

УДК 621.753.1: 338.658

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВАРТОСТІ РЕМОНТУ ВАГОННОГО ВУЗЛА ВІД РОЗПОДІЛЕННЯ ДОПУСКІВ ОБРОБКИ ОКРЕМИХ ЙОГО ДЕТАЛЕЙ

Мілянч А.Р.

THE DEPENDENCE OF THE COST OF REPAIR OF WAGON NODE ON THE DISTRIBUTION OF ADMISSION FOR THE PROCESSING OF CERTAIN DETAILS

Milyanych A.

У статті автором розглянуто питання витрат на виготовлення вагонного вузла, тому, що витрати на ремонт вузла із певними допусками, який складається із зібраних впритул деталей вантажних вагонів, можуть доволі суттєво відрізнятися для його складових. Допуски, які розраховані способом максимум – мінімум, отримуються доволі жорсткими, що сприяє різкому підвищенню вартості виробництва. Виконано розрахунок мінімізації витрат при обмеженні допусків за допомогою методу множників Лагранжа, який показує, що зменшення загальних витрат буде тоді, коли допуски більші дорожчих деталей будуть зростати, а допуски дешевших деталей зменшуватись.

Ключові слова: вантажні вагони, надійність, допуск обробки, вартість ремонту.

Вступ. Експлуатаційні показники вузлів і механізмів вантажних залізничних вагонів (довговічність, надійність, точність тощо) у значній степені залежать від правильності вибору посадок, допусків форми та розташування, шорсткості поверхні. У складеному вузлі деталі пов'язані одна з іншою, і відхилення розмірів, форми та розташування осей або поверхонь однієї будь-якої із деталей викликає відхилення в інших деталях. Ці відхилення, додаючись, впливають на експлуатаційні показники вузлів і механізмів вагонів.

Постановка проблеми. Рішення проблеми витрат на виготовлення вагонного вузла із певними допусками є пов'язана із оптимізацією, яка повинна забезпечувати надійність та продовження терміну експлуатації вантажних вагонів.

Загальновідомо, що допуск – різниця між найбільшими та найменшими граничними значеннями параметрів, задається на геометричні розміри деталей, механічні, фізичні та хімічні властивості [1]. Вони призначаються (вибираються) виходячи із технологічної точності або вимог до даного вагонного

вузла. Будь-яке значення параметру, що перебуває у заданому інтервалі, є допустимим.

Для встановлення допусків форми та розташування був вибраний спосіб розрахунку на максимум – мінімум, як найбільш універсальний та наочний. Він базується на припущенні про можливість виникнення несприятливого збігу відхилень у окремих деталях вагонного вузла. Допуски, які розраховані способом максимум – мінімум, отримуються доволі жорсткими, що сприяє різкому підвищенню вартості виробництва [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом значна увага надається питанням присвячених підвищенню ефективності роботи вагонного депо [3]. В той же час досліджень, що спрямовані на зменшення вартості ремонту вагонних вузлів надто мало. В останніх дослідженнях і публікаціях щодо реформування вагонного господарства [4] також не в повній мірі ураховуються аспекти щодо спрощення, прискорення та зменшення вартості підготовки ремонтно-відновлювальних робіт. В праці [5] автор пропонує впровадити типізацію технологічних процесів на основі розробленої класифікації елементів залізничних вагонів, що суттєво зменшить витрати при ремонті деталей вантажних вагонів заклавши в основу розробки технологічних процесів типових деталей, які властиві лише засобам рухомого складу залізниці. Таким чином, оптимізаційне управління витратами машинобудівного підприємства в сучасних ринкових умовах є важливим напрямком діяльності з управління його розвитком та стаття на дану тему є актуальною й значущою для забезпечення зростання економічного потенціалу [6], як конкретних підприємств, так і народного господарства в цілому.

Мета статті. Досліджувана тут задача залежності вартості ремонту вагонного вузла від розподілення допусків обробки окремих його деталей ви-

рішується встановленням величини допуску, для якого проводиться аналіз витрат, до необхідного допуску, щоб витрати на виготовлення деталі із даним допуском були мінімальними.

