

УДК 629.4.027.4.004.15

**ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ З РІЗНИМИ СТУПЕНЯМИ ЗНОСУ ЗУБЧАТИХ КОЛІС**

**К-т техн. наук. С. В. Бобрицький**

**ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ С РАЗЛИЧНЫМИ СТЕПЕНЯМИ ИЗНОСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

**К-т техн. наук. С. В. Бобрицкий**

**FEATURES FOR ESTIMATING THE RELIABILITY OF TRACTION GEAR WITH VARYING DEGREES OF DETERIORATION OF GEAR WHEELS**

**Candidate of techn. sciences S. Bobritskiy**

*В статті запропоновано підхід до оцінювання надійності тягових зубчатих передач рухомого складу в експлуатації з урахуванням зносу шестерень та зубчатих коліс. Наведені математичні моделі для визначення вірогідності безвідмовної роботи на прикладі ТЗП електропоїзда серії EP-2. Подані рекомендації щодо подальшого застосування*

запропонованого підходу в дослідженнях, які спрямовані на створення ТЗП нового та модернізацію існуючого МВРС.

**Ключові слова:** моторвагонний рухомий склад, електропоїзд ЕР-2, тягова зубчата передача, зубчаті колеса, надійність, напруження згину вірогідність безвідмовної роботи.

В статті пропонується підхід до оцінювання надійності тягових зубчатих передач подвижного состава в експлуатації з урахуванням износа шестерен и зубчатых колес. Приведены математические модели для определения вероятности безотказной работы на примере ТЗП электропоезда серии ЭР-2. Даны рекомендации относительно дальнейшего применения предложенного подхода в исследованиях, направленных на создание ТЗП нового и модернизацию существующего МВРС.

**Ключевые слова:** мотор-вагонный подвижной состав, электропоезд ЭР-2, тяговая зубчатая передача, зубчатые колеса, надежность, напряжения изгиба, вероятность безотказной работы.

The article analyzes the most common damage to the gear teeth traction gears multiple units. Indicated that the presence of cracks and destruction at the heart of the teeth is a sign of the loss of their resistance to bending stresses. An approach for evaluating the reliability of traction gears rolling stock in operation, taking into account the wear of the teeth of gears and gear. The mathematical model to determine the probability of failure-free operation as an example of an electric traction gears series ER-2. It is shown that the greatest influence on tooth wear parameter has wheels, and in excess of 3,693 mm wear (50% of the maximum wear)  $p_F$  is reduced to a value of 0.5. Recommendations regarding the application of the proposed approach in addressing issues on the feasibility of further operation of the wheels with a considerable degree of wear and reasonable choice worn pair of gears for repairs gear.

**Keywords:** multiple unit, train ER- 2, traction gear, gears, reliability, bending stress, the probability of failure-free operation.

### Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень у напрямку її вирішення.

В здійсненні пасажироперевезень на мережах залізниць України в приміських, місцевих і прямих сполученнях провідне місце займає електричний моторвагонний рухомий склад (МВРС), більша частина якого (близько 60%) експлуатується у наднормативний термін [1, 2]. З урахуванням повільного оновлення інвентарного парку МВРС Укрзалізниці особливої актуальності набувають розробки, спрямовані на забезпечення високих техніко-економічних показників електропоїздів, що знаходяться в експлуатації [3, 4].

Одним з основних модулів конструкції МВРС, що безпосередньо впливає на безпеку руху, є екіпажна частина, до складу якої входить тягова зубчата передача (складається із шестерні, вал якої через муфту з'єднується з валом ротора тягового електродвигуна, і зубчатого колеса колісної пари). Вимоги, які пред'являються до експлуатаційної надійності тягової зубчатої передачі (ТЗП) високі, тому що

порушення її працездатності практично визначає відказ всієї моторної секції [5].

