

УДК 621.833: 629.423.2

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.168.2017.101591>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ВІДГУКУ ПОКАЗНИКІВ МІЦНОСТІ ТЯГОВИХ
ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ З РІЗНИМИ СТУПЕНЯМИ ЗНОСУ ПРОФІЛІВ ЗУБЦІВ**

Асп. В. І. Громов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТКЛИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ
ТЯГОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ С РАЗНЫМИ СТЕПЕНЯМИ ИЗНОСА
ПРОФИЛЕЙ ЗУБЬЕВ**

Асп. В. И. Громов

**RESEARCH OF SURFACES OF RESPONSE OF INDEXES OF DURABILITY OF THE
HAULING GEARING WITH THE DIFFERENT DEGREES OF WEAR OF PROFILES OF
POINTS**

Postgraduate V. Gromov

Показано, що дослідження поверхонь відгуку показників міцності тягових зубчатих передач має важливе значення для обґрунтованого вибору пар «шестірня-колесо» при здійсненні їх деповських ремонтів. Запропоновано проводити визначення виду поверхонь відгуку та їх дослідження на основі канонічних перетворень узагальнених математичних моделей відповідних показників. В статті наведено результати аналізу поверхонь відгуку

згинних напружень зубців шестерень і контактних напружень зубців тягових зубчатих передач електропоїздів серії EP2P.

Ключові слова: тягові зубчаті передачі залізничного рухомого складу, показники міцності, поверхні відгуку.

Показано, что исследование поверхностей отклика показателей прочности тяговых зубчатых передач имеет важное значение для обоснованного выбора пар «шестерня-колесо» при осуществлении их депокских ремонтов. Предложено проводить определение вида поверхностей отклика и их исследование на основе канонических преобразований обобщенных математических моделей соответствующих показателей. В статье приведены результаты анализа поверхностей отклика изгибных напряжений зубьев шестерен и контактных напряжений зубьев тяговых зубчатых передач электропоездов серии ЭР2Р.

Ключевые слова: тяговые зубчатые передачи железнодорожного подвижного состава, показатели прочности, поверхности отклика.

The urgency of developments aimed at further improvement of repair technologies for traction gears of railway rolling stock is substantiated. As one of the promising areas of such works, studies have been made of the characteristics of gear engagement with the established wear profiles of gear teeth and wheels using generalized mathematical models of the corresponding indicators. Such dependencies, in addition to calculations and evaluation of the considered variants of completing the repair gears, make it possible to obtain the response surfaces of the corresponding indicators of traction gears. The study of such surfaces, the determination of their appearance, and the construction and analysis of binary sections is important for the justified choice of "pinion-wheel" pairs in the repair of traction gears. It is proposed to determine the form of the response surfaces and study them on the basis of canonical transformations of generalized mathematical models of the corresponding indicators. The article presents the results of analysis of the surfaces of the response of flexural stresses of gear teeth and contact stresses of teeth of traction gears of electric trains of ER2R series. It is concluded that in order to obtain a comprehensive picture of the effect of the degree of wear of the tooth and gear tooth profiles on the strength indices, it is necessary to analyze their response surfaces.

Keywords: traction gears of railway rolling stock, strength indicators, response surfaces.

Вступ. На цей час значний обсяг приміських перевезень на мережах залізниць України здійснюється електропоїздами (ЕП), більша частина з яких працює у наднормативний термін. З урахуванням стану оновлення залізничного рухомого складу значна увага приділяється науково-дослідним та дослідно-конструкторським роботам, спрямованим на обґрунтоване подовження встановлених заводами-виробниками термінів експлуатації наявних ЕП [1]. Серед комплексу таких робіт слід виділити розробки, спрямовані на забезпечення експлуатаційної надійності та довговічності основних конструктивних

модулів секцій ЕП, до яких відноситься екіпажна частина, тяговий привід і, зокрема, тягова зубчата передача (ТЗП) [2]. В цьому плані серед інших актуальних досліджень розглядається подальше удосконалення технологій ремонту ТЗП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід депокських ремонтів ТЗП показав, що в експлуатації ЕП інтенсивність зношення профілів зубців парних шестерень і коліс суттєво відрізняється, що ускладнює вирішення завдання обґрунтованого комплектування пар «шестірня-колесо» за умов отримання якісних показників зацеплення та міцності ТЗП.

Тому подальше дослідження впливу ступенів зносу зубців шестірни та колеса на вказані показники відіграє важливу роль у вирішенні такого науково-практичного завдання [3].