Спочатку ми наводимо формулювання задачі, яка базується на припущенні про можливість виникнення несприятливого збігу відхилень у окремих деталях вагонного вузла.

Існуючий на вагоноремонтному виробництві верстатний парк дозволяє при виготовленні деталей витримувати допуски, варіації яких будуть нормально розподілені, що у свою чергу дозволяє збільшувати всі ці допуски. Далі на основі нормального закону буде показано, що для нормально розподілених похибок витрати на даний вузол будуть мінімальними. На прикладах показано, що витрати на виготовлення вагонного вузла будуть меншими, якщо похибки складових деталей вузла є нормально розподіленими.

Результати досліджень. У загальному випадку витрати на виготовлення деталі із збільшенням допусків будуть зменшуватись. Витрати на ремонт вузла із певними допусками, який складається із зібраних впритул деталей, можуть доволі суттєво відрізнятись для його складових. Зменшення загальних витрат буде, очевидно, мати місце тоді, коли допуски більш дорожчих деталей будуть зростати, а допуски дешевших деталей – зменшуватись. У наведеному нижче матеріалі даної статті буде показано, як можна розраховувати допуски, щоб відремонтувати будь-який вузол залізничного вантажного вагону із мінімальними витратами.

Витрати C_i на виготовлення однієї із деталей можна представити наступним чином:

$$C_i = M_i + M_i', \quad (1)$$

де M_i – витрати на виготовлення деталі даного розміру, яка є складовою даного вузла;

M_i' – витрати, які включені в оброблення всієї решти поверхонь деталі.

У загальному випадку M_i будуть змінюватись зворотно пропорційно квадрату допуску і можуть бути представлені рівнянням

$$M_i = \frac{K_i}{u_i^2} \quad \text{або} \quad K_i = M_i \cdot u_i^2, \quad (2)$$

де K_i – стала величина;

u_i – відхилення від середнього значення розміру деталі, яка є складовою даного вузла.

Для встановлення величини K_i повинні бути відомі витрати на виготовлення деталі із даним допуском [7]. Чим ближче допуск, для якого проводиться аналіз витрат, до необхідного допуску, тим правильніше буде значення K_i у рівнянні (2).

Загальні витрати C_v для виготовлення даного вагонного вузла будуть рівними сумі витрат C_1, C_2, C_3, \dots на виготовлення окремих деталей, або

$$C_v = C_1 + C_2 + C_3 + \dots = \frac{K_1}{u_1^2} + \frac{K_2}{u_2^2} + \frac{K_3}{u_3^2} + \dots + M_1' + M_2' + M_3' + \dots \quad (3)$$

Для зручності останнє рівняння (3) можна записати наступним чином:

$$C_v = \frac{K_1}{u_1^2} + \frac{K_2}{u_2^2} + \frac{K_3}{u_3^2} + \dots + M_1' + M_2' + M_3' + \dots = f(u_1, u_2, u_3, \dots) \quad (4)$$

Припускаємо, що встановлений допуск u_v для даного вагонного вузла повинен бути розподілений арифметично між допусками u_1, u_2, u_3, \dots складових його деталей:

$$u_v = u_1 + u_2 + u_3 + \dots \quad (5)$$

Арифметичний закон. Рівняння (5) можна записати у вигляді:

$$u_v = u_1 + u_2 + u_3 + \dots = \varphi(u_1, u_2, u_3, \dots). \quad (6)$$

Задача полягає у мінімізації витрат C_v при обмеженні, що результуючі допуски задовольнятимуть рівняння (6). Її розв'язок здійснюється методом множників Лагранжа. Повинні задовольняти наступні рівняння [8]:

$$\frac{\partial f}{\partial u_1} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial u_1} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial u_2} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial u_2} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial u_3} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial u_3} = 0. \quad (9)$$

і так далі

де λ – відповідний множник, який задовольняє всі рівняння.

