

© В.А. Дербаба¹, В.С. Носачов¹, З.М. Різо¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ І УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ ВЕРСТАТА НА ГЕОМЕТРИЧНУ І КІНЕМАТИЧНУ ТОЧНІСТЬ

© V. Derbaba¹, V. Nosachov¹, Z. Rizo¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

RESEARCH AND IMPROVEMENT OF METHODS OF TESTING MACHINES FOR GEOMETRIC AND KINEMATIC ACCURACY

Мета. Проаналізувати та перевірити на адекватність відомі розрахункові формули при визначенні геометричної і кінематичної точності, статистичної і динамічної жорсткості та випробування верстата на технологічну надійність. Провести порівняльні розрахунки для спрощення методології комплексних випробувань металорізальних верстатів універсальної групи. Обрати та удосконалити вимірювальне устаткування при проведенні комплексних випробувань фрезерного верстата.

Методика. Дослідження базується на застосуванні аналітичних способів розрахунків визначення коефіцієнта статичної жорсткості, додаткового розрахунку конструкції вимірювального приладу через передавальне відношення зубчастої частини, кута повороту важеля та теоретичної похибки механізму переміщення з урахуванням відомої теореми вірогідності розподілу кута.

Результати. Одержані формули досліджень коефіцієнта статичної жорсткості, механізму вимірювального приладу, кута повороту важеля, теоретичної похибки механізму переміщення та щільність вірогідності розподілу кута важільного механізму індикатора тангентного типу.

Наукова новизна. Виконано дослідження і встановлено параметричний взаємозв'язок коефіцієнта статичної жорсткості при проектуванні вузла шпинделя вертикально-фрезерного верстата з похибкою розрахунків конструкції, вильоту конусу шпинделю та розташування між опорами. Отримані значення і функціональні залежності амплітуди коливань від гранично допустимих швидкостей обертання шпинделю і швидкості подач при яких шорсткість поверхні заготовки досягає заданих геометричних меж. Експериментально підтверджено, що параметри системи планово-попереджувальних ремонтів безпосередньо пов'язані з показниками надійності верстата. Ресурс по точності верстата визначає потребу в капітальному ремонті, а міжремонтний період залежить від термінів служби деталей і елементів верстата. Фактичний термін служби повинен бути кратним міжремонтному періоду, оскільки відновлення деталі планується при поточному ремонті.

Практична значимість. Практичний здобуток отриманих результатів полягає в підтвердженні адекватності відомих розрахункових формул при визначенні геометричної і кінематичної точності, статистичної і динамічної жорсткості та випробування верстата на технологічну надійність. На основі отриманих аналітичних і розрахункових даних складена спрощена комплексна методика випробування металорізального верстата при:

- випробуванні верстата на холостому ходу;
- випробуванні верстата при роботі під навантаженням;
- випробуванні верстата на геометричну і кінематичну точність;
- визначення статистичної і динамічної жорсткості;
- дослідженні вібростійкої вертикально-фрезерного верстата;

– випробуванні верстата на технологічну надійність.

Ключові слова: верстат металорізальний, жорсткість, вібростійкість, надійність, вимірювання, випробування, точність.

Вступ. Придатність металорізального верстата до виконання заданих технологічних операцій визначається перш за все справним станом всіх його механізмів. Приймання або перевірку технічного стану металорізальних верстатів починають із зовнішнього огляду верстата, перевірки його паспортних даних, правильності функціонування його основних механізмів на холостому ході, а потім під навантаженням. Для оцінки працездатності верстата за основними технічними показниками, і в першу чергу по точності, необхідно провести ряд спеціальних випробувань. Призначення цих випробувань витікає із загальної схеми втрати верстатом працездатності, звідки виходить необхідність забезпечити високі початкові параметри верстата і зберігати їх в процесі експлуатації. Для дослідних зразків верстатів проводять дослідницькі випробування, а для верстатів, що знаходяться в експлуатації, – контрольні [1].

На сьогоднішній день існують норми жорсткості для верстатів різних типів. Стандартами передбачені: метод навантаження; величина допустимого навантаження; допустимі деформації елементів верстата. Норми регламентують сумарну деформацію (наприклад, шпинделя і супорта) в напрямі, що визначає точність обробки.

Оцінка динамічної жорсткості і вібростійкої верстата дозволяє визначити типові форми коливань, отримати частотні характеристики, встановити межі стійкості роботи верстата при знятті граничної стружки. Головним напрямом в розвитку методів і засобів для випробування верстатів є їх автоматизація, можливість проведення одночасно багатьох вимірювань із записом їх на принтері і при необхідності з обробкою отриманих даних на ЕОМ [1,2].

Мета роботи і постановка задачі. На базі вертикально-фрезерного верстата моделі *БР13Ф3* провести та удосконалити методики: визначення геометричної і кінематичної точності, статистичної і динамічної жорсткості та випробування верстата на технологічну надійність з урахуванням теплових деформацій, допустимих навантажень, допустимих деформацій елементів верстата, сумарних деформацій, оцінки динамічної жорсткості і вібростійкої верстата.

Як написано вищим, під впливом різних процесів відбувається поступова зміна свідчень якості верстата. Для цього вибирають типову деталь і встановлюють її допуску на розміри і форму деталі, які повинні бути забезпечені при обробці на даному верстаті.

У основу методики випробувань верстата на технологічну точність і надійність покладені процеси, що впливають на параметри верстата, які класифікуються на швидкоплинні процеси, процеси середньої швидкості і повільні.