Контроль стану деталей тягового приводу, який проводився з використанням магнітної дефектоскопії під час деповських ремонтів електропоїздів серії ЕР-2 на Південній залізниці, засвідчив, що близько 80 % відказів тягової передачі приходить на ушкодження шестерень [6]. При цьому наявність тріщин та руйнувань в нижній частині (основі) зубців є характерною ознакою втрати їх опору згинним напруженням [7], а вірогідність безвідмовної роботи  $p_F$  за критерієм опору згинним напруженням визначається як вірогідність того, що згинне напруження  $\sigma_F$  не перевищує границі контактної витривалості  $\sigma_{F \text{ lim}}$  [8]:

$$p_F = \text{Вер}(\sigma_F < \sigma_{F \text{ lim}}) \quad (1)$$

Наведене вище обґрунтовує актуальність проведення досліджень, спрямованих на оцінювання надійності ТЗП з різними ступенями зносу зубців.

**Мета статті і викладення основного матеріалу.** Метою статті є описання запропонованого підходу до оцінювання надійності тягових зубчатих передач рухомого складу в експлуатації з урахуванням зносу шестерень та зубчатих коліс. Для визначення вірогідності безвідмовної роботи ТЗП пропонується наступна послідовність дій:

$$\sigma_{F1} = 213,562 + 457,696 \cdot \bar{\Delta}_1 - 405,638 \cdot \bar{\Delta}_2 - 424,567 \cdot \bar{\Delta}_1^2 + 1392,1 \cdot \bar{\Delta}_2^2 - 428,105 \cdot \bar{\Delta}_1 \cdot \bar{\Delta}_2 \quad (2)$$

2. В залежності від термічної або хіміко-термічної обробки поверхонь зубців вибирається коефіцієнт варіації границі витривалості зубців базового колеса  $v_{F \text{ lim}}^0$ .

3. В якості граничної величини розрахункового параметра приймається границя витривалості зубчатого колеса при згині  $\sigma_{F \text{ lim}}$ . Середнє значення границі витривалості  $\bar{\sigma}_{F \text{ lim}}$  визначається за формулою:

$$\bar{\sigma}_{F \text{ lim}} = \bar{\sigma}_{F \text{ lim}}^0 \cdot K_Z \cdot K_{FL} \prod_{I=1}^m K_I \quad (3)$$

де,  $K_Z$  – коефіцієнт, що вносить поправку на багатоелементність зубчатого колеса;

$K_{FL}$  – коефіцієнт довговічності;

$\prod_{I=1}^m K_I$  – добуток корегуючих

коефіцієнтів, що враховують відміну коефіцієнтів концентрації та шорсткості поверхонь викружок базового колеса та колеса, що розраховується, масштабний фактор, технологію виготовлення.

$\bar{\sigma}_{F \text{ lim}}^0$  – середнє значення границі витривалості базового зразка:

$$\bar{\sigma}_{F \text{ lim}}^0 = (1,35HB + 100) \cdot \frac{1}{1 + u_p \cdot v_{F \text{ lim}}^0} \quad (4)$$

$u_p$  – квантиль нормованого нормального розподілу, який залежить від вірогідності неруйнування межі витривалості, що визначається.

4. Розраховується коефіцієнт варіації границі витривалості зубчатого колеса:

1. Визначаються величини напружень згину та їх коефіцієнт варіації.

Згинні напруження визначались в залежності від ступеня зносу шестерень та зубчатих коліс за отриманою і описаною в джерелі [9] математичною моделлю:

$$v_{F \text{ lim}} = \sqrt{(\alpha_Z \cdot v_{F \text{ lim}}^0)^2 + 0,14^2} \quad (5)$$

де,  $\alpha_Z$  – параметр, що враховує багатоелементність зубчатого колеса;

$v_{F \text{ lim}}^0$  – коефіцієнт варіації границі витривалості базового колеса, що має однакову кількість зубців з колесом, яке розраховується.

5. Визначається вірогідність безвідмовної роботи за критерієм опору втомленості при згині  $p_F$  в залежності від квантиля:

$$u_p = \frac{\bar{n}_F - 1}{\sqrt{n_F^2 \cdot v_{F \text{ lim}}^2 + v_{\sigma_F}^2}} \quad (6)$$

де,  $\bar{n}_F$  – коефіцієнт запасу міцності за середніми напруженнями:

$$\bar{n}_F = \frac{\bar{\sigma}_{F \text{ lim}}}{\sigma_F} \quad (7)$$

Запропонований підхід було використано в дослідженні з визначення вірогідності безвідмовної роботи ТЗП електропоїздів серії EP-2 з різними ступенями зносу зубчатих коліс з використанням методів математичного планування експерименту.

