

*Міністерство освіти і науки України  
Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника  
Представництво "Польська Академія Наук" в Києві  
Вінницький національний технічний університет  
Центр математичного моделювання ІППММ  
ім. Я.С.Підстригача НАН України  
AGH науково-технологічний університет  
ім. Ст.Сташіца, Польща  
Людзький університет, Польща  
Інститут кібернетики НАН України  
Національний авіаційний університет  
Фінансово-економічний інститут Таджикистану  
Економічна академія "Д.А.Ценов", Болгарія  
Штуттгардський університет, Німеччина  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
НДІ інтелектуальних комп'ютерних систем THEU та ІК НАН України  
Новий університет Лісабона, Португалія  
Бакинський державний університет, Азербайджан  
Об'єднаний інститут проблем інформатики НАН Білорусі  
Інститут інженерів з електротехніки  
та електроніки (IEEE), Українська секція  
Асоціація "Інформаційні технології України"  
Громадська організація "Івано-Франківський ІТ кластер"*

# **"ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ"**

**матеріали  
міжнародної науково-практичної конференції**

**20-25 травня 2019 року  
Івано-Франківськ**

**"INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTER MODELLING"  
proceedings  
of the International Scientific Conference  
2019, May, 20th to 25th  
Ivano-Frankivsk**

**Івано-Франківськ - 2019**

# Виділення Підмножин Ефективних Рішень в Задачах Реінжинірингу Технологічних Систем

Валерій Семенець  
кафедра системотехніки  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки  
Харків, Україна  
valery.semenets@nure.ua

Ольга Шевченко  
кафедра системотехніки  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки  
Харків, Україна  
1375helga@gmail.com

Володимир Безкоровайний  
кафедра системотехніки  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки  
Харків, Україна  
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Оксана Драз  
кафедра системотехніки  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки  
Харків, Україна  
oksana.draz@nure.ua

## Selection of Subsets of Effective Solutions in Tasks of Reengineering of Technological Systems

Valerii Semenets  
Department of System Engineering  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
Kharkiv, Ukraine  
valery.semenets@nure.ua

Olha Shevchenko  
Department of System Engineering  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
Kharkiv, Ukraine  
1375helga@gmail.com

Volodymyr Beskorovainyi  
Department of System Engineering  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
Kharkiv, Ukraine  
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Oksana Draz  
Department of System Engineering  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
Kharkiv, Ukraine  
oksana.draz@nure.ua

**Анотація**—Проаналізовано підходи до формування підмножин ефективних варіантів у процесах багатокритеріального вибору рішень з реінжинірингу технологічних систем. Для опуклих множин варіантів запропоновані модифікації методів формування множини компромісів, що мають суттєво менші часові й ємнісні складності.

**Abstract**—The approaches to the formation of subsets of effective variants in the processes of multicriteria choice of decisions on reengineering of technological systems were analyzed. For convex sets of variants, modifications of the methods of forming a set of compromises with substantially less time and capacitive complexities are proposed.

**Ключові слова**—технологічні системи; проектування; реінжиніринг; багатокритеріальна оптимізація; Парето-оптимальні рішення

**Keywords**—*technological systems; designing; reengineering; multicriteria optimization; Pareto-optimal solutions*

### I. ВСТУП

Сучасні технологічні об'єкти складаються з сукупності функціонально пов'язаних складних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва та виконавців для здійснення в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів і операцій. Умови конкуренції вимагають постійної модернізації технологічних процесів і обладнання в рамках реінжинірингу технологічних систем (ТС). Процеси їх реінжинірингу передбачають розв'язання множини взаємопов'язаних задач структурної, топологічної та параметричної оптимізації за множиною функціональних і вартісних показників [1]. Методологія розв'язання таких задач базується на сучасній теорії прийняття рішень [2–4].

Переважає більшість задач структурної, топологічної і параметричної оптимізації ТС є комбінаторними по своїй суті. У процесі їх розв'язання здійснюється аналіз потужних множин багатокритеріальних альтернатив, переважна більшість з яких є неефективними [5]. Це обумовлює актуальність задач з розробки методів й інформаційних технологій автоматичного чи автоматизованого виділення підмножин ефективних рішень в задачах реінжинірингу технологічних систем.