Від виразів (4) та (6) беремо похідні, які при підстановці у вирази (7)...(9) дають наступні залежності:

$$-\frac{K_1}{u_1^2} + \lambda = 0, \quad (10)$$

$$-\frac{K_2}{u_2^2} + \lambda = 0, \quad (11)$$

$$-\frac{K_3}{u_3^2} + \lambda = 0. \quad (12)$$

Перший та другий вирази приводимо до наступних виглядів:

$$\frac{K_1}{u_1^2} = \frac{K_2}{u_2^2} \quad \text{або} \quad u_2 = \sqrt[3]{\frac{K_2}{K_1}} \cdot u_1 \quad (13)$$

Перше та третє рівняння дають

$$\frac{K_1}{u_1^3} = \frac{K_3}{u_3^3} \quad \text{або} \quad u_3 = \sqrt[3]{\frac{K_3}{K_1}} \cdot u_1 \quad (14)$$

Далі підставляємо рівняння (13) і (14) у рівняння (6):

$$u_v = u_1 + \sqrt[3]{\frac{K_2}{K_1}} \cdot u_1 + \sqrt[3]{\frac{K_3}{K_1}} \cdot u_1 + \dots$$

При розв'язку останнього рівняння відносно u_1 , у випадку застосування рівняння (5) витрати C_v будуть мінімальними, якщо допуски складових деталей вагонних вузлів прийняті у вигляді наступних виразів:

$$u_1 = \frac{u_v}{\sqrt{1 + \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \sqrt{\frac{K_3}{K_1}} + \dots}}, \quad (15)$$

$$u_2 = \sqrt[4]{\frac{K_2}{K_1}} \cdot u_1; \quad (16)$$

$$u_3 = \sqrt[4]{\frac{K_3}{K_1}} \cdot u_1 \quad (17)$$

і так далі.

Нехай існуючий на даному вагоноремонтному виробництві верстатний парк дозволяє при виготовленні деталей витримувати допуски, варіації яких будуть нормально розподілені, що у свою чергу дозволяє збільшувати всі ці допуски. Тоді допуск u_v конструкції даного вагонного вузла підпорядковується закону:

$$u_v = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots} \quad (18)$$

Далі на основі нормального закону буде показано, що для нормально розподілених похибок витрати на даний вузол будуть мінімальними.

Нормальний закон. Рівняння (18) можна записати у вигляді

$$u_v = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots} = \varphi(u_1, u_2, u_3, \dots) \quad (19)$$

Часткові похідні отримуємо шляхом диференціювання виразів (4) та (19) і підстановкою їх у рівняння (7)...(9):

$$-\frac{2K_1}{u_1^2} + \frac{\lambda \cdot u_1}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots}} = 0;$$

$$-\frac{2K_2}{u_2^2} + \frac{\lambda \cdot u_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots}} = 0;$$

$$-\frac{2K_3}{u_3^2} + \frac{\lambda \cdot u_3}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots}} = 0.$$

Перший та другий вирази приводимо до наступних виглядів:

$$\frac{K_1}{u_1^2} = \frac{K_2}{u_2^2} \quad \text{або} \quad u_2 = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \cdot u_1$$

Перше і третє рівняння дають

$$\frac{K_1}{u_1^2} = \frac{K_3}{u_3^2} \quad \text{або} \quad u_3 = \sqrt{\frac{K_3}{K_1}} \cdot u_1$$

Ці обидва рівняння підставляємо у рівняння (16):

$$u_v = \sqrt{u_1^2 + \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \cdot u_1^2 + \sqrt{\frac{K_3}{K_1}} \cdot u_1^2 + \dots}$$

При рішенні останнього рівняння відносно u_1 одержується рівняння (15), тобто, коли прийняті допуски згідно розв'язку рівнянь (15)...(17) вартість виготовлення даного вагонного вузла буде мінімальною.

Приклад 1. Потрібно зібрати у вузол без зазору три деталі. Аналіз витрат дав наступні дані:

Деталь № 1, загальні витрати: $M_1 = 1000 \text{ грн}$
 $M'_1 = 200 \text{ грн}$ при допуску $0,102 \text{ мм} + 800 \text{ грн}$.

