

Юрій Васильович Кравченко
Роман Антонович Миколайчук

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З ДИНАМІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Під час вирішення задачі синтезу структури складних технічних систем широко застосовуються методи дискретної оптимізації [1-3]. Разом з тим, нерідко виникає проблема створення складних технічних систем адаптивного характеру, які повинні забезпечити досягнення необхідного рівня ефективності в умовах зміни просторово-часового розподілу об'єктів впливу (зовнішніх об'єктів, на які впливає система). При цьому, закономірності зазначеного розподілу, як правило, мають достатньо високий рівень невизначеності. Незавжди дійти висновку, що в даному випадку найбільш перспективним є використання систем з динамічною структурою. Передумовою побудови зазначених систем є розвиток інформаційних технологій. Спроможність сучасних засобів обробки інформації у стислі терміни визначати оптимальну структуру системи, в залежності від просторово-часового розподілу об'єктів впливу, дозволить досягнути прийнятнього часу реагування та забезпечити можливість зміни структури системи у реальному часі. Разом з тим, виникає потреба у створенні відповідних методологічних основ побудови такого роду систем.

В роботах [4-7], для синтезу структури складних технічних систем (у подальшому – систем) використовуються серії градієнтних алгоритмів на матроїдних структурах. Урахування апріорної інформації щодо характеру цільової функції системи та часткове упорядкування множини допустимих рішень за окремими показниками дають змогу значно зменшити необхідну кількість обчислень та забезпечити визначення оптимальної структури у прийнятний період часу. При цьому, не зважаючи на приблизний характер оптимізаційних алгоритмів, для класу порядково-опуклих цільових функцій, отримується точне рішення.

Разом з тим, використання вищезазначеного підходу до систем з динамічною структурою зазнає значних труднощів, через виникнення необхідності синтезу певної послідовності оптимальних у просторово-часовому відношенні структур із додатковим урахуванням критерію мінімізації витрат на їх трансформацію.

Формулювання мети статті. Виклад основного матеріалу

У зв'язку з цим, метою статті є визначення концептуального підходу до синтезу складних технічних систем з динамічною структурою, в рамках подальшого розвитку існуючих методів дискретної оптимізації [4-7].

Формалізуємо структуру системи через простір параметрів $A = \langle V, D, F \rangle$,

де V – множина абстрактних елементів системи,

D – множина абстрактних зв'язків між елементами,

F – множина функцій абстрактних елементів і зв'язків. Тоді параметр α характеризує конкретний стан системи, причому $\alpha = \langle v, d, f \rangle$,

де підмножина $v \subseteq V$, $|v| \leq |V|$, підмножина $d \subseteq D$, $|d| \leq |D|$, а підмножина $f \subseteq F$, $|f| \leq |F|$ [5].

Аналогічним чином можливо формалізувати простір X множини X показників зовнішніх факторів, які впливають на ефективність системи, із урахуванням їх залежності від часу через абстрактну множину відповідних функцій Q :

$X = \langle X, Q \rangle$, тоді параметр $\chi = \langle x, q \rangle$ характеризує поточний стан зовнішніх факторів, що впливають на ефективність системи ($x \in X$, $|x| \leq |X|$,

$q \in Q$, $|q| \leq |Q|$). Окремо позначимо множину об'єктів впливу системи $R, R \subset X$. Оптимальну структуру для визначених значень показників зовнішніх факторів позначимо $\alpha^* \{ \chi \}$ або α^* (у фігурних дужках будуть, за необхідністю, наводитися умови та обмеження оптимізації).

Введемо кінцеву множину сегментів простору E . Розбиття простору на сегменти проводиться відповідно до їх важливості з точки зору функціонування системи. У більшості випадків процес функціонування системи відносно до простору має спрямований характер. Це дозволяє задати на множині E відношення часткового порядку \prec : «граничить з», а також встановити початковий (мінімальний) та кінцевий (максимальний) сегменти. В такому разі множина (E, \prec) являє собою решітку.

