

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ БУТСТРЕП

Тютін В.М., Національний транспортний університет, Київ, Україна, zelentechbud@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1954-5003

Мороз В.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, frostvaliko@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3000-4961

Левківський С.А., Національний транспортний університет, Київ, Україна, s.a.levkovsky@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1515-4240

STATISTICAL ANALYSIS OF THE RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF A PLANETARY GEARBOX USING THE BOOTSTRAP

Tiutin V.M., National Transport University, Kyiv, Ukraine, zelentechbud@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1954-5003

Moroz V.V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, frostvaliko@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3000-4961

Levkivsky S.A., National Transport University, Kyiv, Ukraine, s.a.levkovsky@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1515-4240

Постановка проблеми. Підвищення надійності та довговічності планетарних редукторів може бути досягнуто вдосконаленням їх конструкції та застосуванням прогресивних технологій виготовлення деталей та їх складання. Проте, визначити напрямки підвищення технічного рівня конкретного виробу можливо лише на підставі даних, отриманих в результаті експерименту. В планетарних редукторах комплексним показником, який дозволяє оцінити його технічний рівень, є коефіцієнт нерівномірності розподілу навантаження між сателітами Ω . Він характеризує силове навантаження зубчатих зачеплень «сонячне колесо – сателіти» і дорівнює відношенню значення сили, яка діє в зачепленні в даний момент до її значення в умовах рівномірного розподілу навантаження між сателітами.

Аналіз останніх досліджень. Існує декілька методик дослідження планетарних редукторів за допомогою методів тензометрії, які головним чином відрізняються одна від одної місцем розташування тензодатчиків. Вибір деталі, на яку наклеюють датчики, з одного боку визначає технічну складність реалізації експерименту, а з іншого – якість та повноту отриманої інформації. Найбільш простим експеримент буде у випадку, коли датчики розмішують на нерухомій деталі. Тоді не має потреби у використанні струмознімального обладнання. В більшості випадків такою деталлю є центральне колесо «б» з внутрішніми зубцями. Така методика передбачає розміщення тензорезисторів на обох торцях зубців. Проте, через необхідність використання датчиків з малою базою, експеримент значно ускладнюється. Це пов'язано з необхідністю виконання значного обсягу підготовчих операцій, а також низькою стабільністю роботи мікродротяних тензодатчиків. Точну інформацію про величини сил, які діють в зачепленнях центрального колеса «а» з сателітами «g», можна отримати, якщо розташувати датчики безпосередньо в зоні деформацій. Таким місцем є ніжки зубців центрального колеса «а». Проте, реалізація такої методики утруднена через те, що центральне колесо «а» обертається з великою кутовою швидкістю і внаслідок цього виникає технічна проблема в передаванні електричного сигналу від тензорезисторів до підсилювача. Значно менше недоліків має спосіб розміщення датчиків на вісях сателітів [1]. Він дозволяє безперервно фіксувати значення навантажень в усіх зачепленнях сателітів з центральним колесом «а». Водило планетарного редуктора має на багато меншу порівняно з зубчастим колесом «а» кутову швидкість, з огляду на це, проблема знімання електричного сигналу не постає.

Напруження, що виникають в зубцях коліс планетарного редуктора обумовлені дією двох силових факторів. Це нерівномірність розподілу навантаження між сателітами та його концентрація по довжині зубців. З огляду на це, було б доцільним під час проведення експерименту мати можливість отримувати значення обох цих параметрів. З цієї метою була розроблена спеціальна методика такого дослідження.

Мета роботи полягає в встановленні експериментальним шляхом довірчого інтервалу математичного очікування максимальних значень коефіцієнта нерівномірності розподілу

навантаження між сателітами для партії планетарних редукторів за результатами випробування одного зразка.

