

УДК 621.391; 519.863 (045)

Толубко В. Б., докт. техн. наук, проф. (Тел.: +389 44 248 85 97)

Беркман Л. Н., докт. техн. наук, проф. (Тел.: +389 44 249 25 70. E-mail : berkman@duikt.edu.ua)

Комарова Л. О., канд. фіз.-мат. наук, с.н.с. (Тел.: +380 44 249 25 39. E-mail : lacosta_k@ukr.net)

Орлов Є. В., аспірант (Тел. +380 44 248 75 97. E-mail: evorlov@ukr.net)

(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ

Толубко В. Б., Беркман Л. Н., Комарова Л. О., Орлов Є. В. Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж. Розглядається метод багатокритеріальної оптимізації багаторівневих мереж, який дозволяє здійснити векторний синтез системи управління (СУ) програмно-конфігурованих мереж. Визначено, що процес пошуку оптимального розв'язання в задачах проектування як при багатокритеріальній оптимізації, так і при врахуванні випадкових чинників практично зводиться до числового розв'язання детермінованої задачі нелінійної оптимізації. Розроблено метод визначення результуючої цільової функції, який дозволяє здійснити векторний синтез СУ інфокомунікаційної мережі. Показано, що при проектуванні СУ доцільно зупинитися на оптимальній кількості показників якості, які доцільно враховувати при синтезі.

Ключові слова: програмно-конфігурована мережа, SDN, система управління, багатокритеріальна оптимізація, векторний синтез, цільова функція

Толубко В. Б., Беркман Л. Н., Комарова Л. А., Орлов Є. В. Многокритериальная оптимизация программно-конфигурируемых сетей. Рассматривается метод многокритериальной оптимизации многоуровневых сетей, который позволяет осуществить векторный синтез системы управления (СУ) программно-конфигурируемых сетей. Определено, что процесс поиска оптимального решения в задачах проектирования как при многокритериальной оптимизации, так и при учете случайных факторов практически сводится к решению детерминированной задачи нелинейной оптимизации. Разработан метод определения результирующей целевой функции, который позволяет осуществить векторный синтез СУ инфокоммуникационной сети. Показано, что при проектировании СУ целесообразно остановиться на оптимальном количестве показателей качества, которые целесообразно учитывать при синтезе.

Ключевые слова: программно-конфигурируемая сеть, SDN, система управления, многокритериальная оптимизация, векторный синтез, целевая функция

Tolubko V. B., Berkman L. N., Komarova L. O., Orlov Ye. V. Multicriterion optimization of software-defined networks. The paper discusses the method of multicriterion optimization of multilayer networks that allows for the vector synthesis of control system (CS) software-defined networks. There is determined the process of finding the optimal solution in problems of design as in multicriterion optimization, and taking into account the random factors practically reduced to the solution of a deterministic problem of nonlinear optimization. The method of determining the resultant objective function, which allows for vector synthesis CS of information and communication network is considered. It is shown the design of CS advisable to stay on the optimum number of quality indicators, which should be taken into account during the synthesis.

Keywords: software-defined network, SDN, control system, multicriterion optimization, vector synthesis, objective function

Вступ. Комп'ютерна мережа, як основоположна інфраструктура, є стратегічним чинником розвитку сучасних інформаційних технологій (ІТ). Проте архітектура Мережі, основи якої закладалися ще в кінці минулому столітті, застаріла і вже не завжди здатна адекватно та ефективно реагувати на нові потреби. Сучасний етап розвитку комп'ютерних систем можна охарактеризувати зростанням ролі розподілених мережевих структур внаслідок об'єктивного зниження темпів зростання продуктивності окремих вузлів та необхідністю організації їх спільної роботи для досягнення потрібних характеристик.

Одним із напрямів “модернізації” класичного підходу до організації мережевої архітектури є створення програмно-конфігурованих мереж (ПКМ, англ. – Software Defined Networks, SDN), що використовують протокол OpenFlow. Саме тому, програмно-конфігуровані мережі – одна з самих “горячих” на сьогодні технологій, що встали на шляху колапсу Мережі. За рахунок підвищення якості та збільшення обсягів надання послуг кількість управляючої інформації в системі управління (СУ) стрімко зростає. Внаслідок цього СУ може поглинути основну мережу.