При проведенні в УкрДУЗТ комплексних експериментально-розрахункових досліджень ТЗП електропоїздів серії ЕР2Р [4,5] отримані поліноміальні узагальнені математичні моделі (УММ), які описують вплив ступенів зносу на основні показники зацеплення та міцності. Такі залежності використовувались з метою розрахунків і оцінювання варіантів ремонтних ТЗП, що розглядаються. Разом з тим вони додатково дозволяють отримати відповідні поверхні відгуку відповідних показників ТЗП [6].

Дослідження таких поверхонь, визначення їх виду, а також побудова і аналіз бінарних перерізів (ліній рівного виходу відповідних показників в залежності від обраних змінних [7]) має важливе значення для обґрунтованого вибору пар «шестірна-колесо» при здійсненні ремонтів ТЗП.

Визначення мети і задачі дослідження: отримати та дослідити поверхні відгуку показників зацеплення та міцності ТЗП з різними ступенями зносу зубців шестерень та коліс.

Основна частина дослідження. Для розв'язання поставленої задачі використовувались отримані раніше [4,5] УММ вигляду

$$\sigma_{FI} = f(\bar{\Delta}_1, \bar{\Delta}_2);$$

$$\sigma_H = f(\bar{\Delta}_1, \bar{\Delta}_2),$$

де σ_{FI} – найбільші згинні напруження зубців шестірни, МПа;

σ_H – максимальні контактні напруження зубців ТЗП, МПа;

$\bar{\Delta}_{1,2}$ – відносний знос профілів зубців шестірни (колеса) за хордою ділильного кола

$$\bar{\Delta}_{1,2} = \frac{\Delta_{1,2}}{\Delta_{1,2 \max}},$$

$\Delta_{1,2} = s_{1,2} - [s_{1,2}]$ – величина зносу зубця шестірни (колеса) за хордою ділильного кола;

$s_{1,2}$ – товщина зубця ремонтної шестірни (колеса) за хордою ділильного кола (визначена експериментально за технологією ремонту);

$[s_{1,2}]$ – допустима за правилами технічного обслуговування, поточного і капітального ремонтів електропоїздів і електросекцій товщина зубця ремонтної шестірни (колеса) за хордою ділильного кола;

$\Delta_{1,2 \max} = s_{H1,2} - [s_{1,2}]$ – величина максимального допустимого зносу зубця шестірни (колеса) за хордою ділильного кола;

$s_{H1,2}$ – товщина зубця нової шестірни (колеса) за хордою ділильного кола.

В дослідженні розглянуті змінні варіювались в інтервалах $\bar{\Delta}_{1,2} = 0 \dots 0,6$. Моделі подано у вигляді поліномів другого порядку

$$\begin{aligned} \sigma_{FI} = & 223,581 + 436,114 \cdot \bar{\Delta}_1 - 455,791 \cdot \bar{\Delta}_2 - 477,417 \cdot \bar{\Delta}_1^2 + \\ & + 1400,36 \cdot \bar{\Delta}_2^2 - 205,229 \cdot \bar{\Delta}_1 \cdot \bar{\Delta}_2; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_H = & 638,249 + 492,59 \cdot \bar{\Delta}_1 + 309,257 \cdot \bar{\Delta}_2 - \\ & - 162,23 \cdot \bar{\Delta}_1^2 + 498,881 \cdot \bar{\Delta}_2^2 - 829,412 \cdot \bar{\Delta}_1 \cdot \bar{\Delta}_2. \end{aligned} \quad (2)$$

За результатами перевірки адекватності УММ (1), (2) (за величиною дисперсії середньоквадратичного відхилення [8]) встановлено, що їх область адекватності відповідає обраному інтервалу варіювання змінних $\bar{\Delta}_1, \bar{\Delta}_2$. Це визначило границі розрахункового дослідження з отримання

поверхонь відгуку показників σ_{F1} і σ_H .

Для визначення виду поверхонь відгуку зміни показників σ_{F1}, σ_H необхідно провести канонічні перетворення [9] залежностей (1), (2).

В загальному вигляді вони можуть бути подані у вигляді полінома другого порядку з двома змінними

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (3)$$

y – відповідний до формул (1), (2) показник;

x_1, x_2 – змінні ($\bar{\Delta}_1, \bar{\Delta}_2$);

$b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ – коефіцієнти полінома.