Деталь № 2, загальні витрати: 200 грн
 20 грн при допуску $0,076 \text{ мм} + 180/259 \text{ грн}$.

Деталь № 3, загальні витрати: $500/579 \text{ грн}$
 37 грн . при допуску $0,076 \text{ мм} + 470 \text{ грн}$.

Встановити мінімальні витрати на виготовлення вагонного вузла, якщо є арифметичний закон розподілення допусків у вигляді рівняння (4); допуск u_v вузла повинен бути рівним $0,2668 \text{ мм}$.

Розв'язок. Згідно рівняння (2):

$$K_1 = 200 \times 0,102^2 = 2,06446;$$

$$K_2 = 20 \times 0,076^2 = 0,11651;$$

$$K_3 = 30 \times 0,076^2 = 0,175;$$

$$\sqrt[3]{\frac{K_2}{K_1}} = \sqrt[3]{\frac{0,11651}{2,06446}} = 0,38315;$$

$$\sqrt[3]{\frac{K_3}{K_1}} = \sqrt[3]{\frac{0,175}{2,06446}} = 0,43860.$$

Згідно рівняння (15):

$$u_1 = \frac{0,2668}{1 + 0,38315 + 0,43860} = 0,146 \text{ мм}.$$

Згідно рівняння (13):

$$u_2 = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \cdot u_1 = 0,38315 \cdot 0,146 = 0,0565 \text{ мм}.$$

Згідно рівняння (14):

$$u_3 = \sqrt[3]{\frac{K_3}{K_1}} \cdot u_1 = 0,43860 \cdot 0,146 = 0,064 \text{ мм},$$

$$\frac{K_1}{u_1^2} = \frac{2,06446}{(0,146)^2} = 96 \text{ грн.}$$

$$C_1 = 96 + 800 = 896 \text{ грн.}$$

$$\frac{K_2}{u_2^2} = \frac{0,11651}{(0,0565)^2} = 37 \text{ грн.};$$

$$C_2 = 37 + 180 = 217 \text{ грн.}$$

$$\frac{K_3}{u_3^2} = \frac{0,175}{(0,064)^2} = 42 \text{ грн.};$$

$$C_3 = 42 + 470 = 512 \text{ грн.}$$

Загальні витрати становитимуть: $C_v = 1625$ грн.

Для порівнювання загальних витрат проводимо розрахунок мінімальних витрат на виготовлення наближеного за конструкцією вагонного вузла, який має довільно вибраний допуск для кожної із його трьох деталей.

Приклад 2. Приймаємо дані, які є аналогічними попередньому прикладу 1, але припускаємо, що $u_1 = u_2 = u_3 = 0,0889$ мм.

Розв'язок. Всі значення K_i , отримані при заданих умовах витратах, будуть аналогічними прикладу 1.

Тоді:

$$\frac{K_1}{u_1^2} = \frac{2,06446}{(0,0889)^2} = 261 \text{ грн.};$$

$$C_1 = 261 + 800 = 1061 \text{ грн.}$$

$$\frac{K_2}{u_2^2} = \frac{0,11651}{(0,0889)^2} = 15 \text{ грн.};$$

$$C_2 = 15 + 180 = 195 \text{ грн.}$$

$$\frac{K_3}{u_3^2} = \frac{0,175}{(0,0889)^2} = 22 \text{ грн.};$$

$$C_3 = 22 + 470 = 492 \text{ грн.}$$

Загальні витрати: $C_v = 1748$ грн.

Приклад 3. Дані ті ж самі, що й у прикладі 1, але тепер допуски нормально розподілені. Встановити витрати на виготовлення вагонного вузла для випадку $u_v = 0,2667$ мм.

Розв'язок. Всі значення K_i будуть такими ж як і раніше:

$$\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \sqrt{\frac{0,11651}{2,06446}} = 0,23717;$$

$$\sqrt[4]{\frac{K_2}{K_1}} = 0,4870;$$

$$\sqrt{\frac{K_3}{K_1}} = \sqrt{\frac{0,175}{2,06446}} = 0,29047;$$

$$\sqrt[4]{\frac{K_3}{K_1}} = 0,5390.$$

Із рівняння (15) отримуємо:

$$u_1 = \frac{0,2667}{\sqrt{1 + 0,23717 + 0,29047}} = 0,216 \text{ мм.}$$

Згідно рівняння (16):

$$u_2 = \sqrt[4]{\frac{K_2}{K_1}} \cdot u_1 = 0,4870 \cdot 0,216 = 0,105 \text{ мм.}$$

Із рівняння (17) отримуємо:

$$u_3 = \sqrt[4]{\frac{K_3}{K_1}} \cdot u_1 = 0,5390 \cdot 0,216 = 0,1162 \text{ мм.}$$

Далі визначаємо:

$$\frac{K_1}{u_1^2} = \frac{2,06446}{(0,216)^2} = 44 \text{ грн.};$$

$$C_1 = 44 + 800 = 844 \text{ грн.}$$

$$\frac{K_2}{u_2^2} = \frac{0,116}{(0,105)^2} = 11 \text{ грн.};$$

$$C_2 = 11 + 180 = 191 \text{ грн.}$$

$$\frac{K_3}{u_3^2} = \frac{0,175}{(0,1162)^2} = 13 \text{ грн.};$$

$$C_3 = 13 + 470 = 483 \text{ грн.}$$

Загальні витрати: $C_v = 1518$ грн.

Для наближення проведених розрахунків до сьогоднішніх умов за прикладами 1,2,3, визначаємо загальні витрати з врахуванням показника інфляції у 2018 році [9], який склав 9,8%. Тоді, кінцеві дані матимуть наступний вигляд:

1) загальні витрати за 1 прикладом:

$$C_v = 1784,2 \text{ грн.},$$

2) за другим прикладом: $C_v = 1919,3$ грн.,

3) за третім прикладом: $C_v = 1666,7$ грн.

Таким чином, витрати на виготовлення вагонного вузла будуть меншими, якщо похибки складових деталей вузла є нормально розподіленими. Однак, тепер допуски в сумі дають значення більшими ніж 0,266 мм, оскільки повинна бути упевненість у виконанні припущення відносно нормальності.

Висновки. Для зменшення вартості ремонту вагонного вузла від розподілення допусків обробки окремих його деталей запропонований розрахунок мінімізації витрат при обмеженні допусків за допомогою методу множників Лагранжа, який показує, що зменшення загальних витрат буде тоді, коли допуски більш дорожчих деталей будуть зростати, а допуски дешевших деталей зменшуватись.

Результати проведених розрахунків, які наведені автором показують, що витрати на виготовлення вагонного вузла будуть меншими, якщо похибки складових деталей вузла є нормально розподіленими, тобто це дозволяє досягнути мінімальних витрат на виготовлення вагонного вузла.

Література

1. Основи взаємозамінності, стандартизації, сертифікації, акредитації та технічні вимірювання: підручник / [М. С. Когут, Н. М. Лебідь, О. В. Білоус та ін.]. – Львів : Світ, 2010. – 528 с.
2. Допуски и посадки: Справочник / В. Д. Мягков, М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский. Т. 1. – Л. : Машиностроение, 1982.

3. Борзилов І.Д. Оцінка параметрів витрат на ремонт вагона протягом його життєвого циклу / І.Д. Борзилов // зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2007. – Вип. 9. – С. 105-112.
4. Борзилов І.Д. Концепція спеціалізації підприємств з технічного утримання вагонів / І.Д. Борзилов, В.О. Міхєнко, М.Г. Котов // зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2008. – Вип. 14. – С. 108-114.
5. Куліченко А. Я. Основи розробки оптимальних технологічних процесів ремонту залізничних вагонів / А. Я. Куліченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — 2009. — № 26. — С. 15—18.
6. Присяжнюк Л.Г. Оптимізація витрат підприємств машинобудівної галузі / Економічний вісник НТУУ «КПІ»: збірник наукових праць, 2017, № 14. – С. 189-196.
7. Белоусова І. Проблеми обліку виробничих витрат і калькулювання собівартості продукції в промисловості / І. Белоусова І., М. Чумаченко // Бухгалтерський облік і аудит. – 2009. – №4. – С. 3-10.
8. Sokolnikoff I.S., Mathematical Theory of Elasticity, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1987.
9. Індекс інфляції. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/index/inflation/2018>