Основна частина. Лабораторні випробовування проводились методом тензометрування вісей сателітів. Тензорезистори наклеювались на кожну вісь. Для цього з обох боків вісей були профрезеровані спеціальні поверхні. Для того, щоб разом з нерівномірністю розподілу навантаження між сателітами, отримувати інформацію про характер його концентрації по довжині зубців, рівномірно вздовж кожної вісі було наклеєно по три пари тензодатчиків 2ПКБ-5× 100 з базою 5 мм та електричним опором 100 Ом. На рис. 1 зображена тензометрична вісь. При встановленні вісей у щоби водила вони були орієнтовані так, щоб датчики сприймали деформації згину, викликані дією колових сил у зачепленнях редуктора. Електричні кабелі виводились через отвір у вихідному кінці водила. Така схема розташування датчиків давала змогу безперервно на протязі кінематичного циклу отримувати інформацію про характер навантаження зачеплень. Показання тензорезисторів однієї вісі записувалися на протязі одного кінематичного циклу, який приблизно дорівнював шести обертам водила. Початок та кінець запису визначався за допомогою лічильника обертів водила. Водночас здійснювався запис значень крутного моменту на вихідному валу редуктора. Для цього на водилі був наклеєний тензодатчик типу ФКТБ.



Рисунок 1 – Вісь сателіта з тензодатчиками
Figure 1 – Satellite axis with strain gauges

Об'єкт, стенд та результати експериментального дослідження. Випробування планетарного редуктора відбувалися на стенді, який складався з редуктора, привод якого здійснювався від двошвидкісного електродвигуна типу АО2-62-8/4 через пасову передачу. Навантаження створювалось порошковим гальмом марки ПГ-100М. На вільному кінці гальм було встановлено струмознімальне обладнання РАТ 2, а за ним лічильник обертів. Для реєстрації вимірювальних параметрів застосовувалися підсилювач сигналу 8АНЧ-7М та осцилограф Н-115.

В якості об'єкта дослідження був взятий одноступінчатий планетарний редуктор, який випускається серійно. Він мав таку конструкцію. Вхідний вал встановлен на радіальних підшипниках у кришці корпусу. Центральне колесо з зовнішніми зубцями знаходиться у зачепленні з трьома сателітами, опорами яких є радіальні підшипники. Центральне колесо з внутрішніми зубцями нерухомо закріплено в корпусі. Вихідним валом редуктора є водило, в якому закріплені вісі сателітів. Кількість зубців: центральне колесо з зовнішніми зубцями «а» $Z_a = 21$; сателіти «г» $Z_g = 45$; центральне колесо з внутрішніми зубцями «б» $Z_b = 111$. Модуль зачеплення $m = 5$ мм, ступінь точності виготовлення – Ст. 9-8-7-В, крутний момент на вихідному валу $T = 500$ Н·м, $\omega_a = 157$ с⁻¹. Центральне колесо «а» було виготовлене зі сталі 40 ХН2МА з послідовним азотуванням робочих

поверхонь до твердості HRC 52-56, сателіти – зі сталі 40 X, термооброблені та азотовані. Для виготовлення центрального колеса «b» була застосована сталь 45 поліпшена. Корпус та водило були відлиті з чавуну СЧ 15-32 та ВЧ 60-2 відповідно.