## II. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

Сучасні технологічні системи складаються з великої кількості підсистем і елементів зі складними схемами взаємозв'язків між ними, можуть мати значну територіальну чи просторову розосередженість. Технології їх проектування і реінжинірингу базуються на ідеях агрегативно-декомпозиційного підходу, системного аналізу і системного проектування складних систем [6–7]. Властивості варіантів реінжинірингу ТС  $P(s)$ , що належать множині допустимих  $S^* = \{s\}$ , кількісно оцінюються за множиною часткових критеріїв  $K(s) = \{k_1(s), k_2(s), \dots, k_m(s)\}$ . При цьому у загальному випадку множина допустимих варіантів складається з двох підмножин  $S^* = S^S \cup S^E$ , де  $S^S$  - підмножина згоди, в якій часткові критерії варіантів можуть змінюватися узгоджено;  $S^E$  - підмножина ефективних (компромисних, Парето-оптимальних) варіантів, в якій хоча б одна пара критеріїв є строго суперечливою. Найкращий варіант реінжинірингу ТС повинен належати множині ефективних  $s^o \in S^E$ .

У результаті декомпозиції проблеми оптимізації подібних об'єктів виділяється сукупність задач  $\{Task_i^l\}$ ,  $l = \overline{1, n_l}$ ,  $i = \overline{1, n_i}$  (де  $l$  - номер рівня декомпозиції проблеми;  $n_l$  - кількість рівнів декомпозиції;  $n_i$  - кількість задач на  $l$ -му рівні), для більшості з яких не сконструйовані моделі й ефективні методи розв'язання [1].

Кінцевою в логічній схемі системної оптимізації ТС є процедура розв'язання задачі прийняття рішень  $Task^{DM}$ . У загальному випадку вона передбачає розв'язання множини задач (підзадач):

$$Task^{DM} = \{Task_i^{DM}\}, i = \overline{1, 6}, \quad (1)$$

де  $Task_1^{DM}$  - формалізація мети реінжинірингу системи;  $Task_2^{DM}$  - визначення універсальної множини рішень  $S^U = \{s\}$ ;  $Task_3^{DM}$  - визначення підмножини допустимих рішень  $S^* \subseteq S^U$ ;  $Task_4^{DM}$  - виділення підмножини ефективних рішень  $S^E \subseteq S^* \subseteq S^U$ ;  $Task_5^{DM}$  - ранжування рішень  $s \in S^E$ ;  $Task_6^{DM}$  - вибір найкращого рішення  $s^o \in S^E$ .

Знаходження точних розв'язків задачі  $Task_4^{DM}$   $S^E \subseteq S^*$  для опуклих і неопуклих множин допустимих варіантів  $S^* = \{s\}$  традиційно базується на аналізі властивостей ефективних альтернатив  $s \in S^E$  з використанням теорем С. Карліна і Ю. Гермейєра [6]. Внаслідок комбінаторного характеру більшості задач реінжинірингу ТС точне визначення підмножини його ефективних варіантів  $S^E = \{s\}$  є досить складним з обчислювальної точки зору. Методи, засновані на попередньому виділенні наближеної множини компромісів, спрощують пошук розв'язків задачі  $Task_4^{DM}$  [8–9], проте є прийнятними лише для опуклих множин допустимих варіантів  $S^* = \{s\}$  і потребують значних обсягів пам'яті для зберігання даних.

На множині допустимих варіантів реінжинірингу  $S^* = \{s\}$  попередньо виділяється наближена підмножина компромісів  $S^N = \{s\}$  [8]. При цьому повинна виконуватися вимога  $S^E \subseteq S^N$ . Для цього на множині  $S^*$  здійснюється оптимізація за кожним з часткових критеріїв  $k_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$ . У результаті визначаються найкращі за кожним критерієм варіанти  $s_i^o = \arg \max_{s \in S^*} k_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$ ; відповідні їм значення інших часткових критеріїв  $k_l(s_i^o)$ ,  $l = \overline{1, m}$ ,  $l \neq j$ . Тоді, найкраще значення  $j$ -го часткового критерію  $k_j^+ = k_j(s_j^o)$ , а найгірше серед значень  $j$ -го часткового критерію в точках екстремумів за іншими критеріями дорівнює  $k_j^- = \max_{1 \leq l \leq m} k_j(s_l^o)$ , якщо  $k_j(s) \rightarrow \min$  і  $k_j^- = \min_{1 \leq l \leq m} k_j(s_l^o)$ , якщо  $k_j(s) \rightarrow \max$ . Отримані пари значень  $\langle k_j^+, k_j^- \rangle$ ,  $j = \overline{1, m}$  є границями відображення множини  $S^E \subseteq S_1^N$  в простір часткових критеріїв  $K$ .