Концепція ПКМ припускає новий підхід до організації мережевої взаємодії, при якій рівні управління мережею та пристроїв передачі даних розділяються, а функції рівня управління реалізуються окремим вузлом, що взаємодіє з мережевими пристроями. Ця концепція розходиться з класичною моделлю організації роботи комутаторів та маршрутизаторів в мережах зв’язку, в якій функції управління та передачі трафіку об’єднані в рамках одного пристрою [1].

Логічно-централізоване управління даними в мережі припускає винесення всіх функцій управління мережею на окремий фізичний сервер (контролер), який знаходиться у веденні адміністратора мережі. Контролер може управляти як одним, так і декількома OpenFlow-комутаторами [2] і містить мережеву операційну систему, що надає мережеві сервіси по низькорівневому управлінню мережею, сегментами мережі та станом мережевих елементів, а також додатки, що здійснюють високорівневе управління мережею та потоками даних [3].

Розв’язання задачі побудови оптимальної структури передавання даних для системи управління мережею потребує вирішення таких ключових питань як вибір та обґрунтування мети оптимізації, вибір кількості та складу критеріїв оптимізації, узгодження мети з наявними можливостями, тобто визначення обмежень та отримання експериментального значення показника якості з врахуванням обмежень [4].

Вибір та обґрунтування мети багатокритеріальної оптимізації передбачають визначення критеріїв ефективності роботи системи управління та цільових функцій, які якнайповніше відображають цілі оптимізації.

Багатокритеріальна оптимізація для дослідження багаторівневих мереж.

Оптимізація параметрів ПКМ містить у собі оптимізацію як самої системи управління, так і процесу її проектування. Обидва напрямку оптимізації взаємозалежні. Показники якості розроблюваної системи істотно залежать від оптимальності процесу та терміну часу розробки, засобів устаткування. У свою чергу, час і засоби, затрачені на процес розробки системи в значній мірі визначаються структурою системи та її параметрами.

Проте задача одночасного вирішення оптимізації системи управління та процесу її розробки – складна. Тому, в статті основна увага буде приділена оптимізації системи управління ПКМ. В процесі розробки будемо враховувати лише оптимальну характеристику – показник вартості – K_p (K_p враховує також затрати на проектування).

Використання методів багатокритеріальної оптимізації для дослідження ПКМ, як багаторівневої мережі, є безсумнівним. Процес пошуку оптимального рішення в задачах проектування мереж (як при багатокритеріальній оптимізації, так і з врахуванням непрогнозованих факторів) практично зводиться до кількісного рішення задачі нелінійної оптимізації.

Задачі нелінійної оптимізації можна розділити на два класи [5]:

– задачі пошуку безумовного мінімуму *одновимірних* унімодальних функцій; *багатоекстремальних* довільних кривих; *багатопараметричних* унімодальних функцій; *багатоекстремальних* функцій декількох змінних;

– задачі нелінійного програмування з обмеженнями, які створюють *опуклу множину* допустимих рішень (задачі опуклого програмування); та з обмеженнями, які створюють *неопуклу множину* допустимих рішень (задачі неопуклого програмування).

При проектуванні мереж доцільно зупинитися на виборі кількості показників якості, що враховуються при синтезі. Кількість показників, які характеризують якість реальної системи, може бути дуже великою. Це означає, що чим більша кількість показників якості враховується при синтезі системи, тим більш досконалою буде синтезована система. Тому на практиці існує оптимальна кількість показників якості, яку необхідно враховувати. Введення додаткових показників якості призводить не до покращення, а до погіршення результатів синтезу.

При проектуванні ПКМ необхідно враховувати наступні показники:

1. Кількість управляючої інформації (а отже, і необхідну пропускну спроможність каналів), що забезпечує задану точність параметрів об'єктів мережі. При цьому визначається мінімальна кількість управляючої інформації, яка дозволяє мережі мати як властивість адаптивності до плинноспрогнозованих збурень, так й інваріантності до заздалегідь непрогнозованих факторів (K_1);

2. Затримка управляючої інформації, при якій час передавання команд управління до контрольованих об'єктів не перевищує заданого (K_2);

3. Достовірність (вірогідність помилки) при передаванні інформації (K_3);

4. Вартість (K_4).

Кожна система характеризується вектором показників якості: $K=(k_1, k_2, \dots, k_m)$. У m -мірному просторі R_m показників якості k_1, \dots, k_m кожній СУ відповідає єдине визначене значення вектора і навпаки, кожному вектору K відповідає єдина цілком визначена система. У просторі R_m всім строго допустимим значенням вектора K відповідає множина точок (множина строго допустима, що задовольняє цим обмеженням). Вид цієї множини визначається сукупністю умов і обмежень, які накладаються на синтезовану систему та її показники якості.