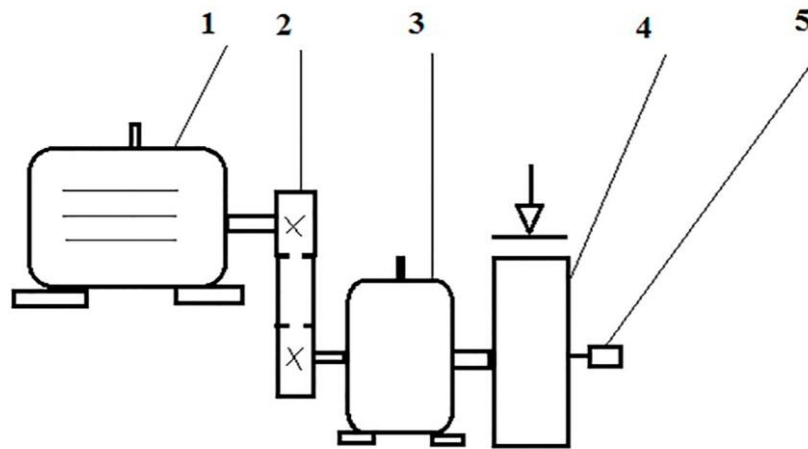


Рисунок 2 – Стенд для випробування планетарного редуктора: 1 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3 – планетарний редуктор; 4 – порошкове гальмо; 5 – струмознімач
Figure 2 – Planetary gearbox test bench: 1 – electric motor; 2 – belt drive; 3 – planetary gearbox; 4 – powder brake; 5 – electric current receiver

Результати експериментального дослідження були отримані у вигляді осцилограм трьох тензорезисторів кожної вісі сателітів (рис. 1). Крива показань n-го датчика j-ої вісі розподілялась на $I = 24$ частини на протязі всього запису. Для обробки отриманих даних був розроблений алгоритм, який був реалізований у вигляді комп'ютерної програми. Спочатку визначалось «П» середнє значення показань усіх датчиків на всіх вісях. Ця величина дорівнює показанням датчиків за умови рівномірного розподілу навантаження між сателітами.

$$P = \frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{n=1}^3 \sum_{i=1}^{24} P_{jni}}{3 \cdot 3 \cdot 24}, \quad (1)$$

де $j = 3$ – кількість сателітів;

$n = 3$ – кількість тензорезисторів на одній вісі;

$i = 24$ – кількість вимірювань на протязі одного кінематичного циклу (кількість положень водила).

Потім знаходилось середнє арифметичне показань трьох датчиків кожної вісі окремо в кожному з 24 положень водила.

$$P_{jni}^n = \frac{\sum_{n=1}^5 P_{jni}}{5} \quad (2)$$

Величину нерівномірності розподілу навантаження для кожного сателіта [2] в усіх положеннях водила можна визначити як відношення

$$\Omega_{ij} = \frac{P_{jni}^n}{P} \quad (3)$$

Як вже зазначалось, в цьому експерименті з метою визначення концентрації навантаження по довжині зубців, на кожную вісь було наклеєно по три пари тензодатчиків на рівній відстані одна від

одної. Це дозволило за допомогою математичної обробки отриманих даних, визначити для кожного зачеплення сателітів з центральним колесом «а» на протязі кінематичного циклу значення концентрації навантаження. Її величина розраховувалась через відношення показань третього резистора до середнього значення концентрації в даному зачепленні в і-му положенні водила.

$$K_{\beta ij} = \frac{2\Pi_{ij}}{\Pi_{ij} + \Pi_{1j}} \quad (4)$$

Результати експериментального дослідження вказують на те, що найбільш навантаженим в цьому редукторі був сателіт під номером $j = 3$. Максимальне значення нерівномірності розподілу навантаження для цього сателіту спостерігалось в положенні водила $i = 12$ і дорівнювало $\Omega_{max} = 1,476$. В цьому ж положенні концентрація навантаження по довжині зубців дорівнювала $K_{h\beta} = 1.431$. Максимальне значення концентрації навантаження по довжині контактних ліній $K_{h\beta} = 1.839$ було зафіксоване в положенні водила $i = 24$. Відповідно величина нерівномірності між сателітами в цьому положенні водила складала $\Omega = 1,249$.