Усі варіанти з множини допустимих  $s \in S^*$ , для яких виконуються умови  $k_j^+ \geq k_j(s) \geq k_j^-$ ,  $\forall j \in I$ , (де  $I$  - множина критеріїв на максимум) і  $k_j^+ \leq k_j(s) \leq k_j^-$ ,  $\forall j \in J$  (де  $J$  - множина критеріїв на максимум), включаються до наближеної множини компромісів  $S_1^N \subseteq S^*$ .

Недоліком цього методу є те, що на неопуклих множині допустимих варіантів реінжинірингу ТС  $S^* = \{s\}$  він не гарантує виконання умови  $S^E \subseteq S^N$ .

Метою дослідження є зниження часової та ємнісної складності процедур визначення підмножин ефективних варіантів для технологій проектування і реінжинірингу технологічних систем.

## III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

За результатами аналізу мети реінжинірингу

технологічної системи (задача  $Task_1^{DM}$ ) (1), умов її функціонування й її бажаних властивостей  $P'(s)$  визначаються підмножини елементів  $E'(s)$ , відношень між ними  $R'(s)$  і топологій  $G'(s)$ , на яких вона може бути реалізована (задача  $Task_2^{DM}$ ). З урахуванням економічних, екологічних, політичних інших обмежень визначаються підмножини елементів  $E^*(s) \subseteq E'(s)$ , відношень  $R^*(s) \subseteq R'(s)$  і топологій  $G^* \subseteq G'(s)$ , які визначають простір існування допустимих варіантів реінжинірингу ТС  $S^* \subseteq S^U$  (задача  $Task_3^{DM}$ ). Множина властивостей кожного з варіантів реінжинірингу ТС  $P(s)$ ,  $s \in S^*$  може бути кількісно оцінена множиною часткових критеріїв  $K(s) = \{k_1(s), k_2(s), \dots, k_m(s)\}$ . На отриманій множині  $S^* = \{s\}$  виділяється підмножина ефективних варіантів  $S^E \subseteq S^*$ , жоден з яких не може бути покращений одночасно за всіма частковими критеріями (задача  $Task_4^{DM}$ ). Пошук найкращого варіанту реінжинірингу ТС  $s^o = \langle E^o, R^o, G^o \rangle$  здійснюється шляхом розв'язання задач  $Task_5^{DM}$  і  $Task_6^{DM}$  на підмножині ефективних варіантів  $s^o \in S^E$  [10].

При цьому замість множини часткових критеріїв  $K(s) = \{k_1(s), k_2(s), \dots, k_m(s)\}$  використовується множина їх перетворень  $W(s) = \{w_1(s), w_2(s), \dots, w_m(s)\}$ , що приводять їх до безрозмірного вигляду і до задачі мінімізації. Вважається, що всі перетворення  $w_j(s) > 0$ ,  $j = \overline{1, m}$  і мінімізуються. Множина ефективних варіантів  $S^E = \{s\}$  для множини функцій мети  $k_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$  може бути знайдена об'єднанням варіантів  $s_j^o$ ,  $\forall j = \overline{1, m}$ , які відповідають оптимуму за кожним з часткових критеріїв  $k_j^o(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$ , шляхом розв'язання задачі математичного програмування відносно параметрів  $\lambda_j \in A^+ = \{\lambda_j : \lambda_j > 0 \forall j = \overline{1, m}, \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1\}$  [5, 6]:

$$\min_{s \in S^*} \left\{ F(s) = \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j(s) \right\}, \quad (2)$$

де  $w_j(s) > 0$ ,  $\forall j = \overline{1, m}$  є увігнутими неперервними функціями, а множина допустимих варіантів  $S^* = \{s\}$  є опуклою замкненою множиною. У тому випадку, коли  $w_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$  не є опуклими, або множина допустимих варіантів  $S^* = \{s\}$  не є опуклою, шляхом розв'язання задачі (2) не вдається відшукати всю множину ефективних варіантів реінжинірингу ТС  $S^E = \{s\}$ .