Зсув фактичного рівня настройки x_n в часі відбувається в результаті протікання процесів середньої швидкості, з числа яких виділяються два основних: розмірний знос інструментів і нерівномірний нагрів вузлів верстата [1, 2].

$$X_n(t) = d' + b(t-t') \quad (1)$$

або $x_H(t) = d + bt$, (2)

де: t – час наладки; t' – середнє значення міжналагоджувального періоду часу від початку моменту наладки до моменту переналагодження; d' – середній рівень настроювання на міжналагоджувальний період (при $t = t'$); b – кутовий коефіцієнт прямої.

З (1') маємо

$$d = x_H(t=0)$$

Розсіювання розмірів, наприклад, діаметри валів, спостерігається в кожній партії оброблених на верстаті деталей, тому на верстаті розмір x слід розглядати як випадкову величину.

Резерв по кожному з технічних показників верстата вичерпуються із-за збільшення наступних величин:

1) Зони A в результаті збільшення зазорів в сполученнях, зміна жорсткості і інших характеристик, що впливають на інші процеси, що швидко діють;

$$A_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_H}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_{cp}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

2) Зони A_H в результаті зносу і старіння настроєних вузлів машин, верстата;

3) a_{ϕ} в результаті зносу, викривлення і інших явищ у ряді вузлів;

4) a_{cp} і A_{cp} за рахунок перерозподілу внутрішньої напруги і деформацій в деталях, що приводять до збільшення їх податливості при нерівномірному нагріві, збільшенню швидкості зношування певних елементів, збільшенню вібрацій і так далі.

Тому випробування верстата повинне бути короткочасним і визначати резерв:

$$\delta_m = \delta - \left[\sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_H}{2}\right)^2} + a_{\phi} + a_{cp} + \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_H}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_{cp}}{2}\right)^2} \right] \quad (4)$$

і коефіцієнта резерву точності для основних параметрів верстата:

$$R_m = \frac{\delta}{\delta - \delta_m}$$

В кінці терміну служби верстата коефіцієнт надійності за час T_{MH} визначається вірогідністю заходу даного розміру деталі за межі зони.

Випробування на технологічну надійність є для сучасних верстатів необхідним видом комплексних випробувань, які дозволяють оцінити основні параметри верстата і отримати додаткові дані для вдосконалення його конструкції.

Основна частина. Розробка протоколу випробувань вертикально-фрезерного верстата моделі *6P13Ф3*

a) перевірка площини робочої поверхні столу.

На робочій поверхні столу 1 в подовжніх, поперечних і діагональних напрямках на двох регульованих опорах 2 встановлюють перевірочну лінійку 3 так, щоб отримати однакові свідчення індикатора 4 на кінцях лінійки.

Індикатор встановлюють на столі так, щоб його вимірювальний наконечник торкався робочої поверхні лінійки і був перпендикулярний їй.

Індикатор переміщують уздовж лінійки і визначають прямолінійність форми профілю поверхні в точках вимірювання, віддалених один від одного на відстані $a \approx 0,1L \geq 100$ мм або $b \geq 100$ мм. L і B - розміри столу.

Відхилення визначають як найбільшу величину різниці алгебри свідчень індикатора. Відхилення, що допускається 16 мкм на довжині вимірювання 200 мм 30 мкм на довжині вимірювання 800мм (опуклість не допускається).

б) перевірка паралельності подовжнього переміщення столу його поперечному переміщенню в горизонтальній площині;

в) перевірка площини робочої поверхні столу напряму його подовжнього переміщення;

г) перевірка паралельність робочої поверхні столу напряму його поперечного переміщення;

д) перевірка паралельності бічних сторін середнього паза столу напряму його подовжнього переміщення;

е) перевірка осьового биття шпинделя;

ж) перевірка биття торця опорного торця шпинделя;

и) перевірка радіального биття конічного отвору шпинделя: а) у торця шпинделя; б) на відстані $L=150$ мм;

к) перевірка радіального биття центруючої шийки шпинделя;

л) перевірка перпендикулярності осі обертання вертикального шпинделя робочої поверхні столу в поперечному напрямі;

м) перевірка перпендикулярності напряму вертикального переміщення консолі робочої поверхні столу в подовжньому і поперечному напрямках.

Розробка методики експертизи верстата моделі 6P13Ф3:

1 Випробування верстата на холостому ході.

Перевірка методики за паспортними даними: верстат уважно оглядають, при цьому перевіряють правильність установки верстата, точність переміщення від руки «мертвих» ходів маховиків, натягнення ременів і ланцюгів, наявність залишкової кількості мастила і стан змащувальних отворів, наявність охолоджуючої рідини, наявність всіх таблиць і написів, необхідних для обслуговування верстата. Далі після огляду приступають до випробувань на холостому ході. Запускають верстат, включають всі швидкості шпинделя, і на останній його зупиняють. Верстат працює до настання потрібної температури протягом 1,5 – 2 годин. Температура повинна перевищувати:

- для шпинделя $50 \pm C$;
- для підшипників ковзання $70 \pm C$;
- для підшипників кочення $40 \pm C$;
- у основних механічних вузлах - не вище $50 \pm C$;
- температура масла не більш $60 \pm C$.

Одночасно перевіряють механіку подовжньої і поперечної подач столу на малих, середніх і найбільших робочих подачах, а також на прискорених переміщеннях столу в подовжньому і поперечному напрямках. Необхідно переконатися в справності всіх органів управління верстата. Обов'язково перевіряють безвідмовність роботи і своєчасність дії різних автоматичних пристроїв.