В результаті обробки отриманих даних були визначені 13 максимальних значень ($\Omega > 1$) коефіцієнта нерівномірності розподілу навантаження між сателітами для найбільш навантаженої осі. $\Omega[13] = 1.17, 1.21, 1.25, 1.28, 1.30, 1.34, 1.35, 1.36, 1.38, 1.39, 1.45, 1.47, 1.48$. Для побудови довірчого інтервалу математичного очікування генеральної сукупності максимальних значень коефіцієнтів можна скористатися розподілом Ст'юдента [3]. Цей метод відноситься до параметричних і основною умовою його використання є розподіл вибірових значень за нормальним законом. У нашому випадку, коли статистичні характеристики генеральної сукупності невідомі, то для побудови довірчого інтервалу математичного очікування генеральної сукупності будемо використовувати вибірові значення: вибірове середнє $\bar{X}$ та вибірове стандартне відхилення S . Для з'ясування можливості застосування критерія Ст'юдента була висунута нульова гіпотеза H_0 , що раніше зазначена вибірка значень коефіцієнтів розподілена за нормальним законом. Для перевірки можливості прийняття нульової гіпотези був виконаний тест Шапіро – Уїлка. Тут і далі всі статистичні розрахунки виконувалися в середовищі R [4,5,6].

```
y <- c(1.39,1.45,1.36,1.27,1.34,1.30,1.21,1.35,1.50,1.38,1.28,1.48,1.17);
shapiro.test(y)
Shapiro-Wilk normality test
data: y
W = 0.97597, p-value = 0.9539
```

Отримане значення ймовірності $p = 0.9539$ є більшим за за рівень значущості $\alpha = 0.05$. Тому відхилити нульову гіпотезу не можна, як і не можна стверджувати, що вибірка розподілена за нормальним законом. Тому застосуємо графічний аналіз і побудуємо гістограму густини розподілу випадкових максимальних значень коефіцієнтів.

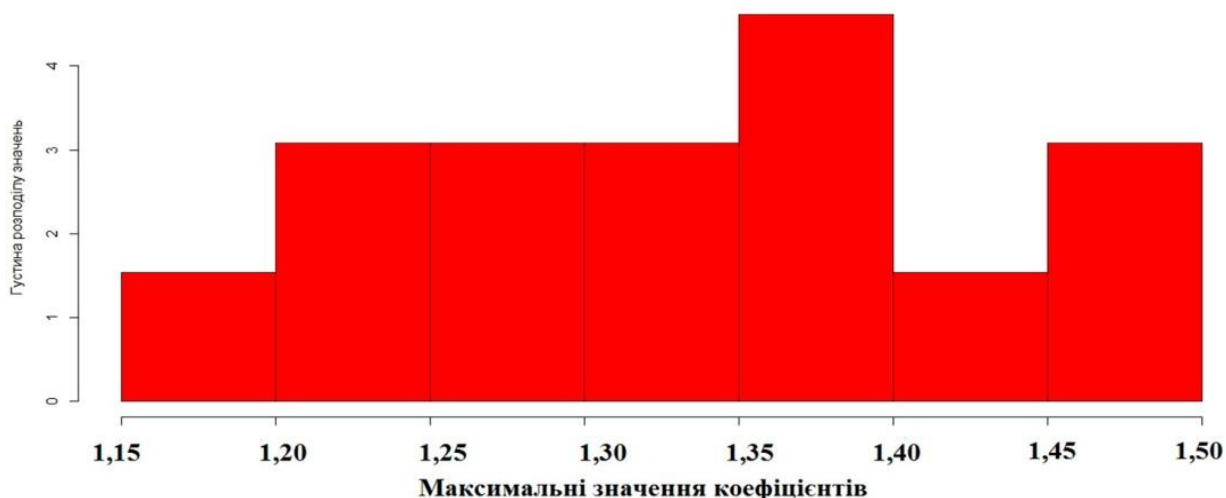


Рисунок 3 – Гістограма розподілу випадкових значень коефіцієнтів Ω
Figure 3 – Histogram of distribution of random values of coefficients Ω

Треба зауважити, що вигляд гістограми не зовсім відповідає графікам розподілу випадкових величин за нормальним законом, а саме: відсутня дзвоноподібна форма, наявність асиметрії. Виходячи з результатів проведених досліджень стверджувати, що ми маємо підтвердження справедливості нульової гіпотези, неможна. Проте, спробуємо визначити довірчий інтервал математичного очікування генеральної сукупності, використовуючи t – критерій Ст'юдента. Для розрахунку нам потрібні значення вибіркової середньої $\bar{X} = 1,34$, вибіркового стандартного відхилення $S = 0,097$, числа ступенів свободи $n = 13$. Критичне значення для $n - 1$ ступенів свободи при рівні значущості $\alpha = 0,05$ знаходимо по таблиці [7] $t_{n-1} = 2.18$. Тоді довірчий інтервал дорівнює

$$\bar{X} - t_{n-1} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{n-1} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

та буде знаходитися в межах $1,2 \leq \mu \leq 1,4$.