Тоді розташування у просторі певної підмножини структури системи (об'єктів впливу системи) можливо позначити, відповідно, як

$$\alpha_{E_i}, \alpha_{E_j} \subseteq \alpha, E_i \in E, i \in \overline{0, |E|-1},$$

$$(r_{E_j}, r_{E_j} \subseteq R, E_j \in E, j \in \overline{0, |E|-1}).$$

Звідси витікає:

$$\alpha = \alpha_E = \bigcup_E \alpha_{E_i}, (r = r_E = \bigcup_E r_{E_j}, r \subseteq R).$$

Враховуючи особливості часового розподілу об'єктів впливу, існують певні проміжки часу, впродовж яких параметри взаємодії системи з вказаними об'єктами можливо розглядати як сталі величини. Відповідно зазначеному, відрізок часу функціонування системи з динамічною структурою можливо поділити на періоди. Зазначені періоди часу суворо упорядковані та не перетинаються, тому можуть бути подані у вигляді ланцюгу інтервалів часу

$$T, T = \{ \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_n < \dots < \tau_{|T|-1} \}$$

$$\forall \tau_k : \tau_k \cap \bigcup_{n \neq k} \tau_n = \emptyset, n, k \in \overline{0, |T|-1}, \text{ якому}$$

відповідатимуть відповідні ланцюги поточного просторового розподілу об'єктів впливу:

$$r(T), r(T) = \{ r(\tau_0) < r(\tau_1) < \dots < r(\tau_n) < \dots < r_{|T|-1} \}$$

$$\forall r(T) \subseteq R,$$

а також поточних структур системи:

$$\alpha(T), \alpha(T) = \{ \alpha(\tau_0) < \alpha(\tau_1) < \dots < \alpha(\tau_n) < \dots < \alpha_{|T|-1} \} \forall \alpha(T) \subseteq A.$$

Позначимо доступний час на створення структури системи для визначеного періоду функціонування системи, як $t \in T$, та виділимо його складові, а саме: до початку (t_0) та в ході (t_x) періоду функціонування системи

$$\forall \alpha_k, \alpha_m, \alpha_1 \subset A : \begin{cases} W(\alpha_k) + W(\alpha_m) \leq W(\alpha_1) \\ |\alpha_k \cup \alpha_m| \leq |\alpha_1| \end{cases} \Rightarrow W(\alpha_k \cup \alpha_m) \leq W(\alpha_1) \quad (2)$$

У випадку дотримання умови (2), завдання синтезу структури системи (1) запишеться у вигляді:

$$\alpha^* = \alpha(T)^* = \max_{E, T} \sum_T \sum_E W(\alpha_{E_i}(\tau_n), r_{E_j}(\tau_n)). \quad (3)$$

Таким чином, на основі проведеної вище формалізації системи з динамічною структурою, пропонується новий концептуальний підхід до вирішення задачі синтезу (3). Сутність зазначеного підходу полягає у проведенні апріорної декомпозиції структури системи, забезпеченні спрямованості процесу оптимізації та використанні проміжних та кінцевих результатів розрахунків, як під час оптимізації, так і в ході функціонування системи.

Можливість проведення декомпозиції витікає з опуклого характеру цільової функції, що дає змогу застосувати адитивний підхід до оцінки ефективності структури системи через

($t = t_0 + t_x, t > 0$). Необхідний для створення певної структури системи час, в свою чергу, позначимо через відображення $h_t(\alpha), h_t(\alpha) > 0$.

Зрозуміло, що для випадку $h_t(\alpha) > t \Rightarrow |\alpha| > |\alpha^* \{t\}|$,

необхідно зменшувати потужність структури системи. З $h_t(\alpha) \leq t_x$, випливає можливість створення структури безпосередньо в ході періоду функціонування системи. Разом з цим, в даному випадку існує можливість збільшення потужності структури. Тому найбільш цікавим є випадок $t_x < h_t(\alpha) \leq t$, що дозволяє мати найбільш потужну структуру, частина якої, проте, повинна створюватись до початку періоду функціонування системи, тобто в умовах невизначеності просторово-часового розподілу об'єктів впливу. Вказаний чинник створює певні складності пошуку структури системи, що забезпечувала б її найбільшу ефективність.

Представимо узагальнений показник ефективності W системи у вигляді $W = W(\alpha, \chi)$, або, для випадку, що розглядається у даній статті – $W = W(\alpha, r)$. Тоді завдання синтезу системи з динамічною структурою можливо подати у вигляді:

$$\alpha^* = \alpha(T)^* = \max_{E, T} W(\alpha_E(T), r_E(T)) \quad (1)$$

Для визначення узагальненого показника ефективності (1), як правило, застосовуються достатньо складна процедура, що ставить у відповідність структурі системи $\alpha \subset A$ певне значення показника ефективності W , – так звана цільова функція. Як вже зазначалося вище, відповідно до роботи [4], існує певний клас цільових функцій, для яких виконується умова:

ефективність її підструктур (3). В основу декомпозиції структури системи покладений час на її створення, що визначається із урахуванням мети функціонування системи, а також просторово-часовий розподіл об'єктів впливу.