У верстатів, що мають автоматичні і напівавтоматичні цикли, перевіряють чіткість і безвідмовність циклу. Особливу увагу приділяють перевірці дії системи мастила, гідро- і пневмосистем, системи охолодження.

Робота верстата повинна бути плавною, без поштовхів, без шуму, характерного при несправності вузлів верстата. Шум при холостому ході верстата повинен бути почутим на відстані 4 – 5 м. Зусилля на рукоятках і маховичках механізму пересування не повинно перевищувати допустимих норм.

2 Випробування верстата при роботі під навантаженням.

Це випробування дозволяє виявити якість роботи верстата, тому повинно проводитися в умовах, близьких до звичайних. При цьому обробляють які-небудь зразки при середніх ступенях швидкостей шпинделя, добре заточеним інструментом без охолодження з такими режимами, щоб навантаження не перевищувало номінального навантаження приводу протягом основного часу випробування, а лише короткочасно мінялася на 25% понад номінальну потужність. Верстат повинен пропрацювати під повним навантаженням не менше 30 хв. Якщо цільове призначення верстата з ЧПУ не відомо, то випробування проводять в роботі на чорновому і на чистовому режимах. Для вертикально-фрезерного верстата для чистового режиму на заготовці $D=50$ мм довжиною $L=200$ мм при глибині різання $H=1 - 1.5$ мм подача $S=0,2 - 0,3$ мм/об. Оброблювані таким чином ділянки поверхні повинні бути без видимих не озброєним оком слідів дроблення, тремтіння або ступінчастості. Для спеціальних, спеціалізованих, а також агрегатних верстатів, замовлених з певною наладкою або верстатів з ЧПУ, щодо яких в договорі вказані випробування на обробку певних деталей, випробування проводяться на обумовленому етапі. При цьому фактична продуктивність повинна бути не нижче вказаною.

3 Випробування верстата на геометричну і кінематичну точність.

У патроні з вильотом близько 100 мм проводиться чистова обточка при подачі 0,08.1,0 мм/об на глибині різання 0,3.0,5 мм. Отримана після обробки поверхня перевіряється на овальність і конусність табл.1.

Таблиця 1

Визначення відхилень на овальність

Фактичне відхилення на овальність	Допустиме відхилення на овальність
$d_1 = 24.98$ мм, $d_2 = 24.97$ мм, $d_1 - d_2 = 0,01$ мм	0,01 мм
на конусність	на конусність
$d_1 = 24.97$ мм, $d_2 = 24.95$ мм, $d_1 - d_2 = 0,02$ мм	0,01 мм

Аналіз і реалізація. 1. Визначення статистичної і динамічної жорсткості вертикально-фрезерного верстата моделі 6P13Ф3 [3, 4]. При проектуванні вузла шпинделя вертикально-фрезерного верстата виникає завдання розрахунку на жорсткість. Проте, теоретично, моделі, вживані в цих розрахунках дають похибку від 30 – 85%, яка компенсується коефіцієнтом статичної жорсткості $K_{ст}$, який визначається з виразу:

$$K_{ст} = \frac{j_{теор}}{j_{експ}} \quad (5)$$

Визначимо $j_{теор}$:

$$j_{теор} = \frac{3ES}{a^2(a+1) - \frac{1}{3}a^2l} = \frac{3 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^5}{10^4 \cdot (100+1) - \frac{1}{3} \cdot 10^4 \cdot 870} = 1.6 \cdot 10^6,$$

де $E=26000$ – модуль Юнга; a – виліт конуса шпинделя; l – розташування між опорами;

$$j = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{3.14}{64} (75^4 - 55^4) = 0.49(31640625 - 9150635) = 1102010 = 11 \cdot 10^5$$

Визначимо $j_{експ}$:

$$j_{експ} = \sum_{i=1}^n \frac{j_{iексп}}{n} = 1.4 \cdot 10^6$$

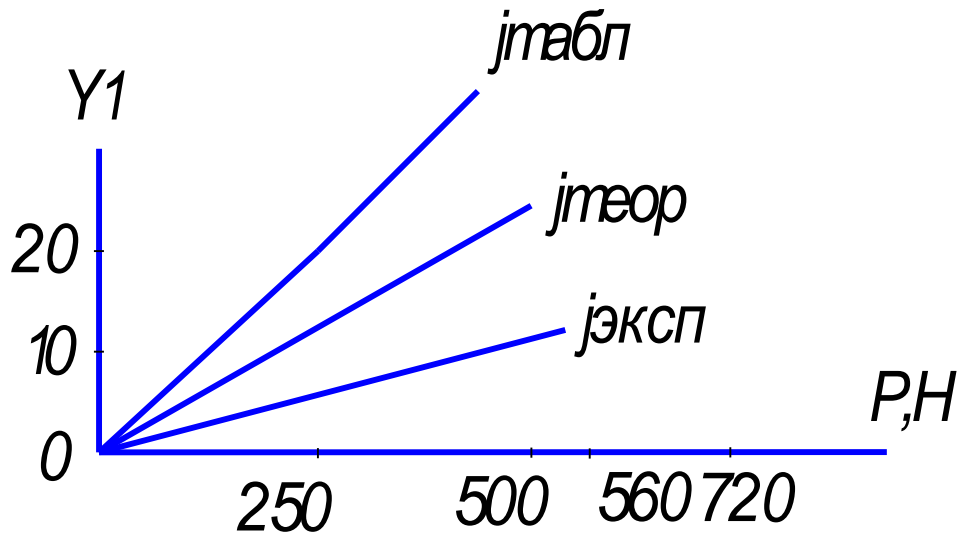


Рис. 1. Графік залежності $Y_i(P_i) < j_{експ}$

Визначимо коефіцієнт статичної жорсткості:

$$K_{с.ж.} = \frac{j_{теор}}{j_{експ}} = \frac{1.6 \cdot 10^6}{1.4 \cdot 10^6} = 1.14$$

Як показують експерименти, значення жорсткості верстата в статичному стані вище, ніж в динамічному. Аналіз частот і амплітуд при різних видах обробки дозволяє побудувати графік меж стійкості, тобто отримати граничні перетини глибини різання при відповідних значеннях швидкостей подач, при яких верстат здатний вести обробку без вібрацій.

2. Дослідження вібростійкої вертикально-фрезерного верстата [5, 6]. Зону стійкості визначимо графічно в координатах $S(V)$, де V – швидкість різання, S – подача для побудови зони стійкості. Необхідно визначити граничні V і S , при яких амплітуда коливань вузлів верстата допускає гранично допустимі значення. Гранично допустимі значення V і S будуть такі, при яких шорсткість поверхні заготовки досягає заданих геометричних меж табл. 2.

Таблиця 2

Приклад вимірювання амплітуди коливань

Швидкість обертання шпинделя верстата моделі 6P13Ф3 <i>n, об/хв</i>	Амплітуда коливань
100	1,2
250	1,1
315	1,3
400	3,2
500	2,2
650	2,1
800	1,0
1000	1,7

Швидкохідні верстати у ряді випадків випробовують на шум, причому є допустимі рівні шуму для різних частотних спектрів (нормаль верстатобудування *H89-101* і спеціальні прилади – шумоміри) для вимірювання шуму.

3. Випробування верстата на технологічну надійність. У основу методики випробування верстата на технологічну надійність покладена класифікація процесів, що впливають на параметри верстата, на швидкоплинні процеси середньої швидкості і повільні.

Процеси різної швидкості приводять до зміни геометричних, кінематичних кутових, точнісних і інших параметрів верстатів в результаті того виникають відмови точності.

На відмови точності верстата по кожному з даних параметрів виробу впливають три категорії чинників:

- погрішність початкової настройки. Є відхиленням початкової настройки від необхідного її рівня.

- зсув фактичного рівня настройки. За часом відбувається в результаті протікання процесів середньої швидкості, з числа яких можна виділити два основних, – розмірний знос інструменту і нерівномірний нагрів вузлів верстата.

- розсіювання значень рівня настройки. Зазвичай відбувається по нормальному закону розподілу, і тому середньоквадратичне відхилення характеризує розсіювання початкових настройок, залежних від якості вузла настройки верстата і від кваліфікації того, що налагоджує.

Характеристика устаткування для випробувань. При перевірці верстатів на геометричну точність необхідно мати ряд приладів. Для всіх верстатів при кожній перевірці в Гості вказані необхідні вимірювальні пристрої, такі як:

1 *Перевірочні лінійки ГОСТ 20126-69.* Бувають лінійні з широкою робочою поверхнею і лекальні з широкою робочою поверхнею. Застосовують їх для контролю прямолінійності і площинної робочих поверхонь столів. Лінійка з широкою робочою поверхнею переважно виготовляють чавунними з двотавровими лініями або з чавунними містками завдовжки від 400 – 4000 мм.

2 *Лекальних лінійки бувають:*

- плоскі з одностороннім або двостороннім скосом;
- три і чотиригранні. Виготовляються із сталей. Застосовуються для контролю на просвіт невеликих площин довжина не більше 500 мм.

3 *Перевірочні кути ГОСТ 3749-77.* Застосовуються для перевірки взаємної перпендикулярності розташування або руху щодо окремих вузлів деталей верстатів. Вони зручні із-за стійкості і простоти установки. Розміри: 200 300 мм.

4 *Щупи ГОСТ.* Застосовуються для визначення зазорів між поверхнею, що перевіряється, і контрольною лінійкою. Набір включає від 10 до 16 пластин від 0,03 до 1 мм і завдовжки 50, 100 або 200 мм.

Для випробування верстатів в основному застосовують щупи завтовшки від 0,03 до 0,5 мм і завдовжки 50, 100 мм.

Оправки – контрольні пристосування. Особливо широко застосовуються при виготовленні і перевірці верстатів. Контрольні оправки повинні мати підвищену твердість НРС не менше 50. Центрові отвори повинні бути прошліфовані, мати захисний кінець. У оправок допускається овальність, конусність або биття не більше 0,005 мм, а для прецизійних верстатів не більше 0,003 мм.

Типи оправок:

- *консольні*, такі, що мають на одному кінці відповідний розмір кінцю шпинделя, верстата, що перевіряється. Застосовуються для перевірки збігу осі шпинделя, а також для перевірки положення самої осі шпинделя у верстаті.

- *Циліндрові центрові.* Застосовують для перевірки положення лінії центровочного отвору верстата і перевірки розташування центрів, що направляють щодо цієї лінії. Розміри і розташування робочих поверхонь контрольних оправок повинні дозволяти вимірювати відхилення на довжинах, до яких віднесений допуск.

Діаметри оправок повинні бути достатніми, щоб виключити вплив приладів від власної ваги. Довжини від 150 – 1000 мм, О25 – 120 мм.