Через те, що встановити закон розподілу розглядаємої виборки емпіричних даних не вдалося, коректність отриманого довірчого інтервалу знаходиться під знаком ? Тому другий варіант інтервальної оцінки математичного очікування генеральної сукупності був здійснений непараметричним методом. Такі методи не спираються на будь які теоретичні розподіли. Одним з таких методів, який останнім часом демонструє активний розвиток і застосування для вирішення статистичних задач є метод бутстреп (bootstrap) [8], запропонований Ефроном. Треба зауважити на наявність у автора тонкого почуття гумору. Назва bootstrap означає петлю на черевнику. Якщо ви потрапили у «болото», то для спасіння тягніть себе за бутстреп.

Ідея методу бутстрепа полягає в тому, що методом Монте – Карло з k членів вихідної вибірки згенерувати n нових псевдовиборок по k членів у кожній. При цьому генерування здійснюється з поверненням. Тобто обраний один раз член вибірки, продовжує приймати участь у генеруванні. Через це, у псевдовиборках окремі члени можуть повторюватися декілька разів. Генерація великої кількості псевдовиборок надає можливість визначати статистичні характеристики випадкових процесів, для вивчення яких, з різних причин неможливо повторити експеримент. У нашому випадку з серії, яка складалася з 20 редукторів, був вибраний один редуктор, над яким були проведені експериментальні дослідження. В результаті була отримана вибірка з 13 максимальних значень коефіцієнтів нерівномірності розподілу навантаження між сателітами. З цієї вихідної виборки було вирішено згенерувати 5 псевдовиборок. Визначити їх вибіркові середні значення, які також є випадковими та побудувати довірчий інтервал при довірчому рівні $1 - 0,05 = 0,95$.



Рисунок 4 – Ілюстрація для пояснення походження назви бутстреп
Figure 4 – Illustration to explain the origin of the name bootstrap

Для побудови довірчого інтервалу методом бутстреп була написана спеціальна програма:

```
bt1<-numeric(13); bt2<-numeric(13); bt3<-numeric(13); bt4<-numeric(13); bt5<-numeric(13);
# Резервуємо масиви для зберігання даних.
for(i in 1 : 13)
{bt1[i]=sample(y,size=13,replace=T);bt2[i]=sample(y,size=13,replace=T);bt3[i]=sample(y,size=13,replace=
T);bt4[i]=sample(y,size=13,replace=T);bt5[i]=sample(y,size=13,replace=T)};
```

```
# Генеруємо з поверненням 5 псевдовиборок по 13 членів у кожній.
mean(bt1); mean(bt2); mean(bt3); mean(bt4); mean(bt5);
# Розраховуємо вибіркові середні.
mb<-c(1.296,1.362,1.334,1.359,1.344);
mean(mb);
[1] 1.339
# Визначаємо математичне очікування генеральної сукупності.
quantile(mb,prob<-c(0.025,0.975))
2.5% 97.5%
1.2998 1.3617
# Визначаємо довірчий інтервал математичного очікування при довірчому рівні 0,95.
```

Таблиця 1 – Емпірична та бутстрепівські вибірки
Table 1 – Empirical and bootstrap's samplings