Задача векторного синтезу зводиться до того, щоб з множини строго допустимих точок вибрати таку точку (систему), яка має найкраще значення вектора K . При цьому передбачається, що поняття "найкращого вектора K " уточнюється, виходячи з умови задачі.

Суб'єктивну результуючу цільову функцію доцільно представити так:

$$\left. \begin{aligned} K_p &= C_1 K_1 + C_2 K_2 + C_3 K_3 + C_4 K_4; \\ K_i &= K_i' / K_{i0}; \quad \sum_{i=1}^m C_i = 1, \quad C_i > 0, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \right\}$$

де K_{i0} – деяке опорне значення ненормованого показника якості K_i' ;

C_i – вагові коефіцієнти, котрі вибираються, виходячи з відносної важливості кожного з показників якості K_1, \dots, K_m , за зростанням значимості показника K_i . Іншими словами – чим більш суттєво показник K_i мінімізується у процесі синтезу, тим більшою обирається відповідна йому вага C_i ;

$$K_p = \min_{S \in M} f_p(K_1, \dots, K_i, \dots, K_m).$$

Будемо вважати оптимальною мережу, що забезпечує виконання умов:

$$K_i \leq K_{im}, \quad i = \overline{1, m},$$

де K_{im} – значення показника якості K_i максимально допустиме, з точки зору вимог замовника до системи управління;

M – множина, до якої входять допустимі параметри системи S .

Визначення кожного з K_{im} – це окремі самостійні завдання. З множини варіантів побудови мережі необхідно вибрати найкращий. Якість системи характеризується такими основними показниками якості: K_1, K_2, K_3, K_4 .

$$K_p = \min_{S \in M} f_p(K_1, K_2, K_3, K_4).$$

Зазначимо, що серед цих чотирьох показників якості показники K_2 і K_3, K_3 і K_4 суперечливі. Як відомо, чим менша затримка інформації K_2 , тим більша вартість. Ці показники пов'язані обернено пропорційною залежністю: $K_4 = f(K_3)$, при цьому затримка інформації залежить від пропускної спроможності каналів: $K_3 = f(K_2)$. Тоді цільова функція має вигляд:

$$K_p = [C_1 K_1; C_2 K_2; C_3 K_3; C_4 f(K_3)] = \min [C_1 \frac{K_1}{K_{1m}}; C_2 \frac{K_2}{K_{2m}}; C_3 \frac{f(K_2)}{K_{3m}}; C_4 \frac{f(K_3)}{K_{4m}}],$$

де $K_4 = f(K_3); K_3 = f(K_2)$.

При цьому необхідно розглянути допустимі варіанти зміни K_i від мінімально можливих до максимальних значень, вибрати оптимальні. Для вирішення цієї задачі потрібно визначити максимальні та мінімальні значення коефіцієнтів K_i .

Оберемо крок ΔK_i , тобто зміни показників якості від $K_i \min$ до $K_i \max$. Нехай вагові коефіцієнти C_i становлять: $C_1 = 0,3; C_2 = 0,2; C_3 = 0,4; C_4 = 0,1$. Ці коефіцієнти обрані за допомогою методу експертних оцінок, коли найбільш важливою є потреба мінімізації затримки переданої інформації, тоді як пропускна спроможність каналів та вірогідність помилки мають приблизно однакові пріоритети. Вартість обирається мінімально можливою, однак необхідною для виконання решти вимог до якості системи, тому їх вага мінімальна. Виходячи з вищенаведеного, узагальнений критерій оптимальності представимо у вигляді:

$$K_p = \min (C_1 \frac{K_{1\min} + \Delta K_{j1}}{K_{1m}}; C_2 \frac{K_{2\min} + \Delta K_{j2}}{K_{2m}}; C_3 \frac{K_{3\min} + \Delta K_{j3}}{K_{3m}}; C_4 \frac{K_{4\min} + \Delta K_{j4}}{K_{4m}}),$$

$$\text{де } \frac{K_{4\min} + \Delta K_{j4}}{K_{4m}} = f\left(\frac{K_{3\min} + \Delta K_{j3}}{K_{3m}}\right).$$

Тоді, у даному випадку, оптимальною буде система S_i , де K_i буде мінімальним.

Вирішення оптимізаційної задачі проектування із врахуванням випадкових факторів дозволяє досить чітко описати процеси, які протікають у системі управління. Критерій оптимальності й обмеження за фіксованими значеннями керованих змінних x – це випадкові величини, що залежать від вектора зовнішніх факторів y :

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

де $D = \{x [g_i(x, y)] \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$; D – область рішень.