У загальному випадку множину ефективних варіантів реінжинірингу ТС  $S^E = \{s\}$  для множини функцій мети

$k_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$  можна знайти об'єднанням варіантів  $s_j^o$ ,  $\forall j = \overline{1, m}$ , які оптимізують кожен з часткових критеріїв мети  $k_j^o(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$ , шляхом вирішення задачі математичного програмування відносно параметрів  $\lambda_j \in A^+ = \{\lambda_j : \lambda_j > 0 \forall j = \overline{1, m}, \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1\}$  [5, 6]:

$$\min_{s \in S^*} \left\{ F(s) = \max_{1 \leq j \leq m} \left\{ \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j(s) \right\} \right\}. \quad (3)$$

У цьому методі вимога угнутості і неперервності функцій  $w_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$  і опуклості множини допустимих варіантів  $S^* = \{s\}$  не накладаються. Однак, у разі, коли розв'язок задачі (3) буде не єдиним, для вибраних значень параметрів  $\lambda_j \in A^+$ ,  $j = \overline{1, m}$  не всі знайдені варіанти

$$s_j^o = \arg \text{extr}_{s \in S^*} k_j^o(s), \quad j = \overline{1, m}$$

можуть бути ефективними.

Знаходження множини ефективних варіантів  $S^E = \{s\}$  наведеними методами зводиться до вирішення задач параметричного програмування для всього набору значень вагових коефіцієнтів часткових критеріїв  $\lambda_j \geq 0$ ,  $j = \overline{1, m}$

$\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$ , але різних узагальнених критеріїв ефективності. У багатьох випадках визначити всю множину ефективних варіантів  $S^E = \{s\}$  не вдається через високу ємнісну або обчислювальну складність розв'язання задач (2) або (3).

Для спрощення часової складності методу розв'язання задачі  $Task_4^{DM}$  пропонується формувати наближені множини ефективних варіантів реінжинірингу ТС меншої потужності  $S_2^N, S_3^N, \dots$ , для яких:

$$S_r^N \subset \dots \subset S_2^N \subset S_1^N; \quad (4)$$

$$Card(S_r^N) < \dots < Card(S_2^N) \ll Card(S_1^N).$$

Для цього на множині  $S^*$  здійснюється оптимізація за кожним з часткових критеріїв  $k_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$  і визначаються: найкращі варіанти за кожним з критеріїв  $s_i^o = \arg \text{extr}_{s \in S^*} k_j(s)$ ,  $j = \overline{1, m}$ ; відповідні їм значення інших часткових критеріїв  $k_l(s_i^o)$ ,  $l = \overline{1, m}, l \neq j$ ; найкращі і найгірші значення часткових критеріїв  $k_j^+, k_j^-, j = \overline{1, m}$  у точках екстремумів за всіма критеріями. Отримані пари значень  $\langle k_j^+, k_j^- \rangle$ ,  $j = \overline{1, m}$  визначають крайні точки границі  $S^E$  за частковими критеріями  $k_{ij} = k_i(s_j^o)$ ,

$i, j = \overline{1, m}$  (рис.1).

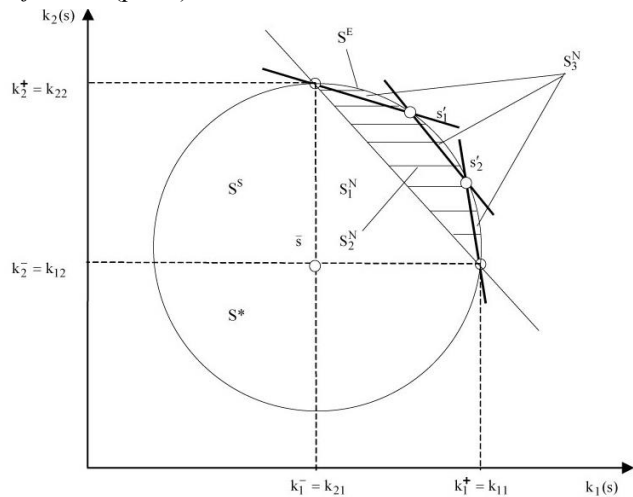


Рис. 1. Структура опуклої області допустимих варіантів  $S^*$  для  $k_1(s) \rightarrow \max$  і  $k_2(s) \rightarrow \max$ .

Побудувавши площину, що проходить через граничні точки  $k_{ij} = k_i(s_j^o)$ ,  $i, j = \overline{1, m}$ , визначимо границю наближеної множини ефективних варіантів  $S_2^N$ . Для подальшого скорочення наближеної множини ефективних варіантів необхідно визначити додатково опорні варіанти  $s_1^E, s_2^E \in S^E$ , що рівномірно розосереджені по границі множини  $S^*$  між точками  $k_{ij} = k_i(s_j^o)$ ,  $i, j = \overline{1, m}$ .