№	Емпірична а вибірка	Бутстрепівськ а №1	Бутстрепівськ а №2	Бутстрепівськ а №3	Бутстрепівськ а №4	Бутстрепівськ а №5
1	1,31	1,38	1.45	1.47	1.38	1.47
2	1,45	1,36	1.47	1.28	1.45	1.30
3	1,36	1,25	1.28	1.34	1.30	1.30
4	1,25	1,34	1.45	1.21	1.25	1.25
5	1,34	1,28	1.25	1.17	1.38	1.45
6	1,30	1,36	1.36	1.30	1.38	1.17
7	1,21	1,21	1.38	1.47	1.39	1.38
8	1,35	1,35	1.17	1.39	1.35	1.35
9	1,47	1,34	1.38	1.34	1.36	1.39
10	1,38	1,25	1.28	1.45	1.38	1.45
11	1,28	1,17	1.38	1.39	1.38	1.36
12	1,48	1,28	1.38	1.17	1.28	1.21
13	1,17	1,28	1.47	1.36	1.39	1.39

Висновки. В результаті виконаних статистичних розрахунків були отримані значення довірчого інтервалу математичного очікування генеральної сукупності максимальних значень коефіцієнту нерівномірності розподілу навантаження між сателітами планетарних редукторів.

Перший варіант інтервалу визначався на підставі розподілу Ст'юдента. При цьому довести, що емпіричні вибіркові значення розподілені за законом Гаусса, нам не вдалося. Це ставить коректність отриманого результату під знак питання.

Другий варіант інтервальної оцінки математичного очікування був розрахований за допомогою використання непараметричного методу бутстреп. Перший варіант довірчого інтервалу є більш широким і складає 15% від вибіркового середнього вихідної виборки. Нижня границя цього інтервалу $\Omega = 1,2$ є досить оптимістичною для редукторів такого ступеня точності і є поки недосяжною для технологічного рівня розглядаемого виробництва. Другий варіант довірчого інтервалу має менший діапазон значень, який складає 5% від вибіркового середнього. Також, слід зазначити, що його як нижнє граничне значення, так і верхнє близькі до результатів інших досліджень.

Таким чином, можна підсумувати, що визначення довірчого інтервалу з використанням t – критерія Ст'юдента для виборок з кількістю членів < 30 дуже суттєво залежить від того наскільки розподіл генеральної сукупності є близьким до нормального. Також, необхідно зауважити на те, що метод бутстреп дозволяє отримати коректну інтервальну оцінку математичного очікування при малій кількості значень у вибірці, а також незалежно від характеру їхнього розподілу.

Звідси, подальшими практичними діями щодо підвищення надійності та довговічності планетарних редукторів повинні стати такі, що призведуть до зменшення математичного очікування коефіцієнта нерівномірності розподілу навантаження між сателітами приблизно на 10%. Це можна здійснити всього двома способами: підвищенням точності виготовлення деталей редуктора та розвитком конструкції, шляхом збільшення піддатливості деяких деталей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1.Тютін В.М., Левківський С.А. Експериментальні дослідження одноступеневого планетарного редуктора. Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2011. – Вип.24. – ч.1. – С. 135 – 139.
2. Планетарные передачи справочник / под ред. В. Н. Кудрявцева и Ю. Н. Кирдяшева. – Л. : Машиностроение, 1977. – 563с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник: М.: Наука, 1969. – 576 с.
- 4.Роберт И. Кабаков R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R/пер. с англ. Полины А. Волковой. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 588 с.
- 5.Маститский С.Э., Шитиков В.К. (2014) Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. – Электронная книга, адрес доступа <http://r-analytics.blogspot.com>
- 6.В.К. Шитиков, С.Э. Маститский (2017) Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R! – 354с. – Электронная книга, адрес доступа: <https://github.com/ranalytics/data-mining>
- 7.Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике – М.: Наука, 1985 – 640 с.
- 8.Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. – Тольятти: Кассандра, 2013. – 314 с.