На першому етапі з використанням відповідної матриці планування було складено ортогональний план другого порядку для двох змінних (величина зносу зубців шестерні  $\Delta_1 = (0...2,373)$  мм і колеса  $\Delta_2 = (0...3,693)$  мм), що варіюються на трьох рівнях і для кожного режиму плану (сполучень змінних  $\Delta_1, \Delta_2$ ) розраховані величини показників  $\sigma_F, u_p, p_F$  (табл. 1).

Математичний план дослідження

№№	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\sigma_F$	$u_p$	$p_F$
1	2,373	3,693	514	-0,86	0,8
2	2,373	0	326	-2,85	0,9977
3	0	3,693	611	0	0,5
4	0	0	214	-4,17	0,9999
5	1,187	1,848	298	-3,17	0,999
6	2,373	1,848	250	-3,74	0,9997
7	0	1,848	242	-3,82	0,9998
8	1,187	3,693	615	0	0,5
9	1,187	0	321	-2,7	0,9965

За отриманими масивами величин коефіцієнти потрібних УММ, які наведено контрольованих показників були визначені нижче у вигляді поліномів другого порядку:

$$u_p = -4,088 + 1,6039 \cdot \Delta_1 - 0,8725 \cdot \Delta_2 - 0,4504 \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_1 + 0,5341 \cdot \Delta_2 \cdot \Delta_2 - 0,2492 \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_2 \quad (8)$$

$$p_F = 1,041 - 0,1079 \cdot \Delta_1 + 0,0688 \Delta_2 + 0,0362 \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_1 - 0,059 \cdot \Delta_2 \cdot \Delta_2 + 0,0342 \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_2 \quad (9)$$

Перевірка адекватності отриманих УММ проводилась за величиною дисперсії і підтвердила доцільність їх використання при вирішенні поставленої задачі.

На рис. 1 наведено отриманий з використанням УММ (9) допоміжний графік (бінарний переріз) для показника  $p_F$ . Він дозволяє оцінювати вплив ступенів зносу шестерні  $\Delta_1$  та зубчатого колеса  $\Delta_2$  на вірогідність безвідмовної роботи ТЗП.

З графіку видно, що переважний вплив на вірогідність безвідмовної роботи має знос зубців колеса  $\Delta_2$  ТЗП. Зі збільшенням величини  $\Delta_2$  суттєво знижується вірогідність безвідмовної роботи. Так, при перевищенні  $\Delta_2 = 3,693$  мм (50 % максимального зносу)  $p_F$  зменшується

до величини 0,5. Це необхідно враховувати при вирішенні питань з доцільності подальшої експлуатації коліс зі значним ступенем зносу та формуванні пар шестерня-зубчате колесо при проведенні ремонтів ТЗП.

**Висновки та рекомендації щодо подальшого використання.** Наведені у статті матеріали підтверджують доцільність використання запропонованого підходу в дослідження з визначення надійності ТЗП з різними ступенями зносу зубчатих коліс. Це дасть змогу здійснювати обґрунтований підбір зношених пар зубчатих коліс при ремонтах ТЗП з метою їх подальшої експлуатації.