6 *Індикаторів.* Діляться на два типи:

- індикатори годинного типу по ГОСТ 577-53;
- зубчаті для важеля з ціною ділення 0,01 і 0,02 мм по ГОСТ 5584-50.

7 *Рівнів по ГОСТ 3053-45 і ГОСТ 308-46.*

Рівні служать для перевірки горизонтальної і вертикальної установки верстата прямолінійності що направляють, взаємного розташування на верстаті стійкий, бабки.

По конструкції рівні бувають горизонтальні звичайні; горизонтальні регульовані; рамні; рукавні; спеціальні.

Рекомендації, що дозволяють зменшити погрішність вимірювання рівнів.

При вимірюванні не допускати помітних змін температури рівня, тому метод читання свідчень рівня протягом перевірки даного верстата повинен бути одноманітним, тобто підстава рівня повинна щільно прилягати е поверхні.

Щоб переконатися в справності рівня слід повернути його на площині на 180^\pm . Вимірювані при цьому свідчення не повинні перевищувати $\pm 1/4$ ділення шкали.

8 Перевірочних містків. Застосовують для контролю тих, що направляють. Містки можуть бути і мати різну конструкцію, проте їх довжина повинна бути більше довжини робочої частини верстата.

9 Оптичних приладів. Застосовують для контролю довгих направляючих, наприклад прилад для перевірки точності кроку.

Розрахунок вимірювального приладу на точність. Як вимірювальний прилад для перевірки точності вертикально-фрезерного верстата візьмемо індикатор ІГМ [1,2], який є мікронним багатооборотним індикатором з межею вимірювання 0 – 1 мм, ціною ділення 1 мкм і допустимою помилкою ± 2 ділення шкали. Індикатор (виключаючи зубчату передачу) побудований і працює за кінематичною схемою двохважеля. Для перетворення руху використовує один або декілька рівноплечих або нерівноплечих важелів. Важіль 2 в індикаторі ІГМ тангенсного типу, а важіль 3 – синусного типу. Тангентні і синусні механізми служать для перетворення обертального руху в поступальне. Механізм тангенсного типу складається з штовхача 1, рухомого поступально, важеля 2 з сферичним наконечником радіусу r , що знаходиться в коливальному русі. Провідною ланкою може бути як штовхач, так і важіль.

Розрахуємо передавальні відносини, що зв'язує лінійні переміщення кінця стрілки з кутом повороту важеля [7].

Початкові дані до розрахунку:

$$z_1 = 228 \text{ мм}; z_2 = 25; z_3 = 80 \text{ мм}; z_4 = 16 \text{ мм}; L = 30 \text{ мм}; r_2 = 7 \text{ мм}; l = 129 \text{ мм}; \\ r_2 = 4,356 \text{ мм}.$$

Тому передавальне відношення зубчатої частини рівне:

$$i_{41} = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_3}{z_4} = \frac{228}{25} \cdot \frac{80}{16} = 45,6$$

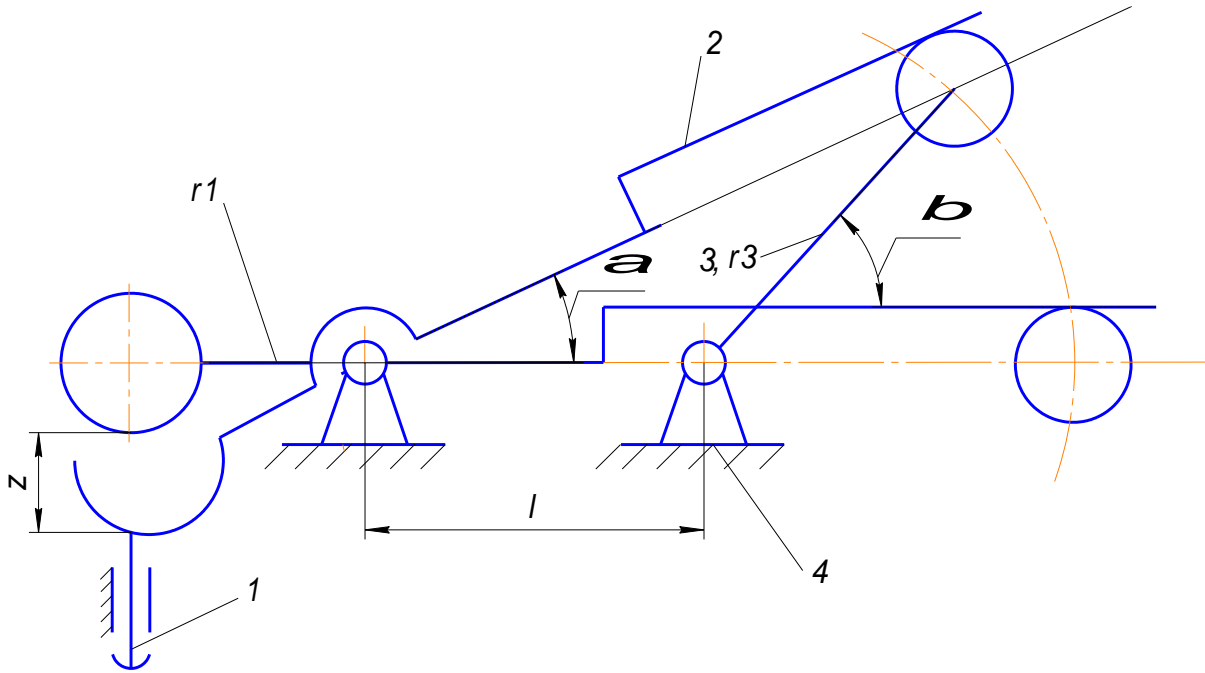


Рис. 2. Схема важільного механізму індикатора ІГМ тангентного типу

Передавальне відношення, що зв'язує лінійне переміщення кінця стрілки з кутом повороту другого важеля