Запропонований метод отримання узагальненого критерію K_p при оптимізації програмно-конфігурованої мережі дозволяє одержати ефективні значення параметрів мережі з врахуванням поставлених до них вимог, навіть в надзвичайних ситуаціях. Вимоги до точності управління мережею часто поєднуються з вимогами збільшення швидкодії.

Врахування випадкових чинників в задачах оптимізації. При розгляді імовірності математичної моделі об'єкту оптимізації $\varphi = \varphi(x, y)$ постановка задачі оптимального проектування потребує уточнення, оскільки критерії оптимальності та обмеження при фіксованих значеннях керованих змінних $x \in D$ випадковими величинами, залежними від вектора зовнішніх чинників y (1).

При розв'язанні задачі (1) можливі дві ситуації:

- оптимальне розв'язання x потрібно визначити до реалізації чинників y , тобто незалежно від їх конкретних значень;
- оптимальне розв'язання x необхідно визначити після того, як стали відомі чинники y .

У першому випадку врахування випадкових значень вектора y в умовах задачі оптимізації (1) зводиться, за суттю, до введення нового критерію оптимальності та обмежень, які дозволяють позбавитися випадковості або невизначеності.

Залежно від ступеня інформованості про закон розподілу випадкових величин y можна розглядати три випадки [6]:

- про факти y нічого не відомо, крім того, що вони належать деякій сфері D_y ; $y \in D$;
- для чинників y задана довільна, але відома функція розподілу $f(y)$;
- для чинників y тип закону розподілу відомий з точністю до вектора параметрів α , тобто задана функція $f(y, \alpha)$, для якої невідомі параметри α , належні сфері D_α .

Залежно від ступеня інформованості про закон розподілу випадкових чинників вибір нового критерію оптимальності і обмежень доводиться здійснювати або розраховувавши на якнайгірший випадок щодо значень вектора y , або орієнтуючись на деякі середні значення критерію і обмежень.

У тих випадках, коли тільки відомо, що $y \in D_y$, критерій оптимальності призначається з умови забезпечення якнайкращого результату в найгіршому по невизначеності y випадку:

$$Q(x) = \max_{y \in D_y} Q(x, y). \quad (2)$$

Аналогічно для обмеження можна записати

$$g_i(x) = \max_{y \in D_y} g_i(x, y). \quad (3)$$

Підставляючи (2), (3) до:

$$Q = Q(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

за відсутності інформації про чинники y (випадок невизначеності) приходимо до детермінованої задачі оптимізації:

$$\min_{x \in D} \min_{y \in D_y} Q(x, y), \text{ де } D = \left\{ x \left[\min_{y \in D} g_i(x, y) \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \right] \right\}.$$

Поява інформації про те, що y – випадкові величини, дозволяє вибрати критерій оптимальності переважнішим, ніж (2). Це пов'язано з тим, що знання законів розподілу в критерії (2) нічого нового не дає в порівнянні з випадком невизначеності. Тому критерій оптимальності та обмеження необхідно змінити так, щоб одержаний по них результат був якнайкращим “в середньому” для сукупності ситуацій, що задаються законом розподілу $f(y)$. В цьому випадку ми відходимо в бік від “обережності”, властивої функціям (2), (3), і йдемо на деякий ризик, пов'язаний з тим, що якнайкраще при цьому розв'язання може і не бути оптимальним в кожній конкретній ситуації.

При відомих законах розподілу як критерій оптимальності можна використовувати математичне очікування (середнє значення) випадкової функції $Q(x, y)$:

$$Q(x) = M\{Q(x, y)\} = \int_{y \in D_y} Q(x, y) df(y), \quad (4)$$

або квадрат стандартного відхилення значення функції $Q(x, y)$ від заданого рівня Q^+ :

$$Q(x) = M\left\{\left[Q(x, y) - Q^+\right]^2\right\} = \int_{y \in D_y} \left[Q(x, y) - Q^+\right]^2 df(y), \quad (5)$$

або імовірність того, що випадкова величина $Q(x, y)$ перевищить деякий заданий рівень Q^- :

$$Q(x) = P\{Q(x, y) > Q^-\} \quad (6)$$

тощо.

Використовуючи вирази типу (4)...(6) як критерій оптимальності та обмежень, для випадку відомих законів розподілу приходимо до однієї з таких задач стохастичного програмування [7].

