

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра металорізальних верстатів та систем

Дослідження і випробування машин та обладнання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Освітня програма – «Галузеве машинобудування»
Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»
Галузь знань – 13 «Механічна інженерія»

Затверджено на засіданні кафедри
металорізальних верстатів та систем
Протокол № 8 від «05» лютого 2024 р.

Кропивницький 2024

Дослідження і випробування машин та обладнання. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів вищої освіти спеціальності «Галузеве машинобудування» / Укл.: А.І. Гречка, І.А. Валявський, К.К. Щербина, М.Л. Рудич – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – 30 с.

Укладачі: к.т.н. А.І. Гречка,
к.т.н. І.А. Валявський,
к.т.н. К.К. Щербина,
М.Л. Рудич

Рецензент: М.О. Годунко – к.т.н., доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки.

© Центральноукраїнський національний технічний університет
© Гречка А.І., Валявський І.А., Щербина К.К., Рудич М.Л.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ПРОПОРЦІЙНОСТІ МІЖ КОНТАКТНИМИ ТИСКАМИ ТА ДЕФОРМАЦІЯМИ У ПІНОЛЬНОМУ МЕХАНІЗМІ

Мета роботи: встановлення експериментальним шляхом величини коефіцієнта пропорційності між контактними тисками та деформаціями для прийнятої математичної моделі жорсткості пінольного механізму.

Завдання: розробити план проведення експерименту, провести натурні експериментальні дослідження, здійснити статистичну обробку отриманих даних, визначити величину коефіцієнта пропорційності між контактними тисками та деформаціями.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для проведення розрахунків по визначенню контактних деформацій найбільш широко використовують емпіричні залежності між контактними тисками та контактними деформаціями. Суть їх використання полягає в апроксимації залежністю встановленого виду набору даних, взятих з проведених дослідів та визначення параметрів згаданої залежності відносно умов проведення дослідів. Найбільш широко розкритою та дослідженою для даного випадку є степенева залежність, що має вид:

$$\delta = cr^m,$$

де δ – контактна деформація,

r – контактний тиск,

c і m – коефіцієнт пропорційності та показник степені, що визначаються конкретними умовами.

Для криволінійної поверхні контакту, якою і є циліндрична, найбільш розповсюджена форма пінолі, використання лінійної залежності при $m = 1$ не є доцільним через низьку точність. Результати, отримані при застосуванні показника степені $m = 0,5$ чи $m = 0,33$, мало чим відрізняються один від одного. Це пояснюється тим, що більш точне значення показника якраз знаходиться в діапазоні від 0,33 до 0,5. Однак у більшості випадків все ж

застосовують показник $m = 0,5$, оскільки у такому разі подальші математичні викладки стають простішими.

При проведенні експериментальних досліджень пропонується використати імітаційний підхід у фізичному моделюванні, що дозволить врахувати силові фактори, які діють на пінольний механізм з боку довільно прийнятого процесу обробки та з боку привода подачі незалежно від використаного у ньому типу перетворювального механізму, замінивши їх еквівалентним навантаженням. Лабораторна робота проводиться на експериментальному стенді, зовнішній вигляд і схема якого зображені на рис. 1.1. На платформі 1, що має форму двотавра, закріплено корпус 2 з точним циліндричним отвором. Діаметр даного отвору прийнято рівним 55 мм. Відстань від стінки отвору до зовнішньої стінки корпусу приймаємо рівною діаметру отвору для усунення “габаритного” ефекту. Таким чином, у поперечному перерізі корпусна деталь має форму квадрата із стороною 165 мм. Довжина корпусу 2 становить 200 мм, що знаходиться в межах прийнятих на практиці розмірів.

В циліндричному отворі корпусу 2 розміщено сталевий суцільний циліндр 3, що імітує контакт пінолі з напрямними, в ролі яких виступає точний отвір корпусу. Довжина імітуючого циліндра більша за довжину корпусу 2 для забезпечення можливості вимірювань похибок відхилення циліндра відносно корпусу.

Для цього на корпусі закріплюються кронштейни з важелями 4, кожний з яких має по два гострих виступи. Один з виступів контактує з циліндром 3, інший – з ніжкою індикатора 5, що на відповідному кронштейні кріпиться до корпусу 2. Таким чином, індикатори 5 показують лише величину переміщення імітуючого циліндра 4 відносно корпусу 2, фіксуючи тим самим похибки положення першого відносно другого. Розташовуються кронштейни з важелями 4 та вимірювальні індикатори 5 по два на кожному з поперечних торців корпусу 2. Відстань від точки дотику виступу на важелі до торця складає 10 мм. Згадані точки дотику знаходяться на взаємоперпендикулярних осях, що проходять через центральну вісь точного отвору корпусу. Таким чином, біля кожного торця вимірюється переміщення імітуючого циліндра по двом взаємоперпендикулярним координатам.