$$A_{1\beta} = i_{41} \cdot L = 45.6 \cdot 30 = 1368 \text{ мм/рад},$$

тоді загальна ФП буде рівна:

$$y_z = 1368 \left\{ \left(\frac{l}{r_3} + 1 \right) \cdot \frac{z}{r_1} + \frac{1}{6} \cdot \left[\left(\frac{l}{r_3} \right)^2 + 1 \right] \cdot \frac{z^3}{r_1^3} + \frac{3}{40} \left[\left(\frac{l}{r_3} \right)^5 + 1 \right] \cdot \frac{z^5}{r_1^5} \right\}, \text{ мм}$$

При цьому z змінюється в межах від $-0,5$ до $+0,5$ мм. Теоретична помилка механізму $\Delta y_0 z$, буде рівна різниці між переміщеннями стрілки $y_z l$ і відстанню за шкалою між відповідним цьому переміщенню діленням (інтервал ділення $u l$ рівний $0,942$ мм при $z = 0,001$ мм, тобто 1 мкм розгортається в 942 мкм)

Теоретична помилка $\Delta y_z^0 = y_z - kz$, де $do = 942$, тому:

$$\Delta y = \left[1368 \left(\frac{l}{r_3} + 1 \right) \cdot \frac{l}{r_1} - 942 \right] \cdot z + 228 \left[\left(\frac{l}{r_3} \right)^3 + 1 \right] \cdot \frac{r^3}{r_1^3} + 102.6 \left[\left(\frac{l}{r_3} \right)^5 + 1 \right] \cdot \frac{z^5}{r_1^5}$$

На малюнку 3 показана крива ФП механізму і заданої функції, що характеризують теоретичні помилки для індикатора ІГМ.

Геометричний точністний аналіз проводиться тільки після розробки конструкції приладу. Змінний кут між напрямом нормалі до профілю визначимо по формулі:

$$\Delta x_l = \Delta_1 \cdot \Delta_2 \cdot \cos(\Theta + \phi) \cdot \Delta l_{sz} \quad (6)$$

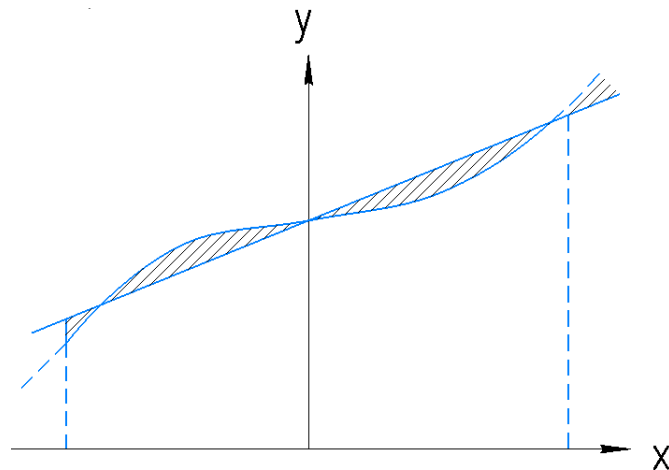


Рис. 3. Характер дії теоретичної похибки механізму ІГМ

Знайдемо середнє значення $M_{ИД}$ на підставі відомої теореми вірогідності - середнього значення твору двох незалежних випадкових величин рівно твору їх середніх значень.

$$M_{\theta\Delta l} = M_0 \cdot M_{\Delta l} \quad (7)$$

Середнє значення M_0 рівне:

$$M_0 = \int_0^{2\pi} \cos(\theta + \phi) \cdot y \cdot \cos(\theta + \phi) \cdot d\theta,$$

де $y \cdot \cos(\theta + \phi)$ - щільність вірогідності розподілу кута. Підставимо вираз для щільності вірогідності розподілу $y \cdot \cos(\theta + \phi) = \frac{1}{2\pi}$ у рівняння і вирішивши інтеграл, отримаємо:

$$M_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(\theta + \phi) \cdot d\theta = 0 \quad (8)$$

Тому середнє значення $M_{ИД}$ по рівнянню (7) також рівно нулю.

Для дисперсії твору двох випадкових величин, незалежних по формулі теорії вірогідності можна записати так:

$$D_{\theta\Delta l} = D_{\Delta} \cdot D_{\Delta l} + D_0 \cdot M_{\Delta l}^2 + D_{\Delta l} \cdot M_0^2 \quad (9)$$

Третій доданок в цьому рівнянні на підставі рівності (13.7) рівний нулю. Напишемо виразі для дисперсії D_0 .

$$D_0 = \int_0^{2\pi} \cos^2(\theta + \phi) \cdot y \cdot \cos(\theta + \phi) \cdot d\theta \quad (10)$$

Поклавши як раніше, що щільність вірогідності визначення $y \cdot \cos(\theta + \phi) = \frac{1}{2\pi}$ вирішивши інтеграл отримаємо:

$$D_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2(\theta + \phi) \cdot d\theta = 0.5 \quad (11)$$

Середнє значення модуля ексцентриситету можемо знайти по наступній формулі:

$$M_{\Delta l} = \delta_{\Delta l} + a_{\Delta l} = (1 + a_{\Delta l}) \cdot \delta_{\Delta l}, \quad (12)$$

де $\delta_{\Delta l}$ – зсув центру групування розмірів ексцентриситету щодо середини поля допуску; $a_{\Delta l} = \frac{\bar{a}_{\Delta l}}{\delta_{\Delta l}}$ – коефіцієнт відносної асиметрії; $\delta_{\Delta l}$ – половина поля допуску

ПО від ексцентриситету.

З виразу (10) з урахуванням (11) і (12) для середньої квадратичної помилки $y_{w\Delta l}$ маємо:

$$\sigma_{0\Delta l} = \sqrt{D_{\theta\Delta l}} = 0.7 \sqrt{\sigma_{\Delta l}^2 + (1 + a_{\Delta l})^2 \cdot \delta_{\Delta l}^2} \quad (13)$$

Враховуючи коефіцієнт відносного середнього квадратичного розсіювання $H = \frac{\sigma_{\Delta l}}{\sigma_{\Delta l}^2}$ де $\sigma_{\Delta l}^2$ – середня квадратична помилка при Гаусовому розсіюванні в межах поля допуску, отримаємо: $\sigma_{\Delta l}^2 = K^2 \cdot \sigma_{\Delta l}^2$. Оскільки для Гаусового розсіювання: $\sigma_{\Delta l} = 3 \cdot \sigma_{\Delta l}^2$ підставляючи в рівняння (9.12) отримаємо:

$$\sigma_{0\Delta l} = 0.23 \cdot \delta_{\Delta l} \cdot \sqrt{K^2 + 9(1 + a_{\Delta l})^2} = 0.23 \cdot K_p \cdot \delta_{\Delta l}, \quad (14)$$

де $K_p = \sqrt{K^2 + 9(1 + a_{\Delta l})^2}$ – гранична помилка, направлена по лінії дії, може бути з достатнім ступенем, прийнята рівною $\delta_{0\Delta l} = 3\sigma_{0\Delta l}$ тоді з рівняння (14) остаточно отримаємо:

$$\delta_{0\Delta l} = 0.7 \cdot K \cdot \sigma_{0\Delta l} \quad (15)$$

Гранична помилка положення з виразу (15) з урахуванням величин $A1$ і $A2$ і рівняння (9.14) буде рівна:

$$\delta_{\phi 0\Delta l} = \delta_{\xi\Delta lsz} = \frac{0.7 \cdot K_p \cdot \delta_{\Delta l}}{Z_2 \cdot \cos \beta}, \quad (16)$$

де Z_2 – розмір коромисла; y – кут між лінією дії і лінією руху певної точки ланки.

Оскільки розсіювання модуля ексцентриситету підкоряється закону Максвела, при якому $K_i = 1.14$, $y_i = a_{\Delta l} = 0.28$ з виразу v отримаємо:

$$\delta_{\xi\Delta lsz} = \frac{0.7 \cdot \delta_{\Delta l}}{\Gamma_2 \cdot \cos \beta} \cdot \sqrt{1.14^2 + 9(1 + 0.28)^2} = \frac{2.8}{\Gamma_2 \cdot \cos \beta} \cdot \delta_{\Delta l} = \frac{2.8}{2.7 \cdot \cos 75^\circ} \cdot \delta_{\Delta l} = 0.227$$

Висновки. У статті розглянуті теоретико-методологічні аспекти комплексних випробувань металорізальних верстатів, розроблена методика досліджень і

випробувань верстата моделі 6P13Ф3. Дана конкретна методика проведення випробувань, їх періодичність і послідовність. Зроблено вибір вимірювального устаткування, необхідного при проведенні випробувань верстата і проведено розрахунок точності індикатора ІГМ.

Експериментально підтверджено, що параметри системи попередньо-планових ремонтів безпосередньо пов'язані з показниками надійності верстата. Ресурс по точності верстата визначає потребу в капітальному ремонті, а міжремонтний період залежить від термінів служби деталей і елементів верстата.

Проте вирішення про включення даної деталі в той або інший ремонт ускладнюється тим, що виникає розсіяння термінів служби, яке приводить або до недовикористання потенційної довговічності деталі, або до зростання вірогідності відмови в міжремонтний період. Фактичний термін служби повинен бути кратним міжремонтному періоду, оскільки відновлення деталі планується при поточному ремонті. Фактичний термін служби повинен бути кратним міжремонтному періоду, оскільки відновлення деталі планується при поточному ремонті.

На основі отриманих аналітичних і розрахункових даних складена спрощена комплексна методика випробування металорізального верстата при випробуванні верстата на холостому ході, при роботі під навантаженням, геометричну і кінематичну точність, визначення статистичної і динамічної жорсткості, дослідженні вібростійкої вертикально-фрезерного верстата, випробуванні верстата на технологічну надійність.

Перелік посилань

1. Кіпчарський, В. П. (2018). *Металорізальні верстати : навчальний*. ДВНЗ «ПДТУ»
2. Шевченко, О.В. & Беляєва, А.Ю. (2019). Металорізальні верстати. Кінематичний аналіз. Практикум до виконання практичних та лабораторних робіт [Електронний ресурс]: Навч. посібник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Металорізальні верстати та системи»; *КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані*. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 86с.
3. Zhuravel, O . Yu , Derbaba, V.A., Protsiv, V.V., & Patsera, S.T. (2019). Interrelation between Shearing Angles of External and Internal Friction During Chip Formation. *Solid State Phenomena. Materials Properties and Technologies of Processing*, (291), 193-203. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193>
4. Кравченко, Ю.Г., Дербабa, В.А. & Крюкова, Н.В. (2015). К вопросу эмпирического определения напряжений и коэффициентов трения при стружкообразовании. *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. Харьков: НТУ «ХПИ»*, (85), 137–148.
5. Derbaba V.A., Zil , V.V., & Patsera, S.T. (2014). Evaluation of the adequacy of the statistical simulation modeling method while investigating the components presorting processes. *Наукowyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 45-50.
6. Кравченко, Ю.Г., Дербабa, В.А. & Смагін, Д.В. (2020). Визначення і взаємозв'язок кутів зсуву і тертя при стружкоутворенні. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка»*, 61, 193-201. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.193>
7. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2021). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка»*, 63, 123-133. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>

АННОТАЦИЯ

Цель. Проанализировать и проверить на адекватность известные расчетные формулы при определении геометрической и кинематической точности, статистической и динамической жесткости и испытания станка на технологическую надежность. Провести сравнительные расчеты для упрощения методологии комплексных испытаний металлорежущих станков универсальной группы. Выбрать и усовершенствовать измерительное оборудование при проведении комплексных испытаний фрезерного станка.

Методика. Исследование базируется на применении аналитических способов расчетов определения коэффициента статической жесткости, дополнительного расчета конструкции измерительного прибора через передаточное отношение зубчатой части, угла поворота рычага и теоретической погрешности механизма перемещения с учетом известной теоремы вероятностей распределения углов.

Результаты. Полученные формулы исследований коэффициента статической жесткости, механизма измерительного прибора, угла поворота рычага, теоретической погрешности механизма перемещения и плотность вероятности распределения угла рычажного механизма индикатора тангентного типа.

Научная новизна. Выполнены исследования и установлена параметрическая взаимосвязь коэффициента статической жесткости при исследовании узла шпинделя вертикально-фрезерного станка с погрешностью расчетов конструкции, вылета конуса шпинделя и расположение между опорами. Полученные значения и функциональные зависимости амплитуды колебаний от предельно допустимых скоростей вращения шпинделя и скорости подачи, при которых шероховатость поверхности заготовки достигает заданных геометрических границ. Экспериментально подтверждено, что параметры системы планово-предупредительных ремонтов непосредственно связаны с показателями надежности станка. Ресурс по точности станка определяет потребность в капитальном ремонте, а межремонтный период зависит от сроков службы деталей и элементов станка. Фактический срок службы должен быть кратным межремонтному периоду, поскольку восстановление деталей планируется при текущем ремонте.

Практическая значимость. Практическое достижение полученных результатов заключается в подтверждении адекватности известных расчетных формул при определении геометрической и кинематической точности, статистической и динамической жесткости и испытания станка на технологическую надежность. На основе полученных аналитических и расчетных данных составлена упрощенная комплексная методика испытания металлорежущего станка при:

- испытании станка на холостом ходу;
- испытании станка при работе под нагрузкой;
- испытании станка на геометрическую и кинематическую точность;
- определение статистической и динамической жесткости;
- исследовании виброустойчивости вертикально-фрезерного станка;
- испытании станка на технологическую надежность.

Ключевые слова: станок металлорежущий, жесткость, виброустойчивость, надежность, измерения, испытания, точность.

ABSTRACT

Purpose. To analyze and check for adequacy the known calculation formulas in determining the geometric and kinematic accuracy, statistical and dynamic rigidity and testing the machine for technological reliability. To carry out comparative calculations to simplify the methodology of complex

tests of metal-cutting machines of the universal group. To select and improve the measuring equipment during the complex tests of the milling machine.

Methodology. The research is based on the use of analytical methods for calculating the static rigidity coefficient, additional calculation of the measuring instrument design due to the gear ratio, the angle of rotation of the lever and the theoretical error of the displacement mechanism based on the known probability distribution theorem.

Findings. The formulas of researches of the coefficient of static rigidity, the mechanism of the measuring device, the angle of rotation of the lever, the theoretical error of the mechanism of movement and the density of probability of distribution of the angle of the lever mechanism of the indicator of tangent type has been obtained.

Originality. The research has been carried out and the parametric relationship between the static rigidity coefficient in the design of the spindle assembly of the vertical milling machine with the error of the calculations of the design, the departure of the spindle cone and the location between the supports has been established. The values and functional dependences of the amplitude of oscillations on the maximum allowable spindle speeds and feed rates at which the surface roughness of the workpiece reaches the specified geometric limits has been obtained. It is experimentally confirmed that the parameters of the system of pre-planned repairs are directly related to the reliability of the machine. The resource on the accuracy of the machine determines the need for overhaul, and the repair period depends on the service life of parts and elements of the machine. The actual service life should be a multiple of the repair period, as the restoration of the part is planned during the current repair.

Practical value. The practical achievement of the obtained results is to confirm the adequacy of the known calculation formulas in determining the geometric and kinematic accuracy, statistical and dynamic rigidity and testing the machine for technological reliability. On the basis of the received analytical and settlement data was made the simplified complex technique of test of the metal-cutting machine during the:

- testing the machine at idle;
- testing of the machine when working under load;
- testing of the machine for geometric and kinematic accuracy;
- determination of statistical and dynamic rigidity;
- research of vibration-resistant vertical milling machine;
- testing of the machine for technological reliability.

Keywords: *metal-cutting machine, rigidity, vibration resistance, reliability, measurement, testing, accuracy.*