Усереднена задача стохастичного програмування. Задача полягає в знаходженні вектору керованих змінних x , який забезпечує

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

за умови

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

За наявності інформації про закони розподілу випадкових чинників, заданих з точністю до вектора параметрів α , вирази (4)...(6) стають функціями від цих змінних. При цьому про вектор α нічого не відомо, крім того, що він належить сфері D_α . В цьому випадку необхідно використовувати комбінований критерій, що поєднує в собі вираз (2) і один з виразів (4)...(6). Це дозволяє перейти від задачі (1) до однієї із задач стохастичного програмування. Наприклад, усереднена задача стохастичного програмування в цьому випадку формулюється так. Знайти вектор керованих x , який забезпечує

$$\min_x \max_{\alpha \in D_\alpha} \int_{y \in D_y} Q(x, y) df(y, \alpha) \quad \text{за умови} \quad P\{g_i(x, y) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m\} > p.$$

Таким чином визначення оптимального розв'язання x , незалежного від конкретної реалізації y , зводиться до розв'язання задачі нелінійної оптимізації $\min_{x \in D} Q(x)$, в якій статистична природа початкової задачі (1) виявляється тільки на етапі обчислення критерію оптимальності та обмежень.

При визначенні оптимального розв'язання після того, як стають відомими значення y , задача (2) аналогічна звичайній детермінованій задачі оптимізації. При цьому різним реалізаціям випадкових чинників y , взагалі кажучи, відповідають різні оптимальні розв'язання $x=x(y)$, тобто при зміні умов в задачі оптимізації ми можемо перебудувувати оптимальне розв'язання [8].

Висновки. Таким чином, процес пошуку оптимального розв'язання в задачах проектування як при багатокритеріальній оптимізації, так і при обліку випадкових чинників практично зводиться до числового розв'язання детермінованої задачі нелінійної оптимізації.

Розроблено метод визначення результуючої цільової функції, який дозволяє здійснити векторний синтез СУ. Показано, що при проектуванні СУ доцільно зупинитися на виборі кількості показників якості, які враховуються при синтезі. Показано, що кількість показників, які характеризують якість реальної системи, може бути дуже великою. Це означає, що чим більша кількість показників якості враховується при синтезі системи, тим більш досконалою буде синтезована система. В той час, коли більше врахованих показників якості, тоді складніше провести синтез без введення порівняно грубих припущень. Тому на практиці існує оптимальна кількість показників якості, яку необхідно враховувати. Введення додаткових показників якості призводить не до покращення, а до погіршення результатів синтезу.

Література

1. Ефимушкин В. А. Сравнительный анализ архитектур и протоколов программно-конфигурируемых сетей / В. А. Ефимушкин, Т. В. Ледовских, Д. М. Корабельников, Д. Н. Языков // *Электросвязь*. – 2014. – №8. – 9 с.
2. Limoncelli T. OpenFlow: A Radical New Idea in Networking / Thomas A. Limoncelli // *Communications of the ACM: N.Y.*. – 2012. – Т. 55, № 8. – Р. 42-47.
3. Смелянский Р. В. Программно-конфигурируемые сети [Электронный ресурс] / Р. В. Смелянский // *Открытые системы*. – 2012. – № 9. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2012/09/13032491>. – Дата доступа: 05.04.2014.
4. Стеклов В. К. Особенности проектирования системы управления интеллектуальной сетью / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман // *Львів: Вісник державного університету «Львівська політехніка»*. – 2000. – №387. – С. 19-22.
5. Розробка принципів побудови системи керування ІФМЗ / Звіт НИЦ ЛКС Київського інституту зв'язку. – Київ, 1997. – 220 с.
6. Колобов С. О. Аналіз та синтез систем управління конвергентних мереж: дис. канд. техн. наук; спец. 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі / С. О. Колобов: – Київ, 2009. – С. 118-119.
7. Рудик Л. В. Введення в архітектурну концепцію інтелектуальної мережі / Л. В. Рудик // *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції студентства та молоді. “Світ інформації та телекомунікації”*. – Київ : 4-6 грудня 2002 р. – С. 81-84.
8. Стеклов В. К. Определение моментов переключения сигнала управления оптимальной по быстродействию системы ФАП с оптимизируемым переходным процессом МКУ / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, О. Н. Карась // *Радиотехника*. – 2005. – №142. – С. 125-128.

Дата надходження в редакцію: 19.09.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М. М. Климаш