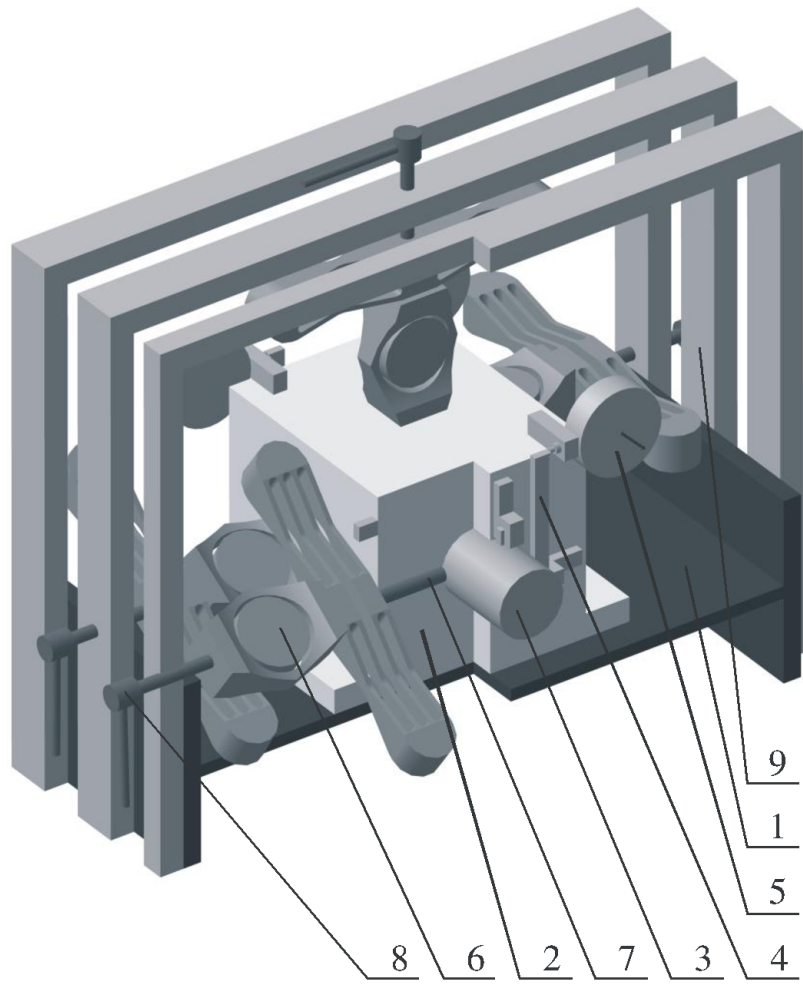
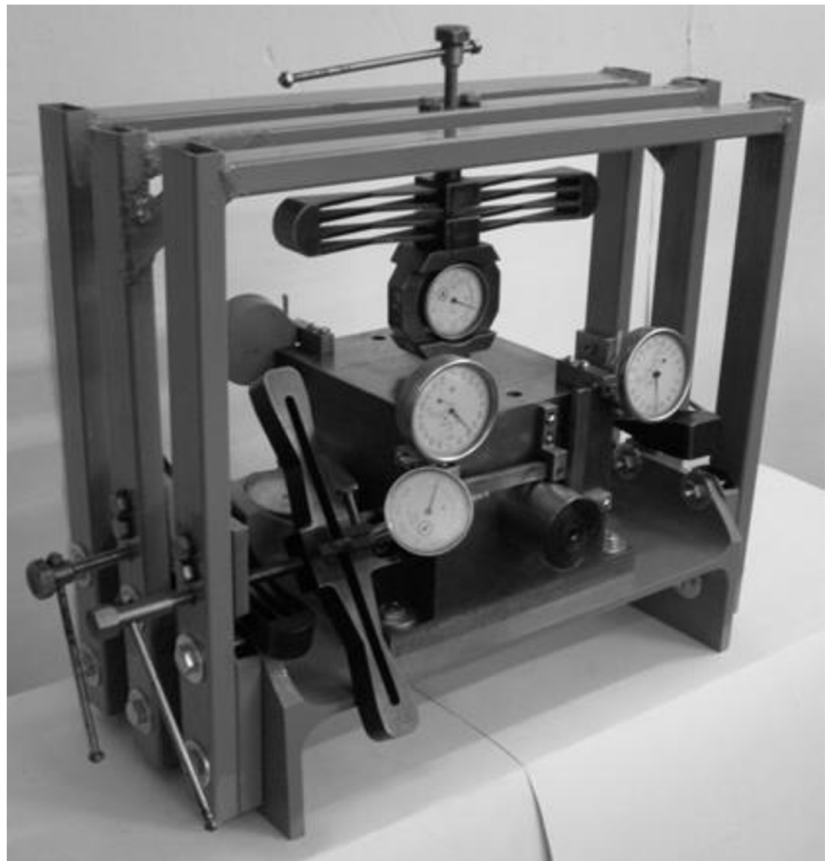


Рис. 1.1. Экспериментальный стенд

Точки проєкцій вершин виступів на вісь важеля 4 утворюють з віссю його отвору відрізки у співвідношенні один до десяти. Це дозволяє збільшити у відповідній пропорції точність вимірювання переміщень циліндра 3 в межах зазору і контактних деформацій.

Імітація дії силових факторів на контактуючі деталі здійснюється за допомогою динамометрів стиснення 6. Для забезпечення дії сил на циліндр 3 в корпусі 2 зроблено ряд допоміжних отворів у двох перпендикулярних площинах, що проходять через вісь точного отвору, що імітує напрямні. Динамометр 6 через стержень 7 діє на циліндр 3. Контактуючий торець даного стержня виготовлено з великим радіусом сферичності. Стержні 7 розміщуються у допоміжних отворах корпусу з надмалим зазором для забезпечення сталості точки прикладання сили.

Стиснення динамометра 6 відбувається гвинтом 8, що викручується з різьбового отвору у рамі 9, яка жорстко кріпиться до платформи 1. Розташування різьбових отворів у рамі забезпечує співвісність гвинтів 8 і стержнів 7. Рами 9 розташовуються у площинах, перпендикулярних до осі точного отвору корпусу. Відстані між нормальними до осі точного отвору корпусу площинами розташування різьбових отворів на рамах 9 складають 80 мм, тобто плече прикладаємого моменту буде складати 160 мм. Жорсткість всього експериментального стенду достатня для того, щоб деформації рам при проведенні навантаження та їх вплив на зміну схеми навантаження внаслідок малості величин виникаючих похибок не враховувати.

Методика експериментального визначення коефіцієнта пропорційності ступеневої залежності між контактними тисками і деформаціями розпочинається із встановлення виду необхідного навантаження (перший етап). Упускаючи детальний аналіз, для даної практичної роботи приймається, що зовнішнім силовим фактором у дослідженні виступатиме центральне по довжині отвору корпусу прикладення сили, при якому теоретично момент відсутній.