Для здійснення канонічних перетворень УММ вигляду (3) необхідною

умовою визначення екстремальної точки C (її координат x_{1C}, x_{2C} , екстремального значення y_C) і відповідного переносу початку координат є рівність нулю частинних похідних показника y за змінними x_1 і x_2 – розв'язання системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = b_1 + 2b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2 = 0; \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = b_2 + 2b_{22} \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для заміни старих координат x_1, x_2 новими z_1, z_2 , які повернуті на деякий кут відносно старих осей, та встановлення зв'язку між цими координатами розв'язується канонічне рівняння

$$y - y_C = \theta_1 \cdot z_1^2 + \theta_2 \cdot z_2^2, \quad (5)$$

де θ_1, θ_2 – корні характеристичного рівняння

$$\theta^2 + \alpha \cdot \theta + \beta = 0, \quad (6)$$

α, β – відповідні коефіцієнти характеристичного рівняння (7), що визначаються через коефіцієнти полінома (4) за наведеними нижче формулами

$$\alpha = -(b_{11} + b_{22}); \quad \beta = b_{11} \cdot b_{22} - 0,25b_{12}^2; \quad (7)$$

$$z_1 = l_1(x_1 - x_{1C}) + m_1(x_2 - x_{2C}); \quad z_2 = l_2(x_1 - x_{1C}) + m_2(x_2 - x_{2C}), \quad (8)$$

де $l_{1,2}, m_{1,2}$ – косинуси кутів повороту нових осей відносно старих

$$\frac{m_{1,2}}{l_{1,2}} = \frac{2(\theta_{1,2} - b_{11})}{b_{12}}; \quad l_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{1 + (m_{1,2}/l_{1,2})}}. \quad (9)$$

Видно, що заміна старих координатних осей на нові передбачає розв'язання характеристичного рівняння (6) і визначення косинусів $l_{1,2}$, $m_{1,2}$ з

використанням залежностей (9). Старі координати x_1 , x_2 зв'язані з новими z_1 , z_2 поданими нижче рівняннями

$$x_1 = l_1 \cdot z_1 + l_2 \cdot z_2 + x_{1C}; \quad x_2 = m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2 + x_{2C}. \quad (10)$$

Результати канонічних перетворень дають можливість визначити екстремальну точку C і класифікувати поверхню відгуку. При цьому задаючи показники y в рівнянні (3) відповідні фіксовані значення (при встановлених значеннях y_C), будуються бінарні перерізи відповідних поверхонь відгуку (контурні криві рівного виходу), які можуть відповідати наведеним нижче видам [9]:

1. Гіперболічний параболоїд. Отримується у випадку, коли коефіцієнти канонічного рівняння θ_1 , θ_2 мають різні знаки. Центр фігури називається мінімаксом. Контурні криві рівного виходу являють собою гіперболи. Якщо коефіцієнт $\theta_1 > 0$, то вихід $y - y_C$ збільшується при переміщенні вздовж осі z_1 в обидві сторони від центру фігури, а по осі z_2 – зменшується.

2. Еліптичний параболоїд. Коефіцієнти канонічного рівняння θ_1 , θ_2 мають однакові знаки. Центр фігури (екстремальна точка C) є максимумом, якщо такі коефіцієнти від'ємні, або мінімумом, якщо додатні. Криві рівного виходу являють собою еліпси.

3. Стаціонарна височина. Відповідає випадку, коли один з коефіцієнтів, наприклад θ_2 , дорівнює нулю, y_C – вихід в будь-якій точці на осі z_1 . Криві рівного виходу являють собою паралельні прямі.

4. Зростаюча височина (гребінь). Можливі випадки, коли коефіцієнти

полінома (4), наприклад b_{12} , b_{22} , дорівнюють нулю. Тоді рівняння (6) набуває вигляду $y = y_C = \theta_1 \cdot z_1^2 + b_2 \cdot z_2$. Центр фігури лежить на осі z_1 , але віднесений на безмежність по осі z_2 . Криві рівного виходу являють собою параболи.

Результати канонічних перетворень УММ (1), (2) для визначення виду відповідних поверхонь відгуку подано нижче в табл. 1, 2.

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити такі висновки:

1. Для всіх досліджуваних УММ коефіцієнти канонічного рівняння θ_1 , θ_2 мають різні знаки. Тобто поверхнями відгуку контрольованих показників є гіперболічні параболоїди. Контурні криві рівних виходів описуються гіперболами. Для прикладу на рис. 1 показана поверхня відгуку показника σ_{FI} .

