаторі:

• якщо запити надходять незалежно один від одного, то такий потік доцільно описати законом розподілення Пуассона з інтенсивністю λ, яка характеризує кількість вимог в одиницю часу;

• середня кількість запитів у системі дорівнює добутку середнього часу перебування у системі та середнього темпу їх прибування;

• кількість запитів у системі з постійним коефіцієнтом проходить через комутатор, що характеризується швидкістю μ, яке є випадковою величиною, що описується експоненціальним законом і характеризується кількістю вимог в одиницю часу;

• будь-які додаткові чинники, що впливають на процес взаємозв'язку, відсутні.

Стан рівноваги визначається із системи рівнянь, коли швидкість дорівнює нулю:

$$f(x,y) = \alpha(x)x - xy = 0,$$
$$g(x,y) = xy - \mu y = 0.$$

Нам потрібно знайти такі параметри мережі, для яких розглядувана система буде в рівновазі.

Динаміка малих збурень в околі точки рівноваги розраховуватиметься за матрицею збурень:

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} f'_x(x_0,y_0) & f'_y(x_0,y_0) \\ g'_x(x_0,y_0) & g'_y(x_0,y_0) \end{pmatrix}.$$

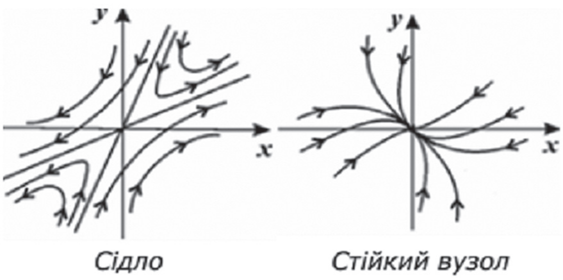
Для визначення характеру рівноваги обчислюють власні значення цієї матриці і залежно від отриманого результату — власні числа, що визначають стан рівноваги. При цьому в розглядуваній системі можливі два види точок рівноваги — вузол та сідло.

Якщо маємо особливу точку типу «вузол», то можна говорити про систему, якій характерний безколивний перехід із довільного початкового стану в стаціонарний. Тобто мережа працює стабільно.

Як відомо, для створення сучасних ультращільних інфокомунікаційних мереж спеціального призначення потрібно мінімізувати затримку інформації, що передається. Цей показник є найголовнішим у надзвичайних ситуаціях.

Особливі точки типу «сідло» відіграють важливу роль у так званих «тригерних» динамічних системах, що мають такі три точки: дві стійкі і одну завжди нестійку — сідло, що лежить між ними. Залежно від того, по який бік від сідла розміщено початковий стан системи, відображальна точка потрапляє в зону тяжіння тієї або іншої стійкої особливої точки. У цьому разі виникає збій у системі, який може залежати як від підвищених вимог до мережі, тобто великої кількості запитів, так і від технічного стану мережі.

Визначення надзвичайних ситуацій математично описується векторним полем у фазовому просторі. Точка фазового простору задає стан параметрів інфокомунікаційної мережі [6]. Прикладений у цій точці вектор вказує швидкість зміни стану. У деяких точках вектор може обертатися в нуль. Такі точки називаються положеннями рівноваги (стан не змінюється з плином часу). Фазовий простір системи, що описує залежність затримки переданої інформації від швидкості оброблення пакетів у вузлі комутації зображено на рисунку. За віссю абсцис відкладено інтенсивність надходження вимог λ у вузол комутації τ, а за віссю ординат — затримку інформації, що передається, за заданої швидкості опрацювання вимог μ у вузлі комутації.



Фазовий простір системи

Криві у фазовому просторі, утворені послідовними станами процесу, називаються фазовими кривими.

Отже, досліджуючи залежності показників якості від параметрів захищеної інфокомунікаційної мережі спеціального призначення, фазові портрети в околі точки рівноваги показують, стійка система чи ні. Тобто під час функціонування мережі зберігається необхідна надійність і живучість.

Висновки

З огляду на основи теорії катастроф, випадковий характер чинників, що впливають на якість інфокомунікаційної мережі спеціального призначення, здійснений аналіз двовимірної потокової динамічної системи та сталі закони масового обслуговування, можна дійти таких висновків:

♦ нагромадження вимог мережі сприяє зростанню черги у вузлах комутації при $\rho \geq 1 \left(\rho = \dfrac{\lambda}{\mu}\right)$, де λ — інтенсивність вхідного потоку; μ — швидкість оброблення заявок у комутаторі. У цьому разі маємо стан перенасичення запитів, що є небезпечним для системи і може спричинювати збій мережі;

♦ інтенсивність надходження вимог відповідає швидкості їх оброблення в комутаторі при $\rho \approx 1$, тобто система перебуває в рівновазі, черг не виникає, робота системи стабільна;

♦ комутатор працює вхолосту, вимог у системі немає, тобто послуги для користувачів надмірно дорогі при $\rho \leq 1$.

Список використаної літератури

1. ***Беркман Л. Н.*** *Инвариантные системы управления сетями связи // Зв'язок. 2000. № 2. С. 30.*

2. ***Васильківський М. В., Болдинюк С. О.*** *Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж 5G/6G // Вісник Хмельн. нац. ун-ту. 2022. №6. Т. 1. (315). С. 53–60.*

*3. **Дао Ч. Н.** Метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами // Электросвязь. 2018. № 8. С. 37–44.*

*4. **Наукоємні** технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах: монографія / за заг. редакцією В. М. Безрука, Л. С. Глоби, О. Є Стрижака. Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. 194 с.*

*5. **Толубко В. Б., Беркман Л. Н.** Методи оптимізації: підручник для студентів вищих навч. закладів за напрямком «Телекомунікації». ДУТ, 2016. 442 с.*

*6. **Арнольд В. И.** Теория катастроф. М.: изд-во «Наука», 1990. 128 с.*

*7. **Ногин В. Д.** Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 176 с.*

*8. **Безрук В. М., Чеботарева Д. В., Скорик Ю. В.** Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций. Харьков: СМИТ, 2017. 256 с.*

L. N. Berkman, O. V. Drobyk, A. G. Zakharzhevskyi, V. O. Vlasenko

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A SPECIAL PURPOSE INFOCOMMUNICATION NETWORK UNDER THE CONDITIONS OF THE INFLUENCE OF RANDOM FACTORS ON THE BASE OF THE THEORY OF DISASTER

The problem of creating secure special-purpose information communication networks based on public access channels with a priori unknown structure and functioning algorithms optimized according to the criteria of structural and functional integrity requires further consideration and resolution.

The found ways of solving the scientific problem will contribute to the construction of special-purpose protected information communication networks based on public access channels using a mathematical apparatus for determining the saddle point in the process of network optimization, which will ensure the reliability and survivability of the network in emergency situations.

Keywords: information communication network; multi-criteria optimization; random factors.