На другому етапі встановлюється кількість рівнів варіювання та величина прикладеної сили. Лінійна характеристика залежності між силою стискання динамометрів, що використані в експериментальному стенді, та величиною стискання розповсюджується на проміжку від 0 до 3000 Н. Достеменно невідомо, чи залежить значення коефіцієнту пропорційності ступеневої залежності між контактними тисками і деформаціями від величини прикладеної сили у випадку застосування саме такого виду

залежності. Таким чином, існує необхідність аналізу контактної деформації досліджуваних тіл при широкому діапазоні величин навантажуючої сили.

Важливим аспектом при встановленні кількості рівнів варіювання сили є те, що в ході експерименту не визначається характер залежності між контактними тисками і деформаціями, а встановлюються параметри прийнятої наперед залежності. Величина на вході – прикладена сила, на виході – відповідне їй зафіксоване значення відхилення імітуючого циліндра від початкового положення. Початковим у даному випадку встановлюємо положення циліндра при відсутності навантаження. Відповідно величина прикладеної сили на першому рівні варіювання становитиме нуль.

Для зручності обробки експериментальних даних приймається, що вихідним параметром при проведенні даного експерименту буде приріст похибки положення імітуючого циліндра, визначений між двома сусідніми рівнями варіювання сили. Зважаючи на складність забезпечення сталості положення імітуючого циліндра при нульовому значенні сили, кількість рівнів варіювання сили слід збільшити на один. Величина сили на другому рівні повинна забезпечити надійний контакт імітуючого циліндра з отвором корпусу. Для цього необхідно проводити пробні дослідження. Остаточна кількість рівнів варіювання у даному випадку визначиться після аналізу теоретичних залежностей.

Третій етап методики – проведення експерименту. План його реалізації описаний у ході виконання лабораторної роботи. Результатом етапу є значення вихідного параметру, отриманого при прикладенні сили по середині довжини отвору корпусу на прийнятих рівнях варіювання за декілька повторів.

Четвертим етапом методики являється перевірка експериментальних даних на відсутність грубих промахів та однорідність дисперсій. Вихідний параметр позначимо h , кількість повторних дослідів – n . Середнє значення вихідного параметру:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}, \quad (1.1)$$

де i – номер повторного дослідження.

Дисперсія експериментальних даних для кожного приросту змінюваного силового фактору:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}, \quad (1.2)$$

де $(n-1)$ – число степенів вільності.

Для виявлення хибних експериментальних результатів використовується критерій виникнення максимальної похибки β . Спочатку визначається середнє квадратичне відхилення:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}. \quad (1.3)$$

Потім розраховується критерій β для максимального h_{\max} та мінімального h_{\min} значень вихідного параметру:

$$\beta_{\max} = \frac{h_{\max} - \bar{h}}{s \sqrt{\frac{n-1}{n}}}; \quad \beta_{\min} = \frac{\bar{h} - h_{\min}}{s \sqrt{\frac{n-1}{n}}}. \quad (1.4)$$

Обчислені значення критеріїв β_{\max} та β_{\min} порівнюються з табличним. У випадку, коли розраховані значення перевищують табличні, відповідний дослід з подальших розрахунків виключають та повторюють обчислення середнього значення, дисперсії, середнього квадратичного відхилення та критеріїв виникнення максимальної похибки при зменшеній кількості повторних дослідів.

На наступному кроці перевіряється однорідність дисперсій. При рівній кількості повторних дослідів для кожного приросту змінюваного силового фактору можна застосовувати критерій Кохрена:

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2}, \quad (1.5)$$

де s_{\max}^2 – максимальна дисперсія,

N – загальна кількість дослідів по рівням варіювання сили P ,

j – номер приростів сили P між рівнями варіювання, по яким фіксуються прирости h .

У випадку нерівної кількості повторних дослідів, коли деякі дослідів можуть бути виключені з подальших розрахунків, необхідно використати критерій χ^2 Бартлета. Для цього розраховується дисперсія відтворюваності:

$$s_{\text{відтв}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N f_j s_j^2}{\sum_{j=1}^N f_j}, \quad (1.6)$$

де f - число степенів вільності.

Після цього розраховують безпосередньо критерій χ^2 Бартлета:

$$\chi^2 = \frac{\lg s_{\text{відтв}}^2 \sum_{j=1}^N f_j - \sum_{j=1}^N f_j \lg s_j^2}{0.4343 \left(1 + \frac{1}{3(N-1)} \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j} - \frac{1}{\sum_{j=1}^N f_j} \right) \right)}. \quad (1.7)$$

Дисперсії для кожного приросту змінюваного силового фактору будуть однорідними тоді, коли розраховані значення критеріїв Кохрена чи Бартлета не перевищуватимуть табличних значень.

У випадку рівної кількості повторних дослідів дисперсія відтворюваності розраховується наступним чином:

$$s_{\text{відтв}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} (h_{ji} - \bar{h}_j)^2}{N(n_j - 1)}. \quad (1.8)$$

П'ятим етапом даної методики є розрахунок коефіцієнта пропорційності степеневій залежності між контактними тисками і деформаціями на основі експериментальних даних. Очевидно, що за дії лише однієї сили P , прикладеної по центру активної ділянки напрямних, кути нахилу осі пінолі будуть рівними нулю. Нулеві також буде рівним і переміщення у напрямку, перпендикулярному лінії дії прикладеної сили. Необхідне рівняння має вид:

$$P = \frac{2r\Delta^2 L}{c^2} \left(\left(\frac{2}{3} \left(\frac{\lambda + \Delta}{\Delta} \right)^2 + \frac{1}{3} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{\lambda + \Delta} \right)^2} - \left(\frac{\lambda + \Delta}{\Delta} \right) \arccos \left(\frac{\Delta}{\lambda + \Delta} \right) \right), \quad (1.9)$$

де λ – деформація напрямних по напрямку дії сили P .

З необхідної інформації про величину деформації λ відома лише частина, що показує її збільшення при підвищенні прикладеної сили на рівнях варіювання вище другого. На кожному з таких рівнів приріст

деформації відповідно до вищеприйнятого позначаємо \bar{h}_k . Недостатню інформацію позначаємо h_0 .

Таким чином, рівняння (1.9) набуває вигляду:

$$P_m = \frac{2r\Delta^2 L}{c^2} \left(\left(\frac{2}{3} \left(\frac{h_0 + \sum \bar{h}_k + \Delta}{\Delta} \right)^2 + \frac{1}{3} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{h_0 + \sum \bar{h}_k + \Delta} \right)^2} - \left(\frac{h_0 + \sum \bar{h}_k + \Delta}{\Delta} \right) \arccos \left(\frac{\Delta}{h_0 + \sum \bar{h}_k + \Delta} \right) \right). \quad (1.10)$$

Оскільки невідомими являються дві величини: c та h_0 , то рівнянь (1.10) повинно бути також два. Таким чином, кількість рівнів варіювання прикладеної сили повинно становити чотири. Необхідно розв'язати систему, в яку входять рівняння з прийнятими рівнями варіювання навантажуючої сили P_3 та P_4 і приростами деформацій $h_0 + \bar{h}_1$ у першому рівнянні та $h_0 + \bar{h}_1 + \bar{h}_2$ у другому (\bar{h}_1 – приріст деформацій при зростанні сили від другого P_2 до третього рівня P_3 , \bar{h}_2 – від третього P_3 до четвертого рівня P_4):

$$\left. \begin{aligned} P_3 &= \frac{2r\Delta^2 L}{c^2} \left(\left(\frac{2}{3} \left(\frac{h_0 + \bar{h}_1 + \Delta}{\Delta} \right)^2 + \frac{1}{3} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{h_0 + \bar{h}_1 + \Delta} \right)^2} - \left(\frac{h_0 + \bar{h}_1 + \Delta}{\Delta} \right) \arccos \left(\frac{\Delta}{h_0 + \bar{h}_1 + \Delta} \right) \right); \\ P_4 &= \frac{2r\Delta^2 L}{c^2} \left(\left(\frac{2}{3} \left(\frac{h_0 + \bar{h}_1 + \bar{h}_2 + \Delta}{\Delta} \right)^2 + \frac{1}{3} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{h_0 + \bar{h}_1 + \bar{h}_2 + \Delta} \right)^2} - \left(\frac{h_0 + \bar{h}_1 + \bar{h}_2 + \Delta}{\Delta} \right) \arccos \left(\frac{\Delta}{h_0 + \bar{h}_1 + \bar{h}_2 + \Delta} \right) \right). \end{aligned} \right\} (1.11)$$

Розв'язавши систему рівнянь (1.11), знаходимо значення коефіцієнта c та деформації h_0 .

Завершальним етапом методики є встановлення адекватності прийнятої степеневі залежності між контактними тисками і деформаціями при розрахованих параметрах. Для цього розраховуються прирости деформацій при відповідних рівнях навантажуючої сили при відомих значеннях c та h_0 . З

першого рівняння системи (1.11) знаходиться приріст деформації \hat{h}_1 . Вважаючи тепер дану величину відомою, з другого рівняння системи (1.11) знаходиться приріст деформації \hat{h}_2 .

Дисперсія адекватності:

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N n_j \left(\bar{h}_j - \hat{h}_j \right)^2}{N - p}, \quad (1.12)$$

де p – кількість вихідних параметрів.

Після обчислення дисперсії адекватності розраховується критерій Фішера, прийнявши за дисперсію експерименту дисперсію відтворюваності за формулою (1.8):

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\text{відтв}}^2}. \quad (1.13)$$

Степеневу залежність між контактними тисками і деформаціями при розрахованому коефіцієнті пропорційності можна вважати адекватною у тому випадку, коли розраховане значення критерію Фішера не перевищуватиме його табличного значення. В протилежному випадку необхідно звужувати діапазон варіювання навантажуючої сили, зменшуючи максимальне значення.

ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Підготувати експериментальний стенд. Забезпечити рухомість циліндру 3 у отворі корпусу 2. У верхній боковий отвір корпусу вставити стержень 7. Перевірити його рухомість у отворі. На кінець даного стержня встановити динамометр 6, з іншої сторони до нього підвести кінець гвинта 8 та легко притиснути. З обох торців корпусу встановити кронштейни з важелями 4, з тим розрахунком, щоб вони забезпечували вимірювання переміщення циліндру 3 у вертикальній площині. Індикатори 5 з точністю вимірювання 0,001 мм підвести до важелів 4 таким чином, щоб залишався запас руху стрілки індикатора. Індикатори закріпити гвинтами.

2. Встановити величину сили на другому, третьому та четвертому рівнях варіювання. Ознайомитися з навантажувальною характеристикою динамометра 6, визначити відповідні до прийнятих величин сили показання індикатора динамометра.

3. Провести навантаження центрально прикладеною по довжині корпусу силою циліндра 3 по прийнятим рівням варіювання сили P , послідовно, від другого до четвертого. Записати показники обох індикаторів 5 відповідно на кожному рівні сили. Розвантажити динамометр повністю.

4. Провернути циліндр 3 навколо своєї центральної осі на 90° . Повторити п. 3 ще 7 разів, щоразу повертаючи циліндр після розвантаження динамометра. За необхідності скористатися даними з додатку А.

5. Провести розрахунки величини h .

6. Провести розрахунки за формулами (1.1) – (1.8). Табличні значення необхідних критеріїв взяти з довідників.

7. Визначити величини c та h_0 , розв'язавши систему рівнянь (1.11). Рекомендується використати систему MathCAD.

8. Перевірити адекватність прийнятої степеневі залежності за формулами (1.12), (1.13). Табличне значення критерію Фішера взяти з довідників. Зробити необхідні висновки.

Контрольні запитання.

1. Що таке контактні деформації і в чому їх відмінність від інших видів деформацій?

2. У чому полягає “габаритний” ефект контактних деформацій?

3. Опишіть методику експериментального визначення коефіцієнта пропорційності степеневі залежності між контактними тисками і деформаціями.

4. Що таке дисперсія даних?

5. Як розраховується критерій β ?

6. Для чого перевіряється однорідність дисперсій?

7. Як розраховується G критерій Кохрена?

8. Як розраховується χ^2 критерій Бартлета?

9. Що таке дисперсія відтворюваності?

10. Що таке дисперсія адекватності?

11. Що являє собою F критерій Фішера?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

ПІДТВЕРДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЖОРСТКОСТІ ПІНОЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ

Мета роботи: порівняння даних, отриманих експериментально та за допомогою математичної моделі жорсткості пінольного механізму при різноманітному навантаженні пінолі.

Завдання: за визначеним в практичній роботі № 1 значенні коефіцієнта пропорційності між контактними тисками та деформаціями по наданій математичній моделі жорсткості пінольного механізму розрахувати похибки положення пінолі та порівняти їх за однакового силового впливу на піноль з експериментальними даними.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Стверджувати, що підтверджена адекватність степеневій залежності між контактними тисками і деформаціями автоматично означає і адекватність всієї математичної моделі, не можна. В першу чергу тому, що при встановленні параметрів даної залежності не враховувалася дія крутних моментів. Наведена в практичній роботі № 1 методика розроблена таким чином, щоб отримана величина коефіцієнта пропорційності степеневій залежності містила якомога меншу змішану оцінку впливу деформації згину. В реальних задачах вплив згинаючих моментів великий, тому необхідно визначити, в якій мірі деформація згину спотворює картину контактних деформацій.

Методика даного експерименту розпочинається з визначення виду навантаження (перший етап). Задача проведення експерименту полягає у встановленні зміни похибок положення імітуючого циліндра при дії на нього комбінації сил і моментів з різним розташуванням у просторі. Момент в експериментальному стенді створюється дією двох сил з плечем, симетрично розташованим відносно середини довжини отвору корпусу.

Другий етап – встановлення кількості рівнів варіювання та величин прикладених силових факторів. Рівні варіювання сил у кожній точці їх прикладення приймаються аналогічними випадку встановлення величини коефіцієнта пропорційності між контактними тисками та деформаціями.

Значного скорочення експерименту можна досягти, зваживши на симетричність силового навантаження. Якщо зафіксувати положення одного з силових факторів у просторі, то зміною іншого можна досягти будь-яке поєднання їх взаємного розташування. Простіше зафіксувати положення згинаючого моменту, а змінювати розташування сили, при цьому діапазон такої зміни достатньо обмежити одним квадрантом. Центральна прикладена сила у такому випадку визначатиметься з геометричною суми двох взаємоперпендикулярних сил.

Безпосереднє проведення експерименту є третім етапом методики. План його реалізації описаний у ході виконання лабораторної роботи. Фіксація значень чотирьох параметрів просторового положення імітуючого циліндра здійснюється за допомогою чотирьох індикаторів переміщень. Однак, якщо взаємодія силових факторів відбувається в одній площині, то показання індикаторів, що вимірюють переміщення імітуючого циліндра в іншій площині, не враховуються. Відповідно степені вільності будуть різними. Таким чином, обробку експериментальних даних на четвертому етапі проводимо по формулам (1.1) – (1.8) з минулої практичної роботи для показань кожного індикатора окремо.

На п'ятому етапі здійснюється розрахунок похибок положення імітуючого циліндра, що прогнозується математичною моделлю при однаковому з експериментальним силовому навантаженні. Спрощена математична модель, що враховує відсутність моменту навколо горизонтальної осі X та відповідно повороту осі пінолі навколо даної осі, має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \int_{-L/2}^{L/2} q(z) \cdot \frac{\lambda_x + \gamma_y z}{\sqrt{(\lambda_x + \gamma_y z)^2 + \lambda_y^2}} dz; \\ P_y &= \int_{-L/2}^{L/2} q(z) \cdot \frac{\lambda_y}{\sqrt{(\lambda_x + \gamma_y z)^2 + \lambda_y^2}} dz; \\ M_y &= \int_{-L/2}^{L/2} q(z) \cdot z \cdot \frac{\lambda_x + \gamma_y z}{\sqrt{(\lambda_x + \gamma_y z)^2 + \lambda_y^2}} dz; \end{aligned} \right\} (2.1)$$

$$\text{де } q(z) = \frac{4r\Delta^2}{3c^2} \left(\frac{\delta(z) + \Delta}{\Delta} \right)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{\delta(z) + \Delta} \right)^2} + \frac{2r\Delta^2}{3c^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{\delta(z) + \Delta} \right)^2} -$$

$$- \frac{2r\Delta^2}{c^2} \left(\frac{\delta(z) + \Delta}{\Delta} \right) \arccos \left(\frac{\Delta}{\delta(z) + \Delta} \right),$$

$$\delta(z) = \begin{cases} \sqrt{(\lambda_x + \gamma_y z)^2 + \lambda_y^2} - \Delta, & \text{якщо } \sqrt{(\lambda_x + \gamma_y z)^2 + \lambda_y^2} - \Delta > 0 \\ 0, & \text{якщо } \sqrt{(\lambda_x + \gamma_y z)^2 + \lambda_y^2} - \Delta < 0 \end{cases},$$

λ_x – зміщення осі пінолі по осі X у початковому перерізі;

γ_y – кут нахилу осі пінолі навколо осі Y ;

λ_y – зміщення осі пінолі по осі Y у початковому перерізі;

P_X, P_Y – прикладені сили вздовж осей X та Y відповідно;

M_Y – прикладений момент навколо осі Y .

Прогнозовані похибки положення імітуючого циліндра необхідно привести до параметрів, співставних з експериментальними. Точка вимірювання переміщення індикатором відстоїть від середини довжини отвору корпусу на величину t (у даному експериментальному стенді $t = 110$ мм). Враховуючи напрямок дії силових факторів при проведенні експерименту та прийняту систему відліку похибок положення, перевідні залежності мають вид:

$$\left. \begin{aligned} \hat{h}_1 &= \lambda_y; \\ \hat{h}_2 &= \lambda_x - \gamma_y \cdot t; \\ \hat{h}_3 &= \lambda_y; \\ \hat{h}_4 &= \lambda_x + \gamma_y \cdot t, \end{aligned} \right\}$$

де \hat{h}_j – прогнозоване показання j -го вимірювального індикатора.

Знаючи експериментальні дані та відповідні їм прогнозовані математичною моделлю величини, проводиться на шостому етапі розрахунок дисперсій адекватності та критеріїв Фішера за формулами (1.12) і (1.13) відповідно і робляться висновки. У випадку неадекватності звужуються діапазони варіювання силових факторів.

ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Підготувати експериментальний стенд. Забезпечити рухомість циліндру 3 у отворі корпусу 2. У бокові отвори корпусу вставити стержні 7. Перевірити їх рухомість у отворах. На кінці даних стержнів встановити динамометри 6, з іншої сторони до них підвести кінці гвинтів 8 та легко притиснути. З обох торців корпусу встановити чотири кронштейни з важелями 4. Індикатори 5 з точністю вимірювання 0,001 мм підвести до важелів 4 таким чином, щоб залишався запас руху стрілки індикатора. Індикатори закріпити гвинтами.

2. Встановити величину сили, що буде прикладатися гвинтами 8, на другому, третьому та четвертому рівнях варіювання. Ознайомитися з навантажувальними характеристиками динамометрів 6, визначити відповідні до прийнятих величин сили показання індикаторів динамометрів.

3. Навантажуємо імітуючий циліндр вертикальною складовою сили до необхідного рівня.

4. Навантажуємо імітуючий циліндр горизонтальною складовою сили до необхідного рівня, контролюючи при цьому показання динамометра для вертикальної сили.

5. Для контролю записуємо показання індикаторів переміщення імітуючого циліндра при відсутності моменту, тобто на першому рівні варіювання.

6. Навантажуємо циліндр моментом відповідно до другого і наступних рівнів варіювання. Спочатку прикладаємо навантаження на динамометрі із сторони горизонтальної сили, а потім з протилежної сторони. При цьому контролюємо показання динамометрів на складових центрально прикладеної сили і при необхідності проводимо коригування навантаження.

7. Показання індикаторів переміщення фіксуємо на кожному рівні варіювання моменту.

8. Після досягнення максимального значення моменту розвантажуюємо динамометри у зворотному порядку прикладення навантажень і провертаємо циліндр для запобігання його прилипання до стінки отвору корпусу. Поворот здійснюємо на прямий кут, що контролюємо за допомогою позначок на торці циліндра.

9. Пункти 1 – 6 даного плану повторюємо 8 разів, що відповідає двом повним обертам циліндра. Таким чином, кількість повторних дослідів складає $n = 8$, що дає змогу визначити дисперсію експериментальних даних

та оцінити її однорідність. За необхідності скористатися даними з додатку Б.

10. Провести розрахунки величини h .

11. Провести розрахунки за формулами (1.1) – (1.8). Табличні значення необхідних критеріїв взяти з довідників.

12. Визначити величини \hat{h}_j , розв'язавши систему рівнянь (2.1).
Рекомендується використати систему Mathematica або MathCAD.

13. Перевірити адекватність прийнятої степеневі залежності за формулами (1.12), (1.13). Табличне значення критерію Фішера взяти з довідників. Зробити необхідні висновки.

Контрольні запитання.

1. Що таке степені вільності експерименту?
2. Як відбувається розрахунок похибок положення імітуючого циліндра, що прогнозується математичною моделлю?
3. Яку величину лінійних переміщень фіксують індикатори в даному експериментальному стенді?
4. Чому необхідно проводити повторні дослідження з однаковим силовим навантаженням?
5. В чому полягає різниця у розрахунку критерію Фішера у даній та попередній практичних роботах?
6. Від яких параметрів залежить вибір табличного значення критерію Фішера?

Додаток А
Варіанти завдань до практичної роботи № 1

Показники індикатора № 1

Р, Н	1	2	3	4	5	6	7	8
500	64	73	74	68	70	73	70	70
1000	59	68	69	62	64	67	65	65
1500	55	64	65	57	59	62	60	61
2000	52	61	61	54	55	59	57	57
2500	49	58	58	51	52	56	54	54
3000	47	55	55	49	49	54	52	52
3500	45	53	53	48	47	52	51	50
4000	44	51	52	47	45	51	50	48
4500	43	50	51	45	44	50	48	47
5000	42	48	50	44	43	49	47	46

Показники індикатора № 2

Р, Н	1	2	3	4	5	6	7	8
500	46	51	59	59	54	48	50	51
1000	41	46	54	53	48	43	45	46
1500	36	42	49	48	44	39	40	41
2000	33	39	45	44	41	36	37	38
2500	31	36	42	41	39	33	34	35
3000	29	33	40	39	37	30	32	33
3500	27	31	38	37	35	28	30	32
4000	26	30	36	36	34	26	28	31
4500	24	29	35	35	33	25	27	30
5000	23	28	34	34	31	24	26	29

Додаток Б

Варіанти завдань до практичної роботи № 2

P=500 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	47	52	55	48	46	53	51	48
160	42	46	49	42	40	47	45	43
240	38	41	45	37	36	43	41	39
320	34	38	42	34	32	39	38	35
400	31	35	39	31	30	36	35	32
480	29	33	37	29	28	34	32	30
560	27	32	35	27	26	32	30	29
640	25	31	33	26	25	31	29	28
720	23	30	32	25	24	30	28	27
800	22	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	80	84	88	80	79	85	83	81
160	71	76	78	72	70	77	74	72
240	63	67	70	64	63	70	68	66
320	57	62	65	57	54	61	61	58
400	52	55	59	50	50	57	55	52
480	45	49	53	45	44	51	49	46
560	41	46	49	41	40	45	44	43
640	36	42	43	36	36	40	40	38
720	29	36	39	32	31	38	36	34
800	25	32	33	28	27	34	31	30

P=1000 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	46	53	53	50	45	53	52	51
160	40	47	47	44	40	48	46	45
240	36	43	42	40	36	44	41	40
320	33	40	39	36	33	41	37	37
400	30	37	37	33	30	38	34	34
480	28	35	35	31	28	36	32	32
560	26	33	33	29	27	34	31	30
640	25	31	32	27	26	32	29	28
720	24	29	31	26	25	31	28	27
800	23	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	68	75	76	72	70	76	72	73
160	62	67	68	64	61	67	63	65
240	57	62	63	59	56	62	58	60
320	51	56	58	53	50	57	53	54
400	46	50	52	47	46	51	47	50
480	41	45	47	43	41	47	43	45
560	37	41	43	40	37	44	40	40
640	34	37	40	34	33	39	37	37
720	29	35	37	31	29	36	33	33
800	25	31	33	26	27	33	31	29

P=1500 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	46	53	55	46	47	53	51	52
160	41	48	49	40	42	48	46	46
240	37	44	45	36	37	44	42	41
320	33	40	42	33	33	40	39	37
400	30	37	39	31	31	38	36	35
480	28	34	37	29	29	36	34	33
560	26	32	35	28	27	34	32	31
640	24	30	33	26	26	32	30	29
720	23	29	31	25	24	31	28	28
800	22	28	30	24	23	29	27	27

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	65	71	73	65	66	72	71	70
160	58	65	65	58	60	66	63	64
240	53	60	60	52	53	59	57	57
320	47	53	56	47	46	54	53	51
400	42	49	51	43	43	49	48	47
480	38	43	47	39	39	46	44	44
560	34	41	44	36	36	42	39	40
640	30	37	39	33	33	38	37	36
720	28	33	36	29	29	36	33	33
800	24	30	32	26	26	32	29	30

P=2000 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	45	52	57	47	47	54	51	49
160	39	47	51	41	41	48	45	44
240	35	43	46	37	37	44	41	40
320	32	39	43	34	34	41	37	37
400	29	36	40	31	31	38	34	34
480	26	33	37	29	29	36	32	32
560	25	32	35	27	27	34	30	31
640	24	31	33	26	25	32	29	29
720	23	30	31	25	24	30	28	27
800	22	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	61	68	74	64	63	70	67	65
160	54	63	65	56	56	62	59	59
240	49	56	60	50	51	57	54	54
320	44	51	56	45	45	52	50	50
400	39	47	51	42	41	49	44	45
480	35	42	45	38	38	46	41	41
560	31	39	42	34	33	42	37	37
640	30	37	38	31	30	37	34	35
720	26	35	35	29	27	35	32	32
800	26	31	33	27	25	31	30	29

P=2500 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	46	49	56	47	47	52	51	49
160	40	43	50	41	41	47	46	44
240	35	39	45	37	36	43	42	39
320	32	36	41	34	33	40	38	36
400	29	34	38	32	30	37	35	33
480	27	32	35	29	28	35	32	31
560	25	31	33	28	27	33	30	29
640	24	30	32	26	26	32	29	28
720	23	29	31	25	24	30	28	27
800	22	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	60	65	71	63	61	68	66	63
160	53	57	63	54	55	61	60	58
240	48	52	57	48	48	54	54	51
320	42	47	52	46	43	51	49	46
400	39	44	47	42	39	46	45	43
480	34	39	42	37	35	43	39	39
560	31	38	39	35	33	39	37	35
640	28	35	36	31	31	37	34	34
720	27	34	35	28	28	34	31	31
800	24	30	32	27	26	32	30	29

P=3000 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	44	51	57	49	47	54	50	50
160	38	46	51	43	42	49	44	44
240	34	42	46	38	38	45	40	39
320	31	38	42	35	34	41	36	36
400	29	35	39	32	31	38	34	34
480	27	33	36	30	29	36	32	32
560	26	31	34	28	27	34	30	30
640	24	30	32	27	26	33	29	28
720	23	29	31	25	24	31	28	27
800	22	28	30	24	23	30	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	58	65	71	64	60	67	64	64
160	51	58	64	56	55	62	57	56
240	46	54	58	50	50	56	51	49
320	42	47	52	45	43	51	46	45
400	37	44	47	40	39	47	43	42
480	33	40	43	37	36	44	40	40
560	33	38	39	34	32	40	35	37
640	29	34	36	33	30	39	33	33
720	27	32	35	28	28	35	32	31
800	25	30	32	26	24	33	29	28

P=3500 Н

M, Нм

Показники індикатора № 1

	1	2	3	4	5	6	7	8
80	44	51	53	48	48	54	51	49
160	38	46	48	43	42	48	45	43
240	34	42	44	39	37	43	40	39
320	31	39	41	36	34	39	37	36
400	28	36	38	33	31	37	34	33
480	26	33	36	31	29	35	32	31
560	25	31	34	29	27	33	30	29
640	24	30	33	27	25	31	29	28
720	23	29	31	25	24	30	28	27
800	22	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм

Показники індикатора № 2

	1	2	3	4	5	6	7	8
80	56	65	65	61	61	68	64	62
160	49	58	60	55	54	59	57	55
240	45	53	54	49	48	53	51	50
320	41	49	51	45	44	49	47	45
400	35	44	45	42	39	46	43	42
480	33	41	42	37	36	41	38	38
560	31	37	39	35	33	39	36	34
640	28	34	37	32	29	37	34	32
720	26	33	34	28	27	32	31	30
800	25	30	33	27	24	31	29	28

P=4000 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	45	52	54	48	47	54	51	50
160	40	46	49	42	41	48	45	45
240	36	42	45	37	37	44	41	40
320	32	39	41	34	33	40	38	37
400	29	36	38	31	31	37	35	34
480	27	34	36	29	29	35	33	32
560	25	32	35	27	27	33	31	30
640	24	30	33	26	25	32	30	28
720	23	29	31	25	24	31	28	27
800	22	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	57	64	65	60	59	67	63	63
160	51	57	60	53	52	58	56	56
240	45	52	55	47	48	53	52	50
320	40	47	49	42	41	48	46	47
400	38	43	45	38	39	44	42	41
480	33	42	43	35	36	41	40	39
560	31	37	39	33	32	38	37	35
640	29	34	37	31	29	37	35	32
720	26	33	34	27	28	33	30	31
800	25	29	31	27	24	32	30	29

P=4500 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	46	52	54	46	46	52	51	50
160	40	46	49	41	41	47	46	45
240	36	42	45	37	37	43	41	40
320	32	38	41	34	33	39	38	37
400	30	35	38	31	30	36	35	34
480	28	33	36	28	28	34	32	32
560	26	32	34	27	26	32	30	30
640	24	30	33	26	25	31	29	28
720	23	29	31	25	24	30	28	27
800	22	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	57	63	65	57	57	64	62	62
160	51	56	59	52	52	57	57	55
240	45	51	55	45	47	52	51	48
320	41	47	48	43	41	47	46	44
400	38	42	45	38	38	42	43	42
480	35	40	42	34	34	41	38	38
560	31	38	39	33	31	37	35	35
640	27	34	36	29	29	35	34	32
720	26	32	34	29	28	33	30	31
800	23	31	31	27	26	31	29	28

P=5000 Н

M, Нм	Показники індикатора № 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	46	53	55	45	48	54	50	48
160	40	48	50	40	43	49	44	42
240	36	43	45	36	38	44	40	38
320	32	39	42	33	34	40	37	35
400	29	36	39	31	31	37	35	33
480	27	34	37	29	29	35	33	31
560	26	32	35	28	28	33	31	29
640	24	31	33	27	26	32	29	28
720	23	29	31	25	25	31	28	27
800	22	28	30	24	23	29	27	26

M, Нм	Показники індикатора № 2							
	1	2	3	4	5	6	7	8
80	57	64	65	57	58	65	60	59
160	49	58	61	50	53	58	54	51
240	45	51	54	45	46	53	48	47
320	40	47	50	42	43	48	44	44
400	36	42	45	37	39	45	42	41
480	33	41	42	36	35	40	39	37
560	30	37	40	33	33	39	36	33
640	29	35	37	31	29	36	33	32
720	25	31	33	27	28	34	32	31
800	24	30	31	25	25	32	28	27

Література

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : Навч. посіб. для ВНЗ. Ч. 2. Проектування та дослідження вузлів агрегатно-модульного технологічного обладнання / В.А. Крижанівський, Ю.М. Кузнецов, А.М. Кириченко, А.І. Гречка, В.В. Смірнов, Ю. В. Лебедєв, І.А. Валявський, О.В. Лисенко; Кіровогр. держ. техн. ун–т, Нац. техн. ун–т України "Київ. політехн. ін–т". – Кіровоград, 2003. – 286 с.
2. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів : підручник / В.М. Бочков, Р.І. Сілін, О.В. Гаврильченко; Ін–т інновац. технологій і змісту освіти М–ва освіти і науки України. – Л. : Бескид Біт, 2008. – 448 с.
3. Гречка А.І. Підвищення точності і навантажувальної здатності пінольних механізмів агрегатно-модульного технологічного обладнання : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук. Спец. 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти / А.І. Гречка ; наук. кер.: А.М. Кириченко. – Кіровоград, 2008. – 218 с.
4. Методики моделювання при дослідженні та проектуванні верстатів і технологічних систем : Навч. посіб. для студ. / О.Ф. Гордєєв, П.О. Захаров; Луц. держ. техн. ун–т. – Луцьк, 2003. – 256 с.
5. Математичне моделювання металорізальних верстатів / В.Б. Струтинський, П.П. Мельничук; Житомир. інж–технол. ін–т. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 570 с.
6. Надійність технологічних систем та обладнання : підручник / Г.О. Оборський, О.С. Савельєва, А.В. Торопенко, О.Л. Становський. – Одеса : Бахва, 2013. – 558 с.
7. Точність верстатних пристроїв машинобудівного виробництва : Навч. посіб. для студ. вищ. техн. закл. / Б.Д. Сторож, Р.Т. Карпик, А.І. Гордєєв. – Івано–Франківськ; Хмельниц. : ХНУ, 2004. – 230 с.

Зміст

Практична робота № 1 Визначення коефіцієнту пропорційності між контактними тисками та деформаціями у пінольному механізмі	3
Практична робота № 2 Підтвердження адекватності математичної моделі жорсткості пінольного механізму	13
Додаток А	18
Додаток Б	19
Література	29