2. За результатами досліджень поверхні відгуку показника σ_{FI} та її бінарного перерізу (рис. 2, а) встановлено: координатами екстремальної точки C , в якій функція досягає значення $y_C = \sigma_{FI} = 268 \text{ МПа}$, є $\bar{\Delta}_{1C} = 0,416$ і $\bar{\Delta}_{2C} = 0,193$. Кути повороту нових осей z_1 , z_2 відносно старих $\bar{\Delta}_1$, $\bar{\Delta}_2$ складають $86,9^\circ$. З урахуванням того, що коефіцієнт $\theta_1 = 1406,2 > 0$, вихід $y - y_C$ буде збільшуватися при переміщенні вздовж осі

z_1 в обидві сторони від центру фігури, а по осі z_2 – зменшуватися.

3. За результатами досліджень поверхні відгуку показника σ_H та її бінарного перерізу (рис. 2, б) встановлено, що екстремальна точка C знаходиться за межами області розглядання ($\bar{\Delta}_{1C} = 0,74, \bar{\Delta}_{2C} = 0,305$;

$y_C = \sigma_H = 868$ МПа; кути повороту нових осей z_1, z_2 відносно старих $\bar{\Delta}_1, \bar{\Delta}_2$ складають $64,3^\circ$; вихід $y - y_C$ буде збільшуватися при переміщенні вздовж осі z_1 в обидві сторони від центру фігури, а по осі z_2 – зменшуватися).

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів рівняння (3) для дослідження УММ (1), (2)

Показник	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
σ_{F1}	223,581	436,114	-455,791	-477,417	1400,36	-205,229
σ_H	638,249	492,59	309,257	-162,23	498,881	-829,412

Таблиця 2

Результати розрахунків за формулами (4)...(9) для канонічних перетворень УММ (1), (2)

Показник	θ_1	θ_2	$\bar{\Delta}_{1C}$	$\bar{\Delta}_{2C}$	y_C	m_1	l_1	m_2	l_2
σ_{F1}	1406,2	-483,3	0,416	0,193	268	-0,998	0,054	0,055	0,999
σ_H	698,6	-362	0,74	0,305	867	-0,903	0,434	0,434	0,901

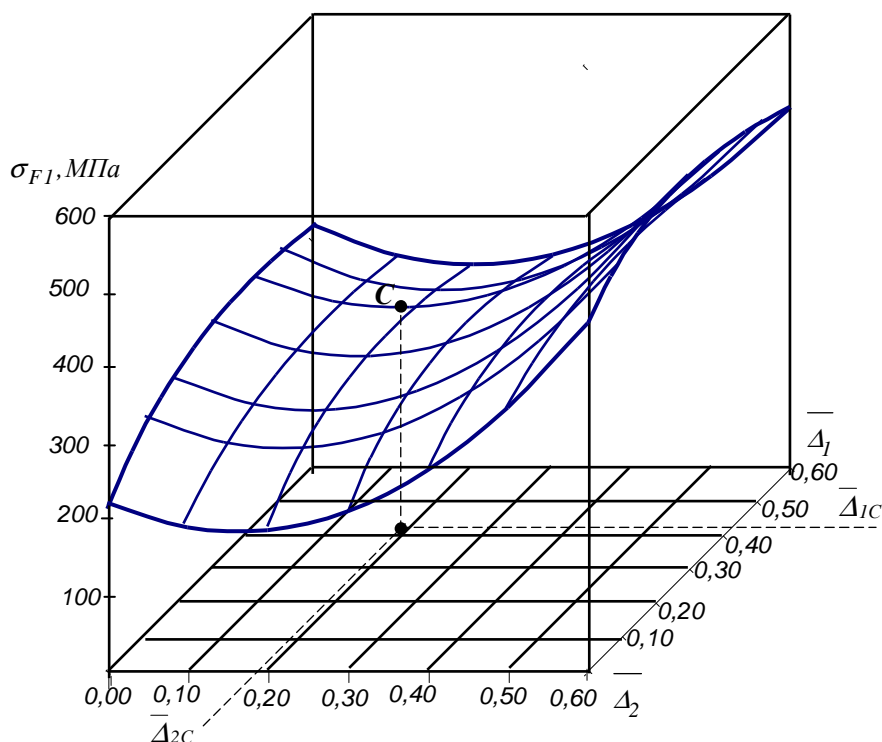


Рис. 1. Поверхня відгуку показника міцності σ_{F1} ТЗП електропоїзда ЕР2Р, яка відповідає УММ (1)