Подолання невизначеності характеристик розподілу об'єктів впливу $r_E(T)$, пропонується здійснити за рахунок використання екстраполяційних методів. При цьому апріорно визначається мінімальний r_{min} .

$$r_{min} = \bigcup_{E, T} r_{min E_j}(\tau_n) \quad (r_{min E_j}(\tau_n) - \text{мінімальна}$$

кількість об'єктів, що підлягає впливу $\alpha_{E_j}(\tau_n)$ елементом структури) та прогнозований $r_{pr}, r_{pr} = \bigcup_{E, T} r_{pr E_j}(\tau_n)$ просторово-часовий розподіл об'єктів впливу.

Тоді, відповідно до різних варіацій співвідношення $\frac{t_x}{t_0}$, декомпозицію структури системи динамічного мінування можливо розглядати для випадків $r_{min} \in [r_{pr} \setminus r_{min}, r \setminus r_{pr}]$, тобто:

$$\alpha^{*t} = \alpha^{*t_{min}} \cup \alpha^{*t_{pr} \setminus r_{min}} \cup \alpha^{*t_{pr}},$$

$$t_0 \rightarrow h_t \left(\alpha^{*t_{min}} \cup \alpha^{*t_{pr} \setminus r_{min}} \right),$$

$$h_t \left(\alpha^{*t_{pr}} \right) \rightarrow t_x. \quad (4)$$

Це дає змогу отримати мінімальні втрати ефективності порядку $W(\alpha^{*t_{pr}}, r)$, при будь-якому просторово-часовому розподілу об'єктів впливу.

Таким чином, проведення декомпозиції структури системи відповідно до виразу (4) та просторово-часового розподілу її елементів дасть змогу вирішувати, замість однієї задачі оптимізації великої розмірності, низку задач малої розмірності, що дасть змогу забезпечити побудову оптимальної структури достатньо складної системи у відведені терміни. При цьому, виділяється підструктура, яку необхідно створити завчасно α^{*t_0} (базова частина системи), та створювана під час функціонування підструктура α^{*t_x} (динамічна частина): $\alpha^{*t_0} = \max_{h_t(\alpha) \leq t_0} W(\alpha, r_{pr})$, $\forall r, W(\alpha^{*t_0}, r) \geq W^{min}$, $\alpha^{*t_x} = \max_{h_t(\alpha) \leq t_x} W(\alpha, r \setminus r_{pr})$. Обидві зазначені підструктури, на даному етапі оптимізації, характеризуються максимально можливою кількістю елементів $|\alpha^{*t_0}|$, $|\alpha^{*t_x}|$ (потужністю бази).

Процес оптимізації розпочинається із визначення структури елементів базової частини системи $\alpha_E(t_0)$, із використанням описаного в роботах [4-7] підходу.

При цьому, декомпозиція базової підструктури дозволяє в декілька разів знизити необхідний обсяг обчислень, окрім того, врахування попередньо отриманих результатів дасть змогу додатково скоротити множину припустимих рішень, шляхом застосування процедури домінування згідно [4]. У подальшому проводиться синтез структури системи в цілому. Особливості даного етапу оптимізації наступні:

процес оптимізації проводиться послідовно для періодів часу функціонування системи τ_n ;

для початкового періоду в якості основи використовується отримана базова підструктура $\alpha_E(t_0)$, для подальших – структура попереднього періоду $\alpha_E(\tau_{n-1})$;

з метою нарощування структури застосовується метод послідовного збільшення потужності бази матроїду [8], який є подібним методу, описаному в роботі [6];

в процедуру часткового упорядкування множини припустимих рішень [4] вводяться додаткові характеристики елементів, що вказують «відстань» даного елемента від структури, отриманої на попередньому кроці роботи оптимізаційного алгоритму;

зберігається отриманий по закінченні кожного кроку роботи алгоритму проміжний результат.

За рахунок вищевказаних особливостей, процедура оптимізації набуває спрямованого характеру, тобто синтез структури системи відбувається в напрямку від базової підструктури до структури в цілому, а також від початкового періоду часу до моменту припинення функціонування системи (завершення створення її структури).