Зі збільшенням кількості часткових критеріїв  $m$  і кількості опорних варіантів  $s_1^E, s_2^E, \dots, s_r^E \in S^E$  спостерігається подальше скорочення потужності підмножин (4), однак при цьому пропорційно збільшується часова складність методу.

Для звуження наближених підмножин  $S_1^N, S_2^N, \dots, S_r^N$  до  $S^E$  може бути використана процедура парних порівнянь, що полягає у порівнянні всіх можливих пар варіантів  $s_i, s_j \in S_r^N$  та видаленні з подальшого розгляду варіантів  $s_i \in S_r^N$ , які за всіма частковими критеріями гірші хоча б за один з інших  $s_j \succ s_i, s_j \in S_r^N$ .

У системах автоматизації проектування ТС при розв'язанні задач їх реінжинірингу, коли множина допустимих варіантів  $S^* = \{s\}$  ще не сформована, пропонується формувати множин ефективних варіантів  $S^E = \{s\}$  у процесі їх синтезу, що дозволить суттєво скорочувати часову і ємнісну складність процедур прийняття багатокритеріальних рішень [5, 9, 11-12]. У комбінаторних задачах оптимізації розмірністю  $n = 15 \div 40$  відносні потужності підмножин ефективних варіантів  $Card(S^E) / Card(S^*)$  склали від 0,0105 % до 3,05 %, що дозволило відповідно скоротити час і необхідну комп'ютерну пам'ять для їх розв'язання.

## ВИСНОВКИ

Запропоновано модифікацію методів формування підмножин Парето для опуклих множин варіантів реінжинірингу технологічних систем, що базується на виділенні наближених підмножин компромісів. Вони мають суттєво нижчі часові й ємнісні складності, ніж традиційні методи. Отримані результати можуть бути узагальнені і використані в процедурах прийняття багатокритеріальних рішень у системах проектування та управління технічними й організаційно-технічними об'єктами. Їх застосування дозволить підвищити ступінь автоматизації процесів, скоротити час прийняття рішень та підвищити якість рішень, що приймаються.

## ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Безкорований В., Шевченко О. Модель системної оптимізації технологічних об'єктів // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 14-19 травня 2018 року. – Івано-Франківськ: п. Голіній О.М., 2018. – С. 327–330.
- [2] Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. . Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Surveys. – New York: Springer, 2016. – 1346 p.
- [3] Kaliszewski I., Kiczowski T., Miroforidis J. Mechanical design, Multiple Criteria Decision Making and Pareto optimality gap // Engineering Computations. – 2016. Vol. 33(3). – P. 876-895.
- [4] Малаяр М.М. Моделі і методи багатокритеріального обмежено-раціонального вибору: Монографія. – Ужгород: ПА «АУТДОР-ШАРК», 2016. – 222 с.
- [5] Бескоровайный В.В., Красько А.Ф. Автоматизация процессов выбора эффективных решений при автоматизированном проектировании систем управления и автоматики // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2007. – №4 (27). – С. 208–212.
- [6] Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
- [7] Тимченко А.А. Основи системного проектування та аналізу складних об'єктів: У 2-х кн. Кн. 1. Основи САПР та системного проектування складних об'єктів / За ред. В.І.Бикова. – К.: Либідь, 2000. – 272 с.
- [8] Петров Э.Г., Новожилова М.В., Гребенник И.В., Соколова Н.А. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах. Херсон: ОЛДИ-плюс, 2003. 380 с.
- [9] Бескоровайный В.В. Формирование множества эффективных вариантов при решении задач структурного синтеза территориально распределенных объектов // Радиоэлектроника и информатика. – 2003. – №. 4. – С. 113 – 116.
- [10] Овезгельдыев О.А., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. – К.: Наукова думка, 2002. – 161 с.
- [11] Бескоровайный В. В., Подоляка К.Е. Выбор многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур систем крупномасштабного мониторинга // Системы обработки информации. – 2016. – № 5(142). – С. 80–86.
- [12] Beskorovainyi V., Podoliaka K. Reengineering the topological structure of large-scale monitoring systems // ECONTECHMOD. – 2015. – Vol. 4 (3). – P. 13-18.