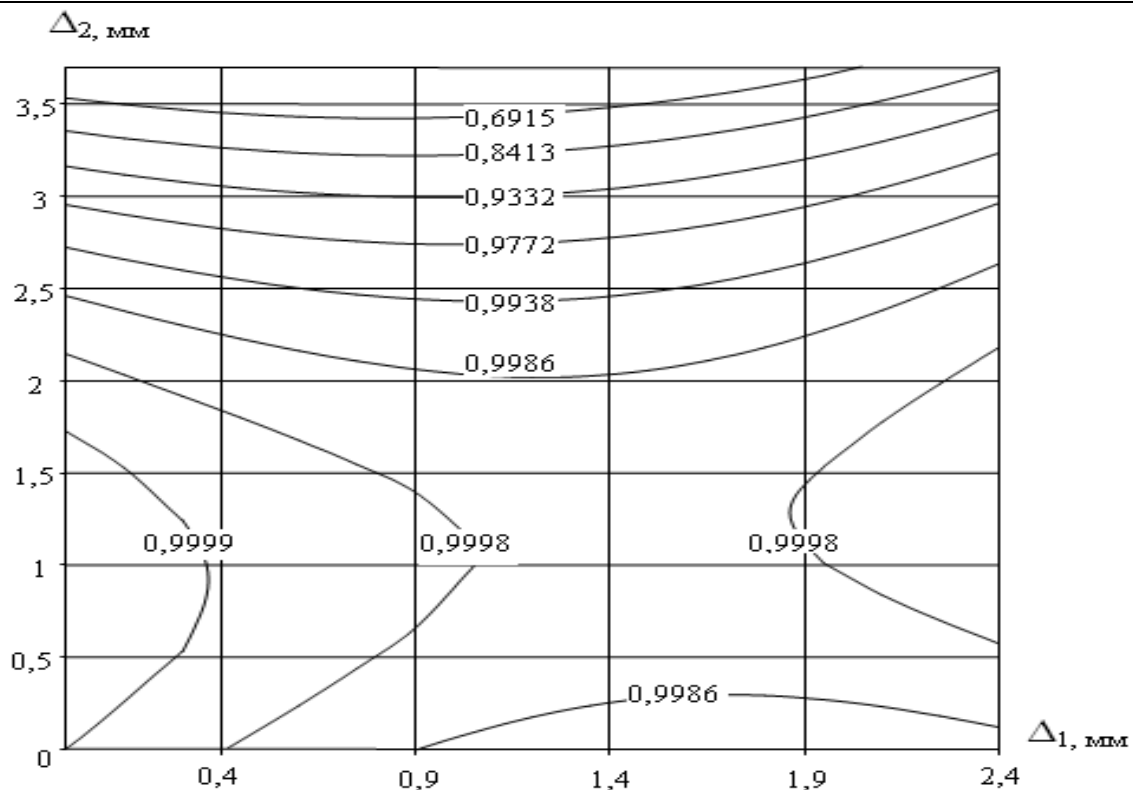


Рис. 1 – Допоміжний графік для визначення вірогідності безвідмовної роботи  $p_F$  тягової зубчатої передачі електропоїзда серії EP-2.

### Список використаних джерел

1. Афанасенко, И. Д. Логистика снабжения [Текст] / И. Д. Афанасенко, В. В. Борисова. – СПб.: Питер, 2001. - 336с.
2. Багимов, А. В. Взаимодействие транспортных, информационных и финансовых потоков при внешнеторговых перевозках [Текст] / А. В. Багимов // Транспорт: наука, техника, управление. - 2013. - № 9. - С. 67-69
3. Линдерс М. Управление снабжением и запасами[текст] / Линдерс М. – СПб.: "Виктория", 2002.
4. Лукинский, В. С. Модели и методы логистики [Текст] / В. С. Лукинский. - СПб.: Питер, 2003. - 176с.
5. Родионов, А.Р. Менеджмент: Нормирование и управление производственными запасами и оборотными средствами предприятия [Текст] / А.Р.Родионов, Р.А.Родионов. – М.: Экономика, 2005.
6. Степанов, В.И. Экономика и нормирование материальных ресурсов [Текст] / В.И.Степанов, А.А.Мешков.- М.: Экономика, 1991.
7. Тиверовский, В. И. Современный этап в развитии логистики за рубежом [Текст] / В. И. Тиверовский // Транспорт: наука, техника, управление. - 2013. - № 6. - С. 22-27.
8. Фасоляк, Н.Д. Экономика, организация и планирование материально-технического снабжения и сбыта [Текст] / Н.Д.Фасоляк. – М.: Машиностроение, 1990.
9. Чеботаев, А. А. Специализация в производственно-транспортных логистических цепях [Текст] / А. А. Чеботаев, С. К. Каптилкин // Транспорт: наука, техника, управление. - 2013. - № 1. - С. 71-72.

Рецензент д-р техн. наук, профессор А.П.Фалендиш

---

Бобрицький Сергій Владиславович, канд. техн. наук, кафедри механіки та проектування машин, Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: 10-52, E-mail: [s.bobritskiy@gmail.com](mailto:s.bobritskiy@gmail.com)

Bobritskiy Sergiy, candidate of techn. sciences, department of mechanics and machine design, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Tel.: 10-52, E-mail: [s.bobritskiy@gmail.com](mailto:s.bobritskiy@gmail.com)