REFERENCES

- 1.Tiutin V.M., levkivsky S.A. (2011) Experimentalni doslidzennya odnostupenevogo planetarnogo reduktora. [An experimental study of a single stage planetary gearbox]. Visnyk Natsionalnogo tranaportnogo universiteta. Visnyk of National Transport University, 24, part 1, 135-139 [in Ukrainian].
- 2.Planetarnye peredachi spravochnik/pod red. V.N. Kudryavtseva, Yu.N. Kirdyasheva. (1977) [Planetary gears reference book], 563 [in Russian].
- 3.Venttsel E.S. (1969) Teoriya veroyatnostey: uchebnik. [Theory of probability: textbook], 578 [in Russian].
- 4.Robert I. Kabakoff (2014) R v deystvii. Analiz i vizualizatsiya dannyh v programme R. [R in Action. Data Analysis and graphics with R], 588 [in Russian].
- 5.Mastitsky S.E., Shitikov V.K. (2014) Statisticheskii analiz i vizualizatsiya dannyh s pomoshyu R. [Statistical analysis and graphics with using R], 400, [electronic resource]. Retrieved from: <http://r-analytics.blogspot.com>. [in Russian].
- 6.V.K. Shitikov, S.E. Mastitsky (2017) Klassifikatsiya, regressiya i drugie algoritmy Data Mining s ispolzovaniem R. [Classification, regression and other algorithms of Data Mining with using R], 354, [electronic resource]. Retrieved from: <https://github.com/ranalytics/data-mining>. [in Russian].
- 7.Koroluk V.S., Portenko M.I., Skorohod A.V., Turbin A.F. (1985) Spravochnik po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statiatike. [Theory of probability and math statistics reference book], 640, [in Russian].
- 8.Shitikov V.K., G.S. Rosenberg (2013) Randomizatsiya i butstrep: statisticheskii analiz v biologii i ekologii s ispolzovaniem R. [Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology with using R], 314, [in Russian].

РЕФЕРАТ

Тютін В.М. Статистичний аналіз результатів експериментального дослідження планетарного редуктора з використанням методу бутстреп / В.М. Тютін, В.В. Мороз, С.А. Левківський // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 1 (51).

В роботі розглядається питання підвищення надійності та довговічності планетарних редукторів.

Визначається показник, який можна використати в якості комплексної характеристики цих параметрів. В якості такого показника пропонується прийняти коефіцієнт нерівномірності розподілу навантаження між сателітами Ω .

Об'єкт дослідження – одноступеневий планетарний редуктор.

Мета дослідження полягає в встановленні експериментальним шляхом довірчого інтервалу математичного очікування максимальних значень коефіцієнта нерівномірності розподілу навантаження між сателітами для партії планетарних редукторів за результатами випробування одного зразка.

В роботі наведена методика експериментального дослідження. Тензодатчики були наклеєні на вісі сателітів, що дозволило спростити процес струмозйому. Використання на кожній вісі трьох пар резисторів надало можливість також отримати інформацію про характер розподілу навантаження по довжині зубців. Для визначення довірчого інтервалу математичного очікування максимальних значень коефіцієнту нерівномірності розподілу навантаження між сателітами використовувався t – критерій Ст'юдента та метод бутстреп.

В результаті тестування вихідної вибірки не вдалося довести, що її члени розподілені за нормальним законом, що в свою чергу, є головною умовою успішного використання t -критерія. Отриманий цим методом довірчий інтервал мав завищений діапазон, граничні значення якого не відповідали результатам інших спостережень. Довірчий інтервал математичного очікування розрахований методом бутстреп мав менший діапазон і його граничні значення співпадали з результатами інших досліджень. Таким чином, можна стверджувати, що непараметричний метод бутстреп дозволяє отримувати статистичні результати, які добре погоджуються з реальним процесом, при малій кількості членів вихідної вибірки незалежно від закону їхнього розподілу.

Проведені дослідження дозволили визначити основні напрямки підвищення технічного рівня планетарних редукторів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПЛАНЕТАРНИЙ РЕДУКТОР, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, КОЕФІЦІЄНТ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ САТЕЛІТАМИ, КРИТЕРІЙ СТУДЕНТА, ДОВІРЧИЙ ІНТЕРВАЛ, БУТСТРЕП

ABSTRACT

Tiutin V.M., Moroz V.V., Levkivsky S.A. Statistical analysis of the results of an experimental study of a planetary gearbox using the bootstrap. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 1 (51).