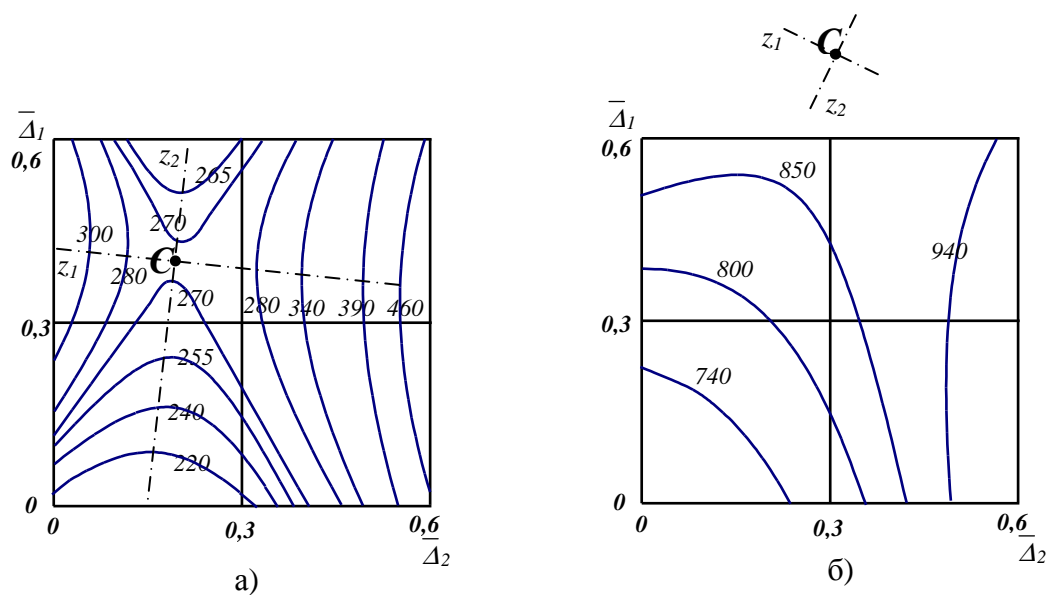


Рис. 2. Графіки контурних кривих рівного виходу для прийнятих фіксованих значень контрольованих показників: а – σ_{FI} ; б – σ_H

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Для отримання комплексної картини впливу ступеня зносу профілів зубців шестірні та колеса на показники

міцності ТЗП потрібно проводити аналіз їх поверхонь відгуку. При цьому доцільно використовувати описаний вище підхід, який передбачає проведення канонічних перетворень відповідних УММ.

Список використаних джерел

1. Карпов, В. М. Стан, проблеми та перспективи оновлення рухомого складу України [Текст] / В. М. Карпов, О. І. Никифоров // Збірник наукових праць науково-дослідного економічного інституту «Формування ринкових відносин в Україні». – К.: НДЕІ, 2012. – Вип. 6 (133)/2012. – С. 160-166.
2. Боднар, Б. Є. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування [Текст]: підруч. для ВНЗ залізнич. трансп. / Б. Є. Боднар, Є. Г. Нечаєв, Д. В. Бобир; під ред. д.т.н., проф. Б. Є. Боднара. – Дніпропетровськ: Ліра ЛТД, 2010. – 358 с.
3. Мороз, В. І. Обґрунтування перспективних напрямків підвищення експлуатаційної надійності тягових передач електропоїздів серії ЕР-2 [Текст] / В. І. Мороз, О. В. Братченко, С. В. Бобрицький // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 111. – С.176-182.
4. Мороз, В. І. Нова методика визначення експлуатаційних зносів профілів зубців та підбору парних коліс тягових зубчатих передач [Текст] / В. І. Мороз, О. В. Братченко, С. В. Бобрицький // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 117. – С.12-16.
5. Бобрицький, С. В. Особливості оцінювання надійності тягових зубчатих передач з різним ступенем зносу зубчатих коліс [Текст] / С. В. Бобрицький // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 151. – Т.1. – С. 12-16.
6. Wang T. Fault diagnosis for wing turbine planetary ring gear via a mashing resonance based filtering algorithm [Text] / T.Wang, F.Chu', Q.Han // ISA Transaction. – 2017. – Vol. 67. – P. 173-182.

7. Мороз, В. І. Основи конструювання і САПР технічних засобів залізничного транспорту [Текст]: навч. посібник / В. І. Мороз, О. В. Братченко, К. В. Астахова. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 136 с.

8. Мороз, В. І. Основи конструювання і САПР [Текст] / В. І. Мороз, О. В. Братченко, В. В. Лінков. – Харків: Нове слово, 2003. – 194 с.

9. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях [Текст] / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.

Громов Володимир Ігорович аспірант Українського державного університету залізничного транспорту.
Тел.(057) 730-10-53.

Gromov Volodimir Igorovich, postgraduate of Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-10-53.

Стаття прийнята 27.03.2017 р.