References

1. Basis of interchangeability, standardization, certification, accreditation and technical measurements: textbook / [M. S. Kohut, N. M. Lebid, O. V. Belous and others.]. - Lviv: World, 2010. - 528 p.
2. Admission and landings: A Handbook / V.D. Myagkov, M.A. Paley, A. B. Romanov, V.A. Braginsky. T. 1. - L.: Mechanical Engineering, 1982.
3. Borzilov I.D. Estimation of cost parameters for repair of a car during its life cycle / I.D. Borzilov // Sob. sciences works - Donetsk: DonIZT, 2007. - Vip. 9. - P. 105-112.
4. Borzilov I.D. Concept of specialization of enterprises for technical maintenance of cars / I.D. Borzilov, VO Mihienko, MG Cats // ass. sciences works - Donetsk: DonIZT, 2008. - Vip. 14. - P. 108-114.
5. Kulichenko A.Ya. Fundamentals of the development of optimal technological processes for the repair of railway cars / A. Ya. Kulichenko // Vysn. Dnipropetrovsk nats un th iron trans them acad. V. Lazaryan. - 2009. - No. 26. - P. 15-18.
6. Prysyzhnyuk L.G. Optimization of expenditures of enterprises of the machine-building industry / Economic Bulletin of NTUU "KPI": collection of scientific works, 2017, No. 14. - P. 189-196.
7. Belousova I. Problems of accounting for production costs and calculating the cost of production in industry / I. Bel-

- ousova I., M. Chumachenko // Accounting and Audit .- 2009.- №4. - P. 3-10.
8. Sokolnikoff I.S., Mathematical Theory of Elasticity, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1987.
9. Inflation index. Electronic resource. Access mode: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/index/inflation/2018>.

Міляннич А.Р. Зависимость стоимости ремонта вагонного узла от распределения допусков обработки отдельных его деталей.

В статье автором рассмотрены вопросы расходов на изготовление вагонного узла, потому, что затраты на ремонт узла с определенными допусками, состоящий из собранных вплотную деталей грузовых вагонов, могут довольно существенно отличаться для его составляющих. Допуски, которые рассчитаны способом максимум – минимум, получаются довольно жесткими, что способствует резкому повышению стоимости производства. Выполнен расчет минимизации затрат при ограничении допусков с помощью метода множителей Лагранжа, который показывает, что уменьшение общих затрат будет тогда, когда допуски более дорогих деталей будут расти, а допуски дешевых деталей уменьшаться.

Ключевые слова: грузовые вагоны, надежность, допуск обработки, стоимость ремонта, минимизация расходов.

Milyanych A.R. The dependence of the cost of repair of wagon node on the distribution of admission for the processing of certain details.

In the article, the author has examined the costs of manufacturing a carriage assembly, because the cost of repairing a assembly with certain tolerances, consisting of closely assembled parts of freight cars, can be quite different for its components. The tolerances, which are calculated by the method of maximum – minimum, are quite tough, which contributes to a sharp increase in the cost of production. A cost minimization calculation was performed while limiting tolerances using the Lagrange multipliers method, which shows that the reduction in total costs will be when the tolerances of more expensive parts increase and the tolerances of cheaper parts decrease.

Keywords: freight cars, reliability, admission processing repair cost, minimization of expenses.

Міляннич А.Р. – к.т.н., доцент, доцент кафедри «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна., e-mail: milyan_74@ukr.net.

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана 10.04.2019