The article considers the issue of increasing the reliability and durability of planetary gearboxes. The indicator which can be used as the complex characteristic of these parameters is defined. As such an indicator, it is proposed to take the coefficient of uneven load distribution between satellites Ω .

The object of research is a single-stage planetary gearbox.

The purpose of the study is to establish experimentally the confidence interval of the mathematical expectation of the maximum values of the coefficient of non-uniformity of the load distribution between the satellites for the batch of planetary gearboxes based on the test results of one sample.

The method of experimental research is given in the work. The strain gauges were glued to the axis of the satellites, which simplified the process of current collection. The use of three pairs of resistors on each axis also made it possible to obtain information on the nature of the load distribution along the length of the teeth. Student's t -test and bootstrap method were used to determine the confidence interval of the mathematical expectation of the maximum values of the coefficient of uneven load distribution between satellites.

As a result of testing the original sample, it was not possible to prove that its members are distributed according to the normal law, which, in turn, is the main condition for the successful use of the t -test. The confidence interval obtained by this method had an inflated range, the limit values of which did not correspond to the results of other observations. The confidence interval of the mathematical expectation calculated by the bootstrap method had a smaller range and its limit values coincided with the results of other studies. Thus, it can be argued that the nonparametric bootstrap method allows to obtain statistical results that agree well with the real process, with a small number of members of the original sample, regardless of the law of their distribution.

The conducted researches allowed to define the basic directions of increase of technical level of planetary gearboxes.

KEY WORDS: PLANETARY REDUCER, EXPERIMENTAL RESEARCH, COEFFICIENT OF UNEVEN LOAD DISTRIBUTION BETWEEN SATELLITES, STUDENT CRITERION, CONFIDENCE INTERVAL, BOOTSTRAP

АВТОРИ:

Тютін Віктор Миколайович, Національний транспортний університет, старший викладач кафедри «Дорожні машини», e-mail: zelentechbud@gmail.com, тел. +380442809773, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленко 1, к. 226, orcid.org/0000-0003-1954-5003.

Мороз Валентин Валентинович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри «Дорожні машини», e-mail: frostvaliko@gmail.com, тел. +380442809773, Україна, 01010, м. Київ, вул. М.Омеляновича-Павленка, 1, к. 226, orcid.org/0000-0003-3000-4961.

Левківський Сергій Анатолійович, Національний транспортний університет, старший викладач кафедри «Дорожні машини», e-mail: s.a.levkovsky@gmail.com, тел. +380442809773, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленко 1, к. 226, orcid.org/0000-0003-1515-4240.

AUTHOR:

Tiutin Victor M. National Transport University, Senior Lecturer of Department of Road Machines, e-mail: zelentechbud@gmail.com, тел. +380442809773, Ukraine, 01010, Kyiv, M.Omelyanovych-Pavlenko str., 1, of. 226, orcid.org/0000-0003-1954-5003.

Moroz Valentyn V. Ph.D., associate professor, National Transport University, associate professor of Department of Road Machines, e-mail: frostvaliko@gmail.com, тел. +380442809773, Ukraine, 01010, Kyiv, M.Omelyanovych-Pavlenko str., 1, of. 226, orcid.org/0000-0003-3000-4961.

Levkivsky Sergii A. National Transport University, Senior Lecturer of Department of Road Machines, e-mail: zelentechbud@gmail.com, тел. +380442809773, Ukraine, 01010, Kyiv, M.Omelyanovych-Pavlenko str., 1, of. 226, orcid.org/0000-0003-1515-4240.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Сапронова С.Ю., доктор технічних наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, професор кафедри Вагони та вагонне господарство, Київ, Україна.

Посвятенко Е.К., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри Виробництва, ремонту та матеріалознавства, Київ, Україна.

REVIEWER:

Sapronova S.Yu., Doctor of Technical Science, Professor, State University of Infrastructure and Technology, Professor, Department of Wagons and wagon economy, Kyiv, Ukraine.

Posviatenko E.K., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Professor, Department of Production, Repair and Materials Science, Kyiv, Ukraine.