

**ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ
ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО
ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ**

Канд. техн. наук О.В. Братченко

**ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Канд. техн. наук А.В. Братченко

**PARTICULARITIES OPTIMIZATION DESIGNING THE TECHNICAL
FACILITIES OF THE TRANSPORT WITH USE THE MATHEMATICAL
PLANNING THE EXPERIMENT**

Cand. of techn. sciences A. Bratchenko

Розглянуто особливості використання сучасних методів математичного планування експерименту для отримання узагальнених математичних моделей, які доцільно застосовувати на відповідних адаптивних етапах оптимізаційного проектування технічних засобів транспорту. Наведено приклад отримання і використання таких моделей у розв'язанні задачі удосконалення систем повітропостачання рухомого складу на основі використання компресорів нової конструкції.

Ключові слова: математичне планування експерименту, узагальнені математичні моделі, оптимізаційне проектування, технічні засоби транспорту.

Рассмотрены особенности использования современных методов математического планирования эксперимента для получения обобщенных математических моделей, которые целесообразно применять на адаптивных этапах оптимизационного проектирования технических средств транспорта. Приведен пример получения и использования таких моделей в решении задачи усовершенствования систем воздухопостачания подвижного состава на основе использования компрессоров новой конструкции.

Ключевые слова: математическое планирование эксперимента, обобщенные математические модели, оптимизационное проектирование, технические средства транспорта.

Motivated urgency of the further deployment research and research and development work with purpose of the making the models domestic locomotive and coach with perfected technical-economic factor. It is shown that decision of such problems on modern level requires undertaking optimization designing the transport technical facilities on the most important technical-economic factors. Undertaking optimization designing the technical facilities provides the maximum linearization of this process to account of the realization principle to adaptive strategy under rational undertaking the studies on the main adaptive stage. The Base of the undertaking adaptive stage studies are generalized mathematical models, which describe the influence corresponding to constructive parameter on value factor and functional restrictions on designing. The Considered particularities of the use the modern methods of the mathematical planning the experiment for reception generalized mathematical models, which reasonable use on adaptive stage optimization

designing the technical facilities of the transport. It Is Cited an instance receptions and use of such models in decision of the problem of the improvement of the systems of воздухоснабження rolling stock on base of the use compressor to new design.

Keywords: *mathematical planning the experiment, generalized mathematical models, optimizacion designing, technical facilities of the transport.*

Вступ. Постановка проблеми у загальному вигляді і її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. Забезпечення залізниць рухомим складом нового покоління є пріоритетним напрямком оновлення активної частини виробничої бази залізничного транспорту України. Це обґрунтовує актуальність подальшого розгортання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт для створення перспективних моделей вітчизняних локомотивів і вагонів з поліпшеними техніко-економічними показниками (ТЕП) [1]. Розв'язання таких задач на сучасному рівні потребує проведення оптимізаційного проектування транспортних технічних засобів (ТЗ) за найважливішими технічними, економічними, інтегральними критеріями, які відповідають високому рівню ТЕП [2,3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У загальній постановці метою оптимізаційного проектування ТЗ є визначення вектора керованих конструкційних параметрів $Q^*(q_1^*, q_2^*, \dots, q_m^*)$, який у теоретичному плані задовольняє усі задані умови на проектування і забезпечує досягнення екстремального значення цільової функції (ЦФ) $F(Q)$ – значення ЦФ в оптимальній точці $F^*(Q^*)$ [4].

Необхідність зведення багатокритерійної задачі оптимізаційного проектування ТЗ до однокритерійної потребує проведення процедури згортання векторного критерію. Це передбачає виділення з розглядуваних критеріїв (показників) $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ основного критерію оптимальності (наприклад

$y_{gen} = y_k$). Тоді ЦФ подається у вигляді залежності основного критерію від керованих параметрів $y_{gen} = F(Q)$. Інші критерії належать до вторинних і подаються у вигляді функціонально залежних від керованих змінних показників – функціональних обмежень, що накладаються на розв'язання оптимізаційної задачі. При багатовимірній оптимізації конструкції керовані параметри визначають значення прямих (параметричних) і функціональних обмежень [4,5].

Проведення оптимізаційного проектування ТЗ передбачає максимальну лінеаризацію цього процесу на основі реалізації принципів адаптивної стратегії при раціональному проведенні досліджень на основних адаптивних етапах [4]. Останнє досягається за рахунок використання узагальнених математичних моделей (УММ), які описують вплив відповідних конструктивних параметрів на величину критеріального показника і функціональних обмежень на проектування ТЗ. У цьому плані більшої уваги заслуговує розглядання особливостей отримання таких УММ на основі використання сучасних методів математичного планування експерименту (МПЕ) [5,6].

Визначення мети і задачі дослідження. Метою статті є висвітлення особливостей розв'язання задач оптимізації основних елементів конструкції ТЗ залізничного транспорту з використанням методів МПЕ.

Основна частина дослідження. Сучасні методи МПЕ передбачають проведення експериментальних або розрахункових досліджень на основі відповідного математичного плану, який

задає визначену мінімальну кількість експериментів або розрахунків, необхідних для отримання простих і точних УММ.

У методичному плані отримання УММ з використанням методів МПЕ передбачає нижченаведену послідовність дій.

1. У залежності від об'єкта і мети дослідження визначаються показники y_1, y_2, \dots, y_n , змінні параметри (фактори) q_1, q_2, \dots, q_m . Установлюються інтервали варіювання факторів. Для формування математичних планів на основі відповідних план-матриць [7] уводяться нормовані значення факторів

$$x_i = (q_i - q_{in}) / \Delta q_i, \quad (1)$$

де q_{in} – початковий (нульовий) рівень змінної q_i

$$q_{in} = (q_{i \max} + q_{i \min}) / 2, \quad (2)$$

де $q_{i \max}$, $q_{i \min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення змінної q_i (границі заданого інтервалу);

Δq_i – крок варіювання змінної q_i

$$\Delta q_i = (q_{i \max} - q_{i \min}) / k, \quad (3)$$

де k – число цілих ділянок, на які розбитий інтервал варіювання змінної q_i . Найчастіше $k = 2$.

У відповідності до цього значення $x_i = 1$ відповідає $q_i = q_{i \max}$, значення $x_i = 0$ відповідає $q_i = q_{in}$, а $x_i = -1$ – $q_i = q_{i \min}$.

2. Визначається вид УММ – $y_i = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$. У більшості випадків у практиці отримання УММ для оптимізаційного проектування ТЗ застосовуються ортогональні математичні плани другого порядку, використання яких

передбачає одержання УММ у вигляді полінома другого ступеня

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i q_i + \sum_{i=1}^m a_{ii} q_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i < j)}}^m a_{ij} q_i q_j. \quad (4)$$

У разі необхідності можуть застосовуватися рототабельні та інші математичні плани, використання яких передбачає отримання УММ у вигляді поліномів вищих порядків. Слід зауважити, що у випадках проведення експериментальних досліджень при встановленні порядку проведення передбачених планом дослідів, використовується процедура рандомізації [4].

3. У залежності від числа факторів q_m і виду УММ обирається відповідна матриця планування і складається математичний план проведення дослідження [5,6].

4. У відповідності до математичного плану проводиться експериментальне або розрахункове дослідження, формуються масиви показників y_1, y_2, \dots, y_n .

5. На основі отриманих масивів показників y_1, y_2, \dots, y_n визначаються параметри (коефіцієнти) УММ виду $y_i = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$. Для цього використовуються спеціальні програми, які забезпечують розв'язання системи нормальних рівнянь, наведених нижче у матричній формі,

$$C \cdot A = X_T \cdot Y, \quad (5)$$

де $C = X_T \cdot X$ – інформаційна матриця;

X – матриця планування;

X_T – транспонована матриця матриці

X ;

A – матриця – стовпець коефіцієнтів УММ;

Y – матриця – стовпець отриманих за планом значень відповідного показника y_i .

6. Після визначення коефіцієнтів здійснюється перевірка адекватності УММ. У більшості випадків з цією метою обраховується величина дисперсії адекватності S_{ad} і контролюється умова $S_{ad} \leq [S_{ad}]$. Для розрахунків S_{ad} використовується формула

$$S_{ad} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^l (y_{ij} - y_{ijp})^2}{f_{ad}}}, \quad (6)$$

де l – число заданих планом необхідних експериментів (або розрахунків);

y_{ij}, y_{ijp} – значення показника y_i , які отримані при j -му експерименті за планом і потім шляхом розрахунків за допомогою УММ;

$f_{ad} = n - m - 1$ – число степенів вільності S_{ad} (m – число змінних q_m).

Більш універсальною є перевірка адекватності УММ за допомогою критерію Фішера – $F \leq [F]$:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}, \quad (7)$$

де $S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ip})^2}{f_y}}$ – дисперсія відтворюваності;

$f_y = n$ – число степенів вільності S_y ;

$F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}$ – табличне (довідкове) значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості для відповідних значень f_{ad}, f_y .

Досвід використання УММ при оптимізаційному проектуванні ТЗ вказує на

доцільність оцінювання значущості їх коефіцієнтів, що дає змогу виділити роль того чи іншого фактора у формуванні величини показника y_i в розглядуваній області факторного простору. При використанні критерію Стюдента до числа значущих належать коефіцієнти a_i , для яких виконується умова

$$|a_i| \geq t_{(0,05; f_y)} \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

де $t_{(0,05; f_y)}$ – табличне (довідкове) значення критерію Стюдента, що відповідає 5 %-й точці розподілення Стюдента з f_y степенями вільності.

Як приклад нижче наведені результати оптимізаційного дослідження з обґрунтованого вибору основних конструкційних параметрів нових компресорів для систем повітропостачання сучасного залізничного рухомого складу [8]. Мова йде про отримання і дослідження УММ, які описують залежність основних показників компресора - загального об'єму конструкції V_Σ (критеріальний показник), продуктивності Q , витрат потужності на привід N_∂ (функціональні обмеження) від конструкційних параметрів (діаметр рухомого корпусу D_K і довжина циліндра L) і частоти обертання вала компресора n .

Нижче наведені УММ виду $V_\Sigma = f(D_K, L)$, $\bar{Q} = Q/n = f(D_K, L)$ і $\bar{N}_\partial = N_\partial/n = f(D_K, L)$, отримані з використанням ортогонального математичного плану для двох змінних, що варіюються на трьох рівнях в обраних інтервалах:

$$D_K = 100 \dots 280 \text{ мм},$$

$$L = 70 \dots 270 \text{ мм}.$$

$$V_\Sigma = 0,097326 - 0,001186 \cdot D_K - 6,472 \cdot 10^{-4} \cdot L + 3,12 \cdot 10^{-6} \cdot D_K^2 + ; \quad (9)$$

$$+ 1,233 \cdot 10^{-7} \cdot L^2 + 7,642 \cdot 10^{-6} \cdot D_K \cdot L$$

$$\begin{aligned} \bar{Q} = & 1,1731 \cdot 10^{-3} - 1,43 \cdot 10^{-5} \cdot D_K - 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L + 3,8 \cdot 10^{-8} \cdot D_K^2 + \\ & + 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 + 9,2 \cdot 10^{-8} \cdot D_K \cdot L \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{N}_o = & 7,4182 \cdot 10^{-3} - 9,05 \cdot 10^{-5} \cdot D_K - 4,93 \cdot 10^{-5} \cdot L + 2 \cdot 10^{-7} \cdot D_K^2 + \\ & + 9,2 \cdot 10^{-9} \cdot L^2 + 5,83 \cdot 10^{-7} \cdot D_K \cdot L \end{aligned} \quad (11)$$

Перевірка адекватності показала, що значення величин дисперсії адекватності для відповідних УММ складають:

$$\sigma_{V_\Sigma} = \pm 8,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$\sigma_{\bar{Q}} = \pm 1,032 \cdot 10^{-4} \frac{(\text{м}^3 / \text{хв})}{(\text{об} / \text{хв})},$$

$$\sigma_{\bar{N}_o} = \pm 6,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кВт}}{\text{об} / \text{хв}}.$$

Такий результат підтверджує доцільність використання УММ у розв'язанні оптимізаційної задачі. При

цьому доцільно використовувати отримані з використанням УММ (9)...(11) бінарні перерізи [4,5] у вигляді ізоліній критеріального показника і функціональних обмежень у розглянутій області оптимізації.

На рисунку наведений комплексний графік (об'єднує відповідні бінарні перерізи), який дав змогу знайти шукані конструктивні параметри нових компресорів (при $n = 1500 \text{ об/хв}$) для систем повітропостачання залізничного рухомого складу.

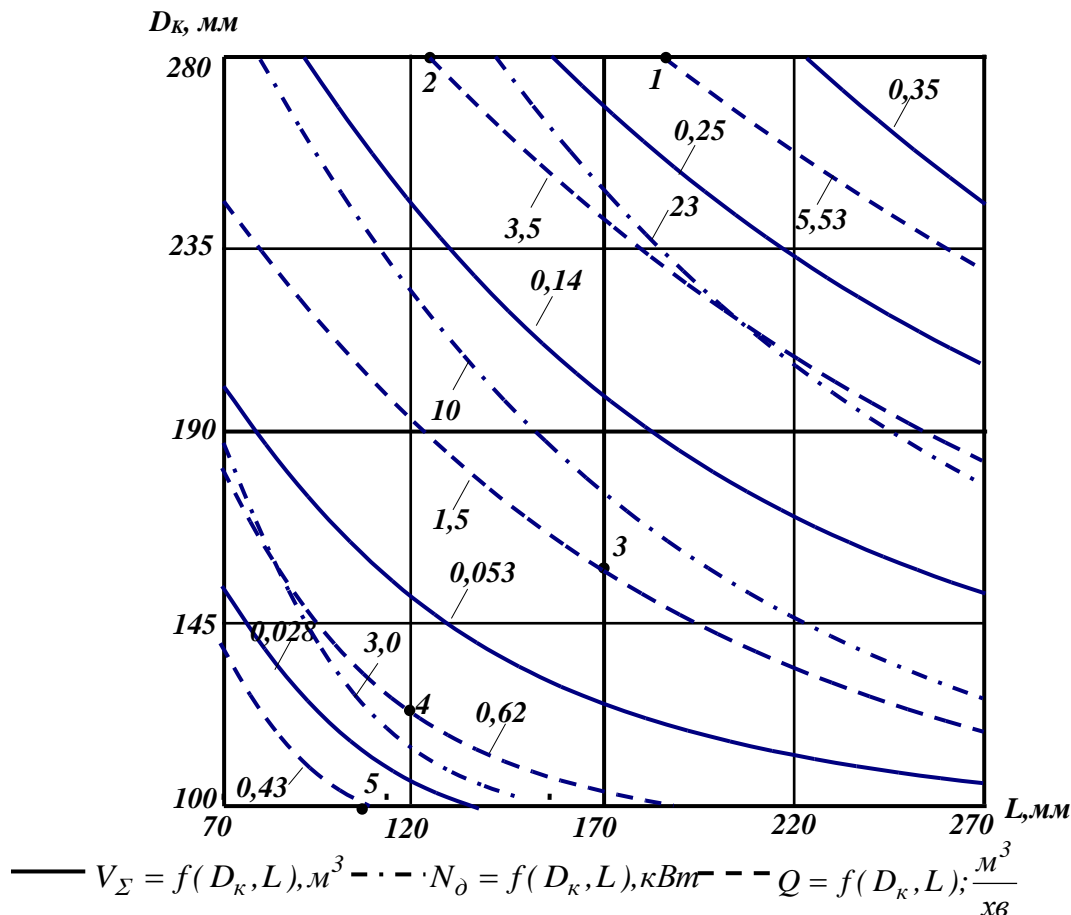


Рис. Комплексний графік для визначення основних параметрів нових компресорів для систем повітропостачання рухомого складу

Відзначені на графіку точки 1, 2, 3, 4, 5 відповідають конструкційним параметрам, габаритам і витратам потужності на привод нових компресорів, які за своєю продуктивністю і тиском нагнітання повітря відповідають існуючим поршневым компресорам типів КТ-7; ПК-3,5; ВВ-1,5/9; ЭК-7Б; ЭК-4 (використовуються в системах повітропостачання відповідно магістральних тепловозів серії 2ТЕ116, маневрових тепловозів ТГМ6, дизель-поїздів ДР1А, електропоїздів ЕР2, вагонів метрополітену серій 81 і ЕС). У той же час у порівнянні з розглянутими поршковими компресорами, нові компресори при забезпеченні потрібної продуктивності

відзначаються суттєво нижчими масогабаритними показниками і потребують значно менших витрат потужності на привод.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Наведені в статті матеріали забезпечують розв'язання складних задач оптимізаційного проектування технічних засобів транспорту. Описані особливості використання методів МПЕ для отримання відповідних УММ доцільно використовувати при створенні залізничних ТЗ нового покоління.

Список використаних джерел

1. Недосеков, А.Н. Стратегические ориентиры производства транспортной техники [Текст] / А.Н. Недосеков // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 11. – С. 46-48.
2. Боднар, Б.Є. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування [Текст]: підручн. для ВНЗ залізнич. трансп. [Текст] / Б.Є. Боднар, Є.Г. Нечаєв, Д.В. Бобир; за ред. д-ра техн. наук, проф. Б.Є. Боднара. – Дніпропетровськ: ПП «Ліра ЛТД», 2010. – 358 с.
3. Мороз, В.І. Новий підхід до формалізованого описання конструкції технічних засобів залізничного транспорту [Текст] / В.І. Мороз // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 4. – С.41 – 42.
4. Мороз, В.І. Основи конструювання і САПР [Текст]/ В.І.Мороз, О.В.Братченко, В.В.Ліньков. – Харків: ПП видавництва «Нове слово», 2003. – 194 с.
5. Мороз, В.І. Основи конструювання і САПР технічних засобів залізничного транспорту [Текст] / В.І. Мороз, О.В. Братченко, К.В. Астахова. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 136 с.
6. Ермаков, С.М. Математическая теория оптимального эксперимента [Текст] / С.М. Ермаков, А.А. Жигляевский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
7. Бродский, В.З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей [Текст] / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
8. Мороз, В.І. Оцінювання перспектив використання компресорів нової конструкції на залізничному тяговому рухомому складі [Текст] / В.І. Мороз, О.В. Братченко, М.Б. Чубикало // 36. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 119. – С. 99-106.

Рецензент д-р техн. наук, професор О.В. Устенко

Братченко Олександр Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри механіки і проектування машин Української державної академії залізничного транспорту. Тел. 057-730-10-53.

Bratchenko Oleksandr Vasylovych, cand. of techn. sciences, Associate Professor Department of mehaniki i proektuvannya machines Ukraine State Academy of Railway Transport. Tel.057-730-10-53