Під час функціонування системи, після виявлення розбіжностей між прогнозованим та реальним просторово-часовим розподілом об'єктів впливу розрахунок необхідних змін до структури

системи $\alpha_E(t)$ виконується аналогічно до попереднього етапу, але лише для необхідних сегментів простору. При цьому може бути врахована існуюча надмірність структури, процедура виявлення та використання якої описана в роботі [9].

Отримані в ході виконання оптимізаційного алгоритму результати являються собою упорядковану множину варіантів структури системи. Враховуючи задекларований характер цільової функції, підхід до декомпозиції системи та часового інтервалу, а також на основі принципу оптимальності Беллмана [10], кожен із зазначених варіантів являє собою оптимальну на певному кроці побудови системи структуру. Отже, результати оптимізації визначають, зокрема, оптимальну послідовність створення структури і тому можуть бути використані не тільки безпосередньо в ході проведення розрахунків, але й під час практичної побудови даної системи.

Висновки

Таким чином, описаний вище концептуальний підхід до синтезу складних технічних систем з динамічною структурою дозволяє, із застосуванням методів дискретної оптимізації, отримати оптимальну сукупність варіантів структури системи, впорядковану за збільшенням кількості елементів. Це дозволяє не тільки отримати оптимальну структури такого роду систем, але й послідовність їх побудови. При цьому, не зважаючи на збільшення складності структури, зберігається можливість проведення розрахунків у прийнятний період часу.

У порівнянні з результатами, отриманими за допомогою традиційних методів, запропонований підхід дозволяє досягнути значного підвищення

ефективності системи, в залежності від наявного часу на створення її структури.

Подальші дослідження доцільно проводити в

напрямку пошуку методів подальшого спрощення процедури оптимізації структури складних технічних систем з динамічною структурою.

Література

1. Баранов Г. Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г. Л. Баранов, А. В. Макаров. – К. : Наукова думка, 1986. – 272 с. **2. Большие** технические системы: проектирование и управление / Л.М. Артюшин, Ю.К. Зиятдинов, И.А. Попов, А.В. Харченко / Под ред. И. А. Попова. – Харьков: Факт, 1997. – 284 с. **3. Ковалев М. М.** Дискретная оптимизация (целочисленное программирование) / М.М. Ковалев. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 192 с. **4. Ковалев М. М.** Матроиды в дискретной оптимизации / М. М. Ковалев. – Минск : Изд-во «Университетское», 1987. – 222 с. **5. Кравченко Ю. В.** Методология многокритериальной дискретной оптимизации сложных технических систем на матроидных структурах / Ю.В. Кравченко, В. В. Афанасьев // Збірник наукових праць ІПМ в Е ім. Г.С. Пухова. – Вип. 22 – 1. – К. : ІПМЕ ім. Г.С. Пухова – 2003. – С. 73 – 78. **6. Неділько С.М.** Метод поетапного зменшення потужності бази перестановочного багатогранника для організації направленої перебору в задачах дискретної

оптимізації. / С.М. Неділько // Науковий журнал Інженерної академії України. – 2011. – № 4. – С. 135 – 139. **7. Емеличев В.А.** Многогранники, графы, оптимизация (комбинаторная теория многогранников) / В. А. Емеличев, М.М. Ковалев, М.А. Кравцов. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 344 с. **8. Кравченко Ю.В.** Применение метода последовательного увеличения ранга k-однородного матроида в задаче синтеза структуры псевдоспутниковой радионавигационной системы / Ю.В. Кравченко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: 2008. – №2 (2). – С. 19 – 22. **9. Неділько С.М.** Методика виявлення існуючої надмірності складних технічних систем для парирування негативного впливу дестабілізуючих факторів / С. М. Неділько // Збірник наукових праць НТУ «ХП». – 2011. – № 7. – С. 12 – 18. **10. Плотников А.Д.** Математическое программирование / А.Д. Плотников. // – М. : Энергия, 2006. – 171 с.

Проведена формалізація побудови системи з динамічною структурою. Предложено пространственно-временное распределение структуры системы. Определен концептуальный подход к синтезу систем с динамической структурой на основе методов дискретной оптимизации.

Ключевые слова: сложная техническая система, динамическая структура, дискретная оптимизация, декомпозиция, синтез.

The formalizing of the system with a dynamic structure was conducted. The space-time distribution of system structure was proposed. The conceptual approach to the construction of systems with dynamic structures based on discrete optimization was defined.

Key words: complex technical system, dynamic structure, discrete optimization, decomposition, synthesis.