

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 103 с., 7 табл., 39 рис., 1 дод., 19 джерел.

Ключові слова: ТЕХНОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ, ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ, ДАТЧИК, ШПИНДЕЛЬНИЙ ВУЗОЛ, ВЕРСТАТ, ВІБРАЦІЇ, ТЕМПЕРАТУРА, ЗНОС ІНСТРУМЕНТУ, ПРУЖНІ ЗСУВИ, КОНТРОЛЬ.

Об'єкт дослідження – підвищення технологічної надійності багатоцільового верстата.

Метою проєкту є дослідження використання сенсорних технологій для підвищення надійності верстатного обладнання на підприємстві та розробка системи контролю вібрацій шпиндельного вузлу верстата Рісомат 60М.

Завданням проєкту було формулювання і розробка системи контролю і діагностики параметрів верстата, що визначають його надійність, та яка підвищуватиме надійність верстата.

Задачами дипломного проєкту є:

- огляд та аналіз показників, що впливають на технологічну надійність;
- огляд та аналіз засобів контролю показників;
- аналіз вузлів верстата, що найбільшою мірою впливають на показники точності і якості оброблюваних деталей;
- формування та розробка узагальненої системи контролю та діагностики за допомогою сенсорних технологій;
- розробка системи контролю вібрацій в шпиндельному вузлу.

Актуальність теми. Робіт в цій сфері проведено дуже мало. Хоча зусилля з аналізу надійності верстатів з ЧПК є значними в усьому світі, справжніх систем оцінки надійності та підвищення для верстатів з ЧПК в промисловості все ще мало. Дійсно, важко забезпечити ефективні підходи, для підвищення надійності. Рівень надійності верстатів з ЧПУ став вузьким місцем, яке стримує розвиток галузі.

АНОТАЦІЯ

Ключові слова: ТЕХНОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ, ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ, ДАТЧИК, ШПИНДЕЛЬНИЙ ВУЗОЛ, ВЕРСТАТ, ВІБРАЦІЇ, ТЕМПЕРАТУРА, ЗНОС ІНСТРУМЕНТУ, ПРУЖНІ ЗСУВИ, КОНТРОЛЬ.

Технологічна надійність металообробного обладнання залежить від багатьох факторів, її визначають чимало показників починаючи з вібрацій та температурних деформацій закінчуючи пружними зсувами та зносом інструменту. Моніторинг та контроль цих показників є фундаментальним кроком для підвищення технологічної надійності, а як наслідок продуктивності верстатного обладнання. В роботі було проаналізовано вплив конкретних показників на технологічну надійності, розглянуто обладнання для контролю та оцінки цих факторів, а також усунення або зменшення їх впливу на надійність верстата. Розглянуто вплив вібрацій динамічної системи шпиндельного вузлу на показники обробки. Була побудована 3D модель шпиндельного вузлу верстата Рісмах 60М. Проведено модальний та гармонічний аналіз на базі побудованої 3D моделі. Запропоновано варіант системи контролю вібрацій в шпиндельному вузлу верстата Рісмах 60М задля підвищення його надійності.

ABSTRACT

Keywords: TECHNOLOGICAL RELIABILITY, RELIABILITY INDICATORS, SENSOR, SPINDLE ASSEMBLY, MACHINE TOOL, VIBRATIONS, TEMPERATURE, TOOL WEAR, ELASTIC DISPLACEMENTS, CONTROL.

The technological reliability of metalworking equipment depends on many factors and is determined by a number of indicators ranging from vibrations and temperature deformations to elastic displacements and tool wear. Monitoring and control of these indicators is a fundamental step to improve technological reliability, and as a result, the productivity of machine tools. In the work the analyzes the impact of specific indicators on technological reliability, considers equipment for monitoring and evaluating these factors, as well as eliminating or reducing their impact on machine tool reliability. The influence of vibrations of the dynamic system of the spindle assembly on machining performance is considered. A 3D model of the spindle assembly of the Picomax 60M machine was built. A modal and harmonic analysis was carried out on the basis of the built 3D model. A variant of the vibration control system in the spindle assembly of the Picomax 60M machine is proposed to increase its reliability.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	9
1 Технологічна надійність металообробного обладнання та показники які впливають на технологічну надійність.....	11
1.1 Технологічна надійність та її значення.....	11
1.2 Показники які впливають на технологічну надійність.....	12
2 Огляд та аналіз засобів контролю за показниками.....	20
3 Огляд та аналіз вузлів верстатів в яких виконується контроль показників та методи контролю цих показників.....	29
3.1 Шпиндельний вузол та показники, що в ньому контролюються.....	29
3.2 Знос інструменту.....	32
3.3 Столи, поворотні столи.....	34
3.4 Пружні відтискання в зоні інструмент-заготовка.....	35
3.5 Револьверна головка.....	37
3.6 Приводи подач (ходовий гвинт, КГП), його точність позиціювання.....	39
4 Розробка узагальненої системи контролю та діагностики за допомогою сенсорних технологій для підвищення надійності металообробного обладнання.....	41
4.1 Формування та розробка системи контролю і діагностики параметрів верстата, що визначають його технологічну надійність.....	42
4.2 Зворотній зв'язок для усунення або компенсації похибок показників.....	46
5 Розробка системи контролю вібрацій в шпиндельному вузлу.....	51
5.1 Коливання в шпиндельному вузлу.....	51
5.2 Принцип роботи системи контролю вібрацій.....	55

5.3 Побудова 3D моделі шпиндельного вузлу верстата.....	58
5.4 Модальний аналіз шпиндельного вузлу.....	60
5.5 Гармонічний аналіз шпиндельного вузлу.....	66
5.6 Визначення критеріїв вибору датчика (акселерометра) та його вибір.....	70
5.7 Місце установки акселерометра в шпиндельному вузлу.....	78
5.8 Обладнання для збору та обробки даних.....	80
5.9 Поняття якості поверхні оброблюваної деталі.....	82
5.10 Поняття стійкості різального інструменту.....	85
5.11 Вплив вібрацій на стійкість різального інструменту та якість оброблюваної поверхні.....	87
5.12 Розробка алгоритму аналізу даних для роботи системи.....	91
5.13 Рекомендацій щодо зниження вібрацій.....	97
Висновок.....	99
Перелік джерел посилань.....	101
Додаток А Повна схема роботи системи контролю вібрацій в шпиндельному верстаті багатоцільового верстата Рісوماх 60М, для підвищення його технологічної надійності.....	103

ВСТУП

У сучасному конкурентному та швидко мінливому бізнес-середовищі забезпечення надійності обладнання на підприємстві має вирішальне значення для підтримки продуктивності та прибутковості. Вихід з ладу критичного обладнання може призвести до дорогих простоїв, втрати виробництва та шкоди репутації компанії. Отже, зростає попит на надійні та ефективні методи моніторингу та обслуговування обладнання для запобігання збоям.

Одним із підходів до підвищення надійності обладнання є використання сенсорної технології. Датчики можуть надавати дані про стан обладнання в реальному часі, дозволяючи завчасно виявляти потенційні проблеми та здійснювати профілактичне обслуговування. Сенсорна технологія також може забезпечити прогнозоване технічне обслуговування, коли технічне обслуговування обладнання виконується лише за необхідності на основі фактичного використання, а не за фіксованим графіком, таким чином зменшуючи витрати та час простою.

Робота зосереджена на дослідженні того, як технологію датчиків можна використовувати для моніторингу стану обладнання, прогнозування потенційних збоїв і оптимізації графіків технічного обслуговування, щоб скоротити час простою та збільшити термін служби обладнання.

Метою дипломного магістерського проєкту є дослідження використання сенсорних технологій для підвищення надійності верстатного обладнання на підприємстві та розробка системи контролю вібрацій шпиндельного вузлу верстата Ricomax 60M.

Задачами дипломного проєкту є:

- огляд та аналіз показників, що впливають на технологічну надійність;
- огляд та аналіз засобів контролю показників;

- аналіз вузлів верстата, що найбільшою мірою впливають на показники точності і якості оброблюваних деталей;
- формування та розробка узагальненої системи контролю та діагностики за допомогою сенсорних технологій;
- розробка системи контролю вібрацій в шпиндельному вузлу.

Очікуваним результатом цієї роботи є розробка системи на базі сенсорних технологій, яка буде підвищувати технологічну надійність металообробного обладнання, розуміння обмежень і проблем, пов'язаних із використанням сенсорної технології для підвищення надійності обладнання на підприємстві. Результати дадуть інформацію та рекомендації організаціям, які прагнуть запровадити сенсорну технологію для підвищення надійності обладнання та запобігання збоям.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА НАДІЙНОСТЬ МЕТАЛООБРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ПОКАЗНИКИ ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ТЕХНОЛОГІЧНУ НАДІЙНІСТЬ

1.1 Технологічна надійність та її значення

Почнемо з визначення самого поняття надійність. Надійність як властивість виробу зберігати свою працездатність в часі. Будемо розглядати працездатність, як стан виробу, за якого він здатний виконувати задані йому функції, зберігаючи значення заданих параметрів в границях, встановленими технологічною документацією. Надійність виробу – узагальнена властивість, яка включає в себе поняття безвідмовності та довговічності. Безвідмовність, як властивість виробу безперервно зберігати працездатність протягом деякого періоду часу або протягом деякого напрацювання. А довговічність, як властивість виробу зберігати працездатність до настання граничного стану, тобто протягом всього періоду експлуатації. [1].

В даній роботі будемо користуватись таким поняттям, як технологічна надійність бо саме вона є основною для металообробного обладнання.

Технологічна надійність – характеризується параметричними відмовами, тобто виходом контрольованих параметрів за допустимі межі. Найчастіше це показники точності і продуктивності обробки. На технологічну надійність верстата впливають різні шкідливі процеси, що протікають з різною швидкістю. Так вібрації, що виникають під час роботи верстата, характеризуються високою швидкістю зміни, вони тривають протягом часу циклу роботи верстата, припиняються при зупинці верстата і знову виникають в новому циклі обробки. Похибки верстата зумовлені цими явищами проявляються на самому початку роботи верстата. Одночасно з цим верстата характеризуються початковими похибками внаслідок недосконалої геометричної точності, погрішностей налаштування, пружних відтискань. Протягом часу безперервної роботи верстата починають проявлятися і

впливати на точність обробки процеси середньої швидкості, найбільш характерними з них є температурні деформації і зношування інструмента. В процесі тривалої роботи верстата починають проявлятися похибки, зумовлені протікання повільних процесів, таких як зношування, жолоблення, перерозподіл внутрішніх напружень, тощо [2].

Таким чином, в контексті параметричних показників і продуктивності технологічну надійність металообробного обладнання можна визначити як здатність обладнання постійно відповідати або перевищувати бажані стандарти продуктивності для заданого набору параметричних показників при мінімізації ризику відмови або простою.

1.2 Показники які впливають на технологічну надійність

Більш детально розглянемо чинники які впливають на технологічну надійність.

Вібрації можуть істотно впливати на технологічну надійність металообробних верстатів. Надмірна вібрація може спричинити ослаблення та зміщення, що призведе до передчасного зносу та пошкодження підшипників, шестерень та інших компонентів. Вібрації можуть виникати з різних джерел, зокрема:

- Дисбаланс обертових компонентів: це спричиняється нерівномірним розподілом маси та відцентрових сил, що призведе до вібрації та додаткового навантаження на компоненти машини.
- Неправильне взаємне розташування обертових валів або інших компонентів машини може спричинити нерівномірні сили та вібрацію.
- Коли частота власних коливань системи збігається з частотою збурювальної сили, що спричинить посилення вібрації та додаткове навантаження на компоненти машини.

- Сила різання, високі сили різання, що виникають під час обробки, можуть спричинити вібрацію в конструкції машини.

Вплив вібрації на машину може включати:

- Вібрація може спричинити неточності в процесі обробки, що призведе до того, що деталі не відповідають необхідним допускам і специфікаціям.

- Підвищений знос, вібрація може спричинити підвищений знос компонентів машини, скорочуючи термін їх служби та збільшуючи витрати на обслуговування.

- Зниження продуктивності, вібрація може призвести до збільшення часу простою, зниження продуктивності машини та впливу на графік виробництва.

Геометрична точність є найважливішим фактором, що визначає технологічну надійність металообробних верстатів. Геометрична точність означає здатність верстата підтримувати правильне положення та орієнтацію його рухомих частин відносно одна одної, що важливо для досягнення точних і повторюваних результатів обробки.

Порушення в геометричній точності, такі як зміщення, прямолінійність і площинність, можуть спричинити помилки в процесі обробки та знизити надійність верстата. Наприклад:

- Зміщення компонентів машини, таких як шпиндель і заготовка, може спричинити неточне позиціонування та обробку заготовки. Це може призвести до того, що деталі не будуть відповідати необхідним допускам і специфікаціям, зменшуючи надійність.

- Прямолінійність означає здатність машини підтримувати прямий і паралельний рух її компонентів. Неточності прямолінійності можуть спричинити нерівномірне зусилля різання та вібрацію, що призведе до передчасного зносу та пошкодження компонентів машини та інструментів.

- Площинність означає здатність машини підтримувати рівну поверхню. Неточності площинності можуть спричинити нерівномірний розподіл сил різання та вібрації, що призведе до неточних результатів обробки та зниження надійності верстата.

Наслідки похибок у геометричній точності на машині можуть включати:

- Похибки в геометричній точності можуть спричинити помилки в процесі обробки, що призведе до того, що деталі не відповідають необхідним допускам і специфікаціям.

- Підвищений знос, відхилення показників геометричної точності можуть спричинити передчасний знос і пошкодження компонентів машини та інструментів, збільшуючи витрати на обслуговування та скорочуючи термін служби машини.

- Зниження продуктивності, похибки в геометричній точності можуть призвести до збільшення часу простою, зниження продуктивності машини та впливу на графік виробництва.

Для підтримки технологічної надійності металообробних верстатів важливо регулярно перевіряти і підтримувати їх геометричну точність. Це включає належне вирівнювання та калібрування компонентів машини, а також регулярний моніторинг результатів обробки для виявлення та усунення будь-яких проблем до того, як вони призведуть до підвищеного зносу або простою.

Помилки в налаштуванні верстатів можуть істотно вплинути на технологічну надійність металообробних верстатів. Помилки налаштування верстата стосуються неточностей у налаштуванні та регулюванні важливих компоненті, таких як пристрій для утримання заготовки, ріжучий інструмент, режими обробки, тощо. Ці помилки можуть спричинити проблеми в процесі обробки та знизити надійність машини.

Помилки налаштування машини можуть вплинути на технологічну надійність машини:

- Знижена точність, помилки налаштувань машини можуть спричинити помилки в процесі обробки, що призведе до того, що деталі не відповідають необхідним допускам і специфікаціям. Ці помилки можуть бути спричинені неправильними корекціями інструменту, неправильним розташуванням заготовки або неправильними режимами обробки.
- Підвищений знос, помилки в налаштуванні машини можуть спричинити передчасний знос і пошкодження компонентів машини та інструментів. Наприклад, якщо різальний інструмент розміщено неправильно, це може спричинити нерівномірне зусилля різання та вібрацію, що призведе до передчасного зносу та пошкодження інструменту та машини.
- Зниження продуктивності, помилки в налаштуванні машини можуть призвести до збільшення часу простою та зниження продуктивності машини. Наприклад, якщо деталь розміщена неправильно, її може знадобитися переставити або переробити, що призведе до збільшення часу простою та зниження продуктивності.

Щоб звести до мінімуму вплив помилок налаштувань верстатів на технологічну надійність металообробних верстатів, необхідно переконатися, що компоненти верстатів правильно встановлені та налаштовані. Зводячи до мінімуму помилки налаштування машини, машина може працювати більш надійно, з підвищеною точністю, меншим зносом і підвищенням продуктивності.

Пружні відтискання вузлів верстатів можуть мати значний вплив на технологічну надійність металообробних верстатів. Пружні відтискання відносяться до деформації компонентів машини, спричиненої силами різання під час процесу обробки. Ці деформації можуть бути як тимчасовими, так і постійними, залежно від матеріалу та величини сил різання. Помилка пружних відтискань відноситься до відхилення фактичної деформації від очікуваної або бажаної деформації.

Похибка пружних відтискань вузлів верстата може вплинути на технологічну надійність верстата:

- Знижена точність, похибки зумовлені пружними відтисканнями можуть спричинити помилки в процесі обробки, що призведе до деталей, які не відповідають необхідним допускам і специфікаціям. Це може бути викликано до зміни відносного положення інструмента і заготовки.
- Підвищений знос, похибки зумовлені пружними відтисканнями можуть призвести до передчасного зносу та пошкодження компонентів машини та інструментів. Це може бути викликано деформацією ріжучого інструменту, що призводить до зміни його геометрії та підвищеного зносу.

Для мінімізації впливу похибки пружних відтискань вузлів верстата на технологічну надійність металообробних верстатів важливо використовувати правильні параметри різання, такі як швидкість різання, подача і глибина різання. Ці параметри можна оптимізувати для зменшення сил різання та мінімізації відхилень у деформації компонентів машини. Крім того, компоненти машини повинні бути виготовлені з матеріалів з високою жорсткістю та розроблені з функціями для мінімізації відхилень у деформації, такими як товщі стінки та посилені конструкції. Регулярний моніторинг результатів обробки та перевірка компонентів машини також може допомогти виявити та вирішити будь-які проблеми, спричинені пружними відтисканнями вузлів верстата, перш ніж вони призведуть до похибок розмірів та форми обробленої деталі та підвищеного зносу або простою.

Температурні деформації. Значний вплив на технологічну надійність металообробних верстатів можуть мати температурні деформації вузлів машин. Зміни температури можуть спричинити розширення або звуження компонентів машини, що може призвести до зміни розмірів, зсуву та зниження точності процесу обробки.

Вплив температурних деформацій компонентів машини на технологічну надійність машини:

- В першу чергу зумовлюють похибки обробки: розміру і форми, що призводить до втрати параметричної надійності верстата.
- Знижена точність, зміни температури можуть призвести до розширення або стиснення компонентів машини, що призводить до зміни розмірів у структурі машини. Це може вплинути на точність процесу обробки та призвести до того, що деталі не відповідають необхідним допускам і специфікаціям.
- Зміни температури також можуть спричинити підвищений знос компонентів машини та інструментів. Це може бути спричинено розширенням і звуженням компонентів машини, що призводить до збільшення напруги та деформації компонентів і ріжучого інструменту.

Регулярний моніторинг результатів обробки та перевірка компонентів машини може допомогти виявити та вирішити будь-які проблеми, викликані температурними деформаціями, перш ніж вони призведуть до зниження надійності обладнання.

Знос інструменту є природним явищем у металообробних верстатах і може мати значний вплив на технологічну надійність верстата. Вплив зносу інструменту на технологічну надійність верстата:

- Коли ріжучий інструмент зношується, його геометрія змінюється, що призводить до збільшення сили різання та зниження точності. Це може призвести до того, що деталі не відповідатимуть необхідним допускам і специфікаціям, що призведе до збільшення кількості браку та зниження продуктивності.
- Оскільки ріжучий інструмент зношується, його потрібно частіше замінювати або повторно заточувати, що призводить до збільшення часу простою верстата. Це може призвести до зниження продуктивності та збільшення витрат.

Щоб звести до мінімуму вплив зносу інструменту на технологічну надійність металообробних верстатів, важливо стежити за ріжучим

інструментом і замінювати або повторно заточувати його до того, як він досягне кінця свого терміну служби.

Зношеність базових деталей верстата – напрямних, шпиндельних опор, підшипників, механізму подачі – може істотно вплинути на технологічну надійність верстата. Знижується геометрична точність верстата, зростає піддатливість систем.

- Компоненти машини зношуються, вони можуть зміщуватися, що може призвести до зниження точності. Наприклад, якщо підшипники шпинделя зношуються, шпиндель більше не буде вирівняний із заготовкою, що може призвести до неточностей у процесі різання.

- Коли компоненти зношуються, вони можуть посилювати вібрацію, що може спричинити пошкодження інших компонентів машини. Наприклад, якщо підшипник зношений, він може посилювати вібрацію, що може призвести до пошкодження шпинделя або інших компонентів.

- Збільшення зазорів в сполученнях веде до зростання тепловиділення в рухомих парах та до збільшення температурних деформацій.

Виходячи з огляду показників які впливають на технологічну надійність металообробного обладнання можна зробити висновок, що усунення всіх перелічених факторів вимагає багатостороннього підходу, який передбачає регулярне технічне обслуговування, належне вирівнювання та балансування, ретельний моніторинг параметрів обробки, а також використання засобів та інших технологій для зменшення зносу та пошкоджень. Враховуючи ці фактори, можна забезпечити технологічну надійність металообробного верстата та мінімізувати час простою та витрати на технічне обслуговування.

В цій роботі будуть розглядатись такі показники, як вібрації, температурні деформації (зсуви), знос інструменту та пружні відтискання, тому що ці показники характеризуються високою (пружні відтискання) та середньою швидкістю (температурні деформації, знос інструменту) зміни, на

відміну від похибок зумовлених протіканням повільних процесів. Швидкоплинні процеси які впливають на відповідні показники можна контролювати в режимі реального часу, тому вони лежать в основі системи контролю та діагностики за допомогою сенсорних технологій для підвищення надійності металообробного обладнання.

2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЗА ПОКАЗНИКАМИ

Аналіз засобів контролю, що дозволяють контролювати показники, які визначають впливи на технологічну надійність. Аналізуються їхні характеристики, можливості застосування для контролю параметрів верстатів. Розберемо типи датчиків та які показники вони контролюватимуть.

Акселерометри (вібрації) – в основному виконаний у вигляді підвішеної на пружині (вільної чи сейсмічної) маси, рух якої відносно корпусу вимірюється. Корпус цього перетворювача кріпиться до об'єкта виміру і переміщається разом з останнім. Сейсмічна маса під дією інерції прагне зберегти свій стан спокою. Однак на масу через пружину діє сила, обумовлена рухом об'єкта. Сила інерції сейсмічної маси надто мала, щоб утримувати її в абсолютно нерухомому положенні, як це має місце в перетворювачах вібропереміщень. Сила інерції викликає відхилення маси, пропорційне квадрату частоти, тобто прямо пропорційне прискоренню. Воно може бути виміряне владнаним перетворювачем переміщень або за допомогою тензорезистора (деформація пружини). Для одержання можливо більш широкого діапазону робочих частот перетворювача прискорення його характеристична частота повинна бути по можливості високою (маса невеликою, пружина дуже жорсткою). Як і у вимірювальних перетворювачах вібропереміщень, оптимальне демпфування $D=0,65$. Діапазон робочих частот оптимально демпфованих систем знаходиться в межах від 0 до 60% від характеристичної частоти перетворювача [3].

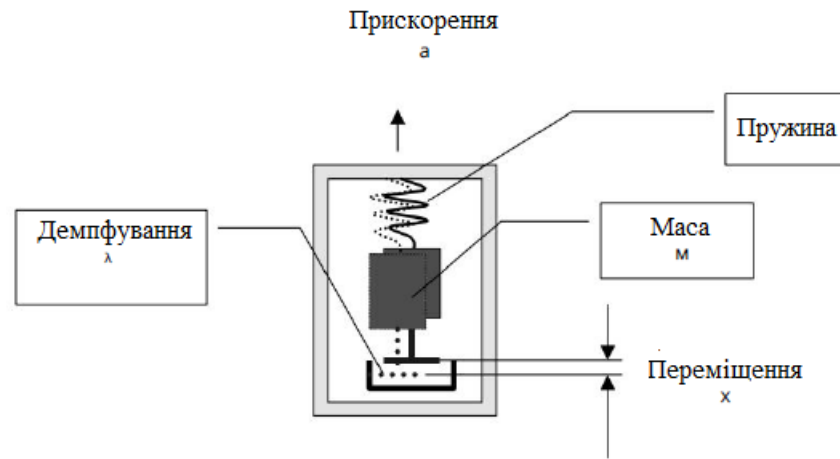


Рисунок 2.1 – Принцип роботи акселерометра

Тензодатчики (вібрації, температурні деформації, пружні відтискання) – це пристрої, у яких при розтягуванні або стисканні змінюється опір. Вони здатні виявляти дуже малі зміщення, як правило, і зазвичай використовуються як частина інших перетворювачів, наприклад, мембранних датчиків тиску, які перетворюють зміни тиску в малі переміщення діафрагми. Вимірювання похибки на рівні 0,15% повного зчитування є досяжними, а вказаний ресурс зазвичай становить три мільйони реверсів. Традиційний тип тензодатчика складається з металевого опорного дроту, складеного зигзагоподібним чином і встановлюється на гнучку підкладку, як показано на рисунку 2.2. Провідник є номінально круглого поперечного перерізу.

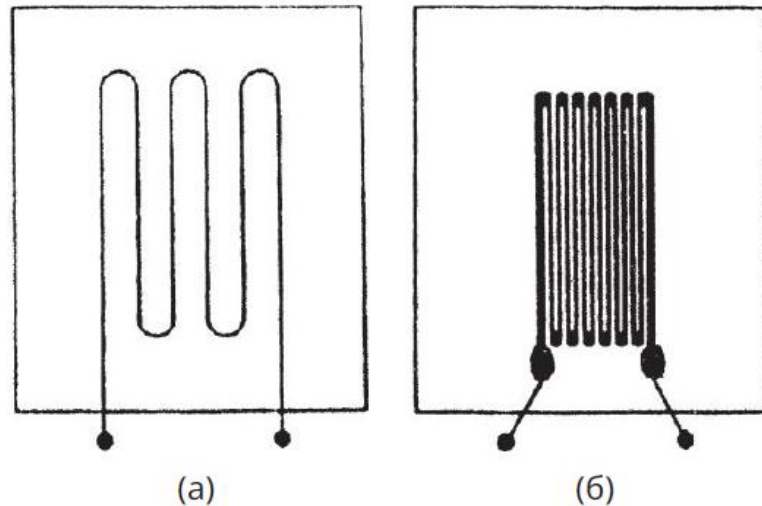


Рисунок 2.2 – Тензодатчики: а) дротяні та б) фольгові

Коли деформація прикладається до дроту, перетин дроту опору деформується, змінюючи площу поперечного перерізу. Співвідношення вхід-вихід тензодатчика виражається коефіцієнтом, який визначається як зміна опору (R) для заданого значення деформації (S), тобто калібрувальний коефіцієнт dR/dS [4].

Термонари (температура) – датчики термоелектричного ефекту засновані на фізичному принципі, коли будь-які два різні метали з'єднані між собою, утворюється ЕРС, яка є функцією температури з'єднання між металами. Загальна форма цього зв'язку така:

$$e = a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + \dots + a_n T^n, \quad (2.1)$$

де e – ЕРС яка генерується;

T – абсолютна температура.

Це явно не лінійно, що незручно для вимірювальних програм. На щастя, для певних пар матеріалів, члени, що включають квадрат і вищі

ступені T ($a_2 T^2$, $a_3 T^3$ тощо) приблизно дорівнюють нулю, а залежність ЕРС–температура приблизно лінійна відповідно до

$$e \approx a_1 T \quad (2.2)$$

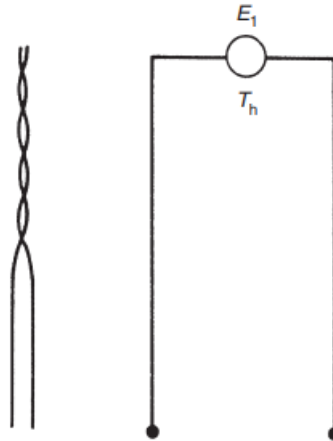


Рисунок 2.3 – Термопара

Дроти з таких пар матеріалів з'єднані разом на одному кінці, і в такому вигляді вони відомі як термопари. Термопари є дуже важливим класом пристроїв, оскільки вони забезпечують найбільш широко використовуваний метод вимірювання температури в промисловості [9]. Термопари виготовляються з різних комбінацій основних металів міді та залізо; сплави недорогоцінних металів алюмель (Ni/Mn/Al/Si), хромель (Ni/Cr), константан (Cu/Ni), нікросил (Ni/Cr/Si), нісил (Ni/Si/Mn), нікель-молібден і нікель-кобальт; благородні метали платина і вольфрам; і сплави благородних металів платина–родій, вольфрам–реній, і золото–залізо [4].

Термометри опору (температура) – для вимірювання температури використовують явище зміни електричного опору металів, електролітів та напівпровідників в залежності від температури. Термометри опору виділяються дуже високою точністю вимірювань (в разі дуже ретельних вимірювань можна отримати похибку не більшу $\pm 0,001$ K). За допомогою

термоелектричних термометрів таку чутливість вимірювань можна отримати лише в поєднанні з вимірювальними підсилювачами. Як матеріали для термометрів опору придатні лише ті, фізичні та хімічні властивості яких не змінюються протягом часу в діапазоні температур, що вимірюються. Опір такого матеріалу повинен добре відтворюватися і зі зміною температури монотонно знижуватися або підвищуватися. Температурний коефіцієнт опору термометра повинен бути якомога більшим, так само як і питомий електроопір для того, щоб термоприймач займав найменший об'єм [5].

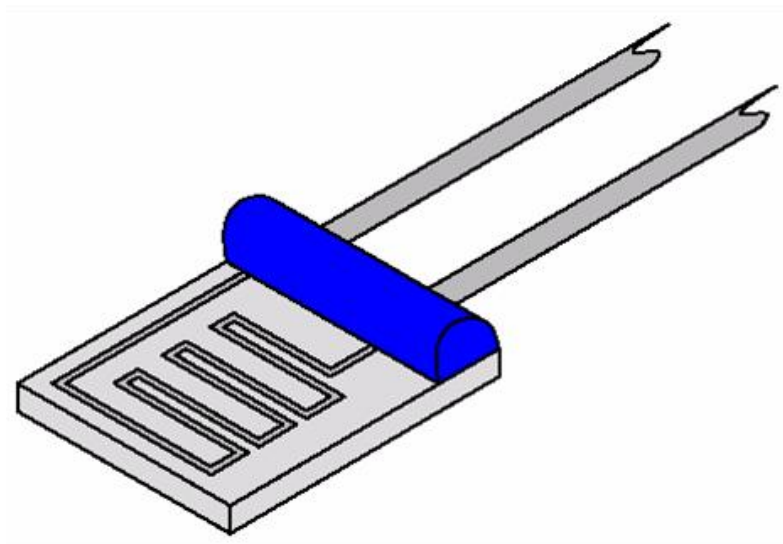


Рисунок 2.4 – Термометр опору

Датчики акустичної емісії (знос інструменту, пружні відтискання)

– акустична емісія являє собою явище генерації хвиль напружень, викликаних раптовою перебудовою в структурі матеріалу. Класичними джерелами АЕ є процес деформування, пов'язаний з ростом дефектів, наприклад, тріщини або зони пластичної деформації. Раптовий рух джерела емісії викликає виникнення хвиль напружень, які поширюються в структурі матеріалу і досягають перетворювача. У міру зростання напруги, активізуються багато з наявних в матеріалі об'єкта джерел емісії. Електричні сигнали емісії, отримані в результаті перетворення датчиком хвиль

напружень, посилюються, і реєструються апаратурою і піддаються подальшій обробці і інтерпретації.

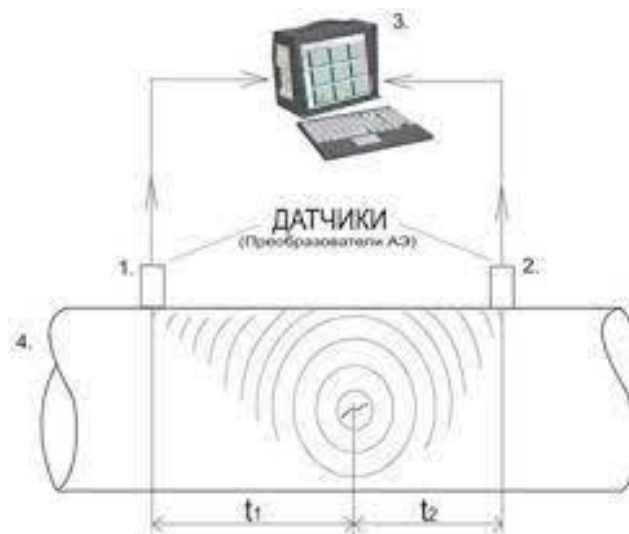


Рисунок 2.5 – Датчик акустичної емісії

Основним елементом АЕ резонансного датчика є п'єзоелектричний кристал, що перетворює механічний рух в електричний сигнал. Кристал поміщається в спеціальний корпус з денцем у вигляді пластинки і роз'ємом. Датчик збуджується хвилями напружень, що потрапляють на його денце, і перетворює їх в електричні сигнали. Ці сигнали надходять на розташований поблизу передпідсилювач, посилюються і на кінцевому етапі реєстрації надходять на основну вимірювальну і обробну апаратуру. Останнім часом для більшої зручності при установці і зниження чутливості до електромагнітних наведень, підсилювачі роблять мініатюрними і розміщують безпосередньо в корпусі датчика, отримуючи суміщений датчик-передпідсилювач.

Одним з основних вимог до датчика є його висока чутливість. І хоча в цілому високоякісними датчиками вважаються датчики, що володіють пласкою частотною характеристикою, в більшості практичних випадків найбільш чутливими, а тому кращими, є резонансні датчики, які, до того ж, є

більш дешевими. Ці датчики мають порівняно вузьку смугу частот, в якій відбувається основне коливання. Частотна смуга визначається в основному розміром і формою кристала. Частоти, що характеризують датчик, є домінуючими при утворенні форми і спектра АЕ сигналу [6].

Датчики сили різання (знос інструменту) – Для вимірювання складових сили різання використовують тензометричні, п'єзоелектричні та інші перетворювачі. Чутливі елементи для вимірювання сил різання у більшості випадків встановлюють на окремих частинах верстата. Власна частота чутливого елемента повинна бути вищою, щоб була можливість швидкого реагування на такі чинники, як врізання або різка зміна глибини різання. Для виміру сили різання датчик повинен розташовуватись якомога ближче до зони різання. Механічний передавальний пристрій, розташований між зоною різання та чутливим елементом, може негативно впливати на процес вимірювання сили різання. У той же час, якщо в опорах шпинделя верстата або на супорті встановлюються датчики, що вимірюють деформації, то відбувається деяке зниження жорсткості верстата.

Одним з цих методів є контроль стану інструмента за допомогою сило-вимірювальних підшипників, які використовують як чутливі елементи, з'єднані з підсилювачем та мікро ЕОМ. До недоліків методу можна віднести те, що сигнал від сили різання, наприклад при розточуванні, розвертуванні та чистовій обробці невеликими фрезами практично не виділяється на фоні перешкод.

Метод вимірювання сили різання за струмом у якорі двигуна привода подач знайшов широке застосовування в автоматизованому виробництві. Основною перевагою цього метода є порівняно просте контролювання діагностичного параметра.

При збільшенні сили різання зростає вживана верстатом потужність, тобто збільшується електричний струм у ланцюзі живлення електродвигуна головного приводу. На рис. 2.6 зображена схема дії струменевого датчика.

Діагностичний сигнал датчика пропорційний силі струму, яка, в свою чергу, пропорційна силі різання.

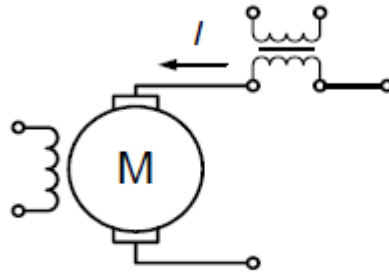


Рисунок 2.6 – Електрична схема струменевого датчика

Відомо також використання тензодатчиків, встановлених в опорі ходового гвинта приводу подач для контролю працездатності інструмента. Недоліком методу є нестабільність втрат на тертя у направляючих та вплив теплового розширення гвинта на точність вимірювань[7].

Лазерні інтерферометри (геометрична точність верстату) – лазерний інтерферометр є відносно недавньою розробкою, яка використовує лазерне джерело світла замість звичайного джерела світла, що використовується в стандартному інтерферометрі. Лазерне джерело значно розширює діапазон вимірювань приладу при збереженні такої самої роздільної здатності вимірювання, що й у стандартного інтерферометра. Особлива форма лазерного інтерферометра, показаного на рисунку 2.7, двох частотний гелій-неоновий. Використовується (He-Ne) лазер, який дає вихідну пару світлових хвиль з номінальною частотою $5 \cdot 10^{14}$ Гц. Дві хвилі відрізняються за частотою на 2106 Гц і мають протилежну поляризацію. Ця двох частотна вихідна форма сигналу розділена на вимірювальний промінь і опорний промінь першим світлорозділювачем. Опорний промінь сприймається поляризатором і фотодетектором А, який перетворює обидві хвилі у світлі до тієї ж поляризації. Дві хвилі конструктивно інтерферують і

деструктивно по черзі, створюючи світлотемряве мерехтіння з частотою 2106 Гц. Це збуджує електричний сигнал 2 МГц у фотодетекторі.

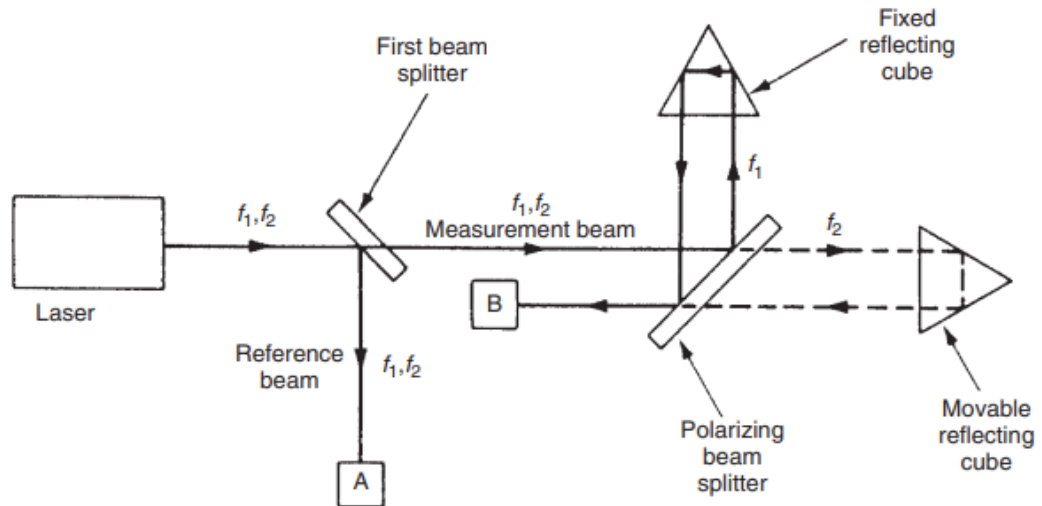


Рисунок 2.7 – Схема роботи лазерного інтерферометра

Вимірювальний промінь розділений на дві складові частоти за допомогою поляризації дільник променю. Світло першої частоти, f_1 , відбивається нерухомим відбиваючим кубом у фотоприймач і поляризатор В. Світло другої частоти f_2 відбивається, а рухомий відбиваючий куб, а також входить у В. Застосовується переміщення, яке потрібно виміряти до рухомого куба. Коли рухомий куб знаходиться в нульовому положенні, світлові хвилі, що входять до В, виробляють вихідний електричний сигнал із частотою 2 МГц, що є тією самою частотою як опорний сигнал, виведений з А. Будь-яке зміщення рухомого куба викликає Доплерівський зсув частоти, f_2 , і змінює вихід з В. Частота вихідний сигнал з В змінюється між 0,5 і 3,5 МГц відповідно до швидкості та напрямку руху рухомого куба. Виходи з А і В посилюються та віднімаються. Результуючий сигнал подається на лічильник, вихід якого показує величину переміщення в рухомому кубі і швидкість зміни якого вказує на швидкість руху [8].

3 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВУЗЛІВ ВЕРСТАТІВ В ЯКИХ ВИКОНУЄТЬСЯ КОНТРОЛЬ ПОКАЗНИКІВ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЦИХ ПОКАЗНИКІВ

Виходячи з того, що було визначено основні чинники які впливають на технологічну надійність. Був проведений огляд роботи та конструктивні особливості, поверхневий аналіз датчиків які можна використовувати для контролю потрібних показників. Тепер треба визначитись з тим в яких частинах чи вузлах верстата з ЧПК буде проводитись контроль цих показників.

3.1 Шпиндельний вузол та показники, що в ньому контролюються

Шпиндельний вузол, як дуже складний динамічний елемент верстатів, які є фундаментальними для ЧПК верстатів. Показники цього вузла, які впливають на надійність є дуже важливими та впливають на ефективність виробництва та стабільність обладнання. Класично головні шпинделі приводилися в рух ременями або шестернями, а швидкість обертання могла змінюватися лише шляхом зміни передавального числа або кількості ведених полюсів за допомогою електричних перемикачів. Постійний розвиток підшипників, мастила, матеріалів елементів кочення та систем приводу (двигуни та перетворювачі) дозволив створювати шпинделі двигунів з прямим приводом, які наразі відповідають широкому діапазону вимог.

В шпиндельному вузлу важливо контролювати такі показники, як вібрації, температуру та температурні деформації. Шпиндельний вузол нагрівається в наслідок тепловиділення в опорах шпинделя, так як шпиндель обертається на високих частотах то це неминучий процес, в опорах в

наслідок сил тертя виникає підвищення температури, слід зазначити, що підвищення температури нерівномірне і різне в різних частинах, що і веде до температурних деформацій цього вузлу.

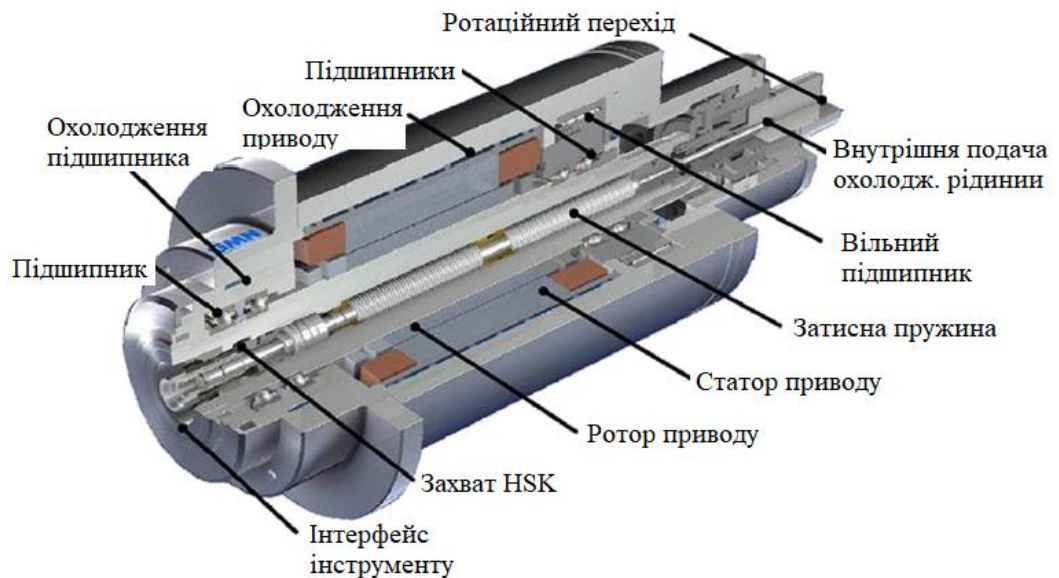


Рисунок 3.1 – Типовий мотор-шпиндель

Основними причинами вібрацій в цьому вузлу можна вважати власне процес різання, змушені коливання від врізання і виходу різальної кромки, особливо фрезерування. Також вібрації можуть викликатися автоколиваннями.

Вібрації в шпиндельному вузлу також можуть виникають під впливом тих же температурних деформацій, які ведуть до дисбалансу вузла та виникненню коливань, також вони можуть виникнути в разі нерівномірно розподілених тримачів інструментів або заготовок дисбаланс викликає відцентрові сили, які призводять до вібрації під час обертання.

Для вимірювання температурних деформацій у шпиндельному вузлу, викликаних тепловим розширенням, доцільно вимірювати температуру

характерних точок і аналізувати їх вплив на деформації. Такий підхід дозволяє практично й ефективно оцінювати термічну поведінку шпиндельного вузла. Відстежуючи температуру в певних точках і аналізуючи відповідне теплове розширення, можна оцінити результуючі температурні деформації.

Процес передбачає встановлення датчиків температури, таких як термопари або резистивні датчики температур, у критичних місцях шпиндельного вузла, в елементах його конструкції, які формують температурні зсуви шпинделя. Вимірюючи температуру в цих точках, можна отримати дані про термічні умови шпиндельного вузла.

Далі аналізуємо взаємозв'язок між виміряними температурами та результуючим тепловим деформаціями. Знаючи теплові властивості матеріалів з яких складається шпиндельний вузол, а також умови теплообміну, що визначатиме надмірну температуру. Використовуючи цю інформацію, встановлюємо кореляції між змінами температури та деформаціями, що виникають у результаті.

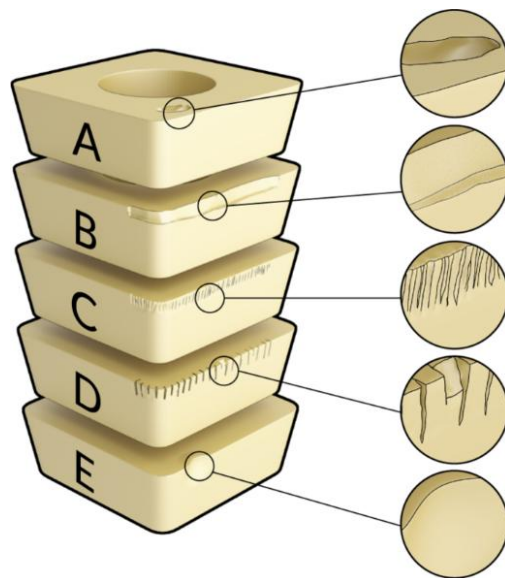
Контроль вібрацій може бути здійснений за допомогою датчиків акселерометрів. На основі конкретних вимог, таких як діапазон вимірювання, частотна характеристика, чутливість і варіанти кріплення обираємо акселерометр.

Встановлення акселерометрів у шпиндельному вузлу у відповідних місцях, які мають бути близько до критичної області, підшипник шпинделя або тримача інструменту (заготовки). Акселерометр повинен бути надійно прикріплений і правильно вирівняний у напрямку вимірювання. Обов'язкове калібрування, щоб забезпечити точні та надійні вимірювання.

3.2 Знос інструменту

Контроль стану інструменту. Знос інструменту є важливим чинником впливу на технологічну надійність, так як від нього залежить точність обробка деталі, її форми та якості.

Зношування інструменту відбувається, коли ріжучий інструмент взаємодіє з деталлю під час обробки. Це відбувається через такі фактори, як тертя, сили різання, температура, властивості матеріалу інструменту, умови та режими різання. Сила тертя та різання спричиняють поступове видалення матеріалу з інструменту, тоді як високі температури та неправильні умови різання можуть прискорити знос.



A – кратерний знос, B – зношування бокової частини, C – зношення надрізів, D – гребінчасті тріщини, E – пластична деформація.

Рисунок 3.2 – Знос ріжучого інструменту (пластини).

Вплив зносу інструменту на технологічну надійність верстата суттєвий. Зношені інструменти призводять до зниження продуктивності різання, включно зі зниженням швидкості видалення матеріалу та поганою обробкою поверхні. Вони вимагають більшої сили різання, що може збільшити навантаження на компоненти машини та призвести до вібрації.

Тож таке явище, як знос інструменту вкрай важливо контролювати, для підтримки технологічної надійності верстату. Для цього можна використовувати датчики контролю сили різання, так як її зміна вказує на знос інструменту. Або датчики які безпосередньо контролюють знос інструменту.

Для вимірювання сили різання можна скористатись результатами вимірювання сили струму на якорі двигуна головного приводу. У цьому випадку сила струму пропорційна або потужності, або крутним моментом електродвигуна. Контроль стану інструмента під час навантаження шпинделя здійснюється шляхом порівняння фактичної сили струму з попередньо введеною в пам'ять значенням, отриманим під час навчання. У системах контролю стану інструмента, контроль струму поєднується з контролем часу різання. До недоліків цього методу можна віднести низьку швидкість реакції через інерцію приводу, обмежену чутливість до поломок кінцевого інструмента малого діаметру, значні коливання потужності, використовуваної на холостому ході, та залежність цієї потужності від швидкості обертання шпинделя, а також низьку чутливість при використанні редуктора в приводі.

Контроль зносу інструменту можна виконувати за допомогою акустичних перетворювачів. Сигнали, які виникають при відпрацюванні енергії під час пластичної деформації та руйнування в процесі різання, сприймаються та поширюються у різальному інструменті та заготовці. Перевагою акустичних перетворювачів є їх висока частотність сигналів, що дозволяє ефективно фільтрувати низькочастотний шум за допомогою стандартних фільтрів. Крім того, вони легко кріпляться до інструменту та

мають просту конструкцію. При критичному зносі інструменту, інтенсивність акустичного сигналу та його розсіювання різко збільшуються.

Отриманий сигнал від цього датчика підлягає обробці для визначення ступеня зносу інструменту, її можна здійснити за допомогою вібро-акустичної системи на базі мікропроцесора або з використанням ЕОМ.

3.3 Столи, поворотні столи

Якщо розглядати багатоцільові верстати вони також потребують контроль вібрацій в зоні столів, поворотних столів. Вібрація в цих областях може значно вплинути на точність процесу обробки. Надмірна вібрація може спричинити зміщення заготовки чи інструменту, що призведе до помилок у розмірах, дефектів поверхні та зниження загальної якості обробки. Також вона може спричинити динамічні сили та навантаження на компоненти машини, потенційно призводячи до передчасного зносу, втоми або навіть пошкодження конструкції. Контролюючи вібрації, підвищується стабільність і довговічність машини.

Тому для контролю цього показника в цій зоні потрібне встановлення відповідних датчиків. Акселерометри, можливо тензодатчики. Треба враховувати такі фактори, як діапазон вимірювання, чутливість, частотна характеристика та варіанти монтажу. Характерні точки встановлення повинні обиратись відповідно враховуючи конструктивні особливості верстата. Проводиться калібрування датчиків, щоб забезпечити точні та надійні вимірювання.

3.4 Пружні відтискання в зоні інструмент-заготовка

Пружні відтискання в зоні контакту інструмента та заготовки мають істотний вплив на технологічну надійність верстата, тому цей показник теж підлягає контролю. Як варіант його можна контролювати за допомогою сили різання, так як сила різання безпосередньо впливає на їх величину. Її можна контролювати встановленням датчика вимірювання струму в якорі двигуна приводу головного руху, там контролюється сила різання для вияву зносу інструменту.

Також контроль цього показника можна здійснювати за допомогою датчиків акустичної емісії. Датчики акустичної емісії (АЕ) можуть бути використані для моніторингу та контролю пружних відтискань у зоні контакту інструменту та заготовки під час обробки. Датчики акустичної емісії призначені для виявлення та вимірювання високочастотних сигналів, що генеруються різними джерелами, такими як виділення пружної енергії під час деформації матеріалу або утворення мікротріщин у заготовці. Ці сигнали зазвичай знаходяться в ультразвуковому діапазоні (вище 20 кГц) і можуть надати цінну інформацію про стан контактної зони.

Самі датчики доцільно розташовувати в безпосередній близькості від зони контакту або критичних зон. Конкретне розміщення залежить від процесу обробки та характеру пружних відтискань, що контролюються. Датчики повинні бути встановлені надійно та таким чином, щоб мінімізувати перешкоди від навколишнього шуму.

Сигнали, що фіксуються датчиками акустичної емісії, аналізуються для вилучення важливої інформації, пов'язаної з наявністю та характеристиками пружних відтискань. Методи обробки сигналів, такі як фільтрація, підсилення та виділення ознак, застосовуються для виділення та аналізу відповідних сигналів АЕ. Удосконалені алгоритми та методи

розпізнавання можна використовувати для ідентифікації конкретних значень, пов'язаних із пружними відтисканнями.

Можна встановити порогові рівні на основі проаналізованих сигналів АЕ. Ці порогові значення вказують на прийнятний діапазон пружних відтискань, за межами якого можуть знадобитися коригувальні дії. Шляхом постійного моніторингу сигналів АЕ і порівняння їх із встановленими пороговими значеннями можна виявити відхилення або аномалії, що сигналізує про наявність надмірних або небажаних відтискань.

Якщо сигнали АЕ вказують на наявність проблемних пружних відтискань, можна вжити відповідних коригувальних заходів. Використовуючи датчики акустичної емісії та аналізуючи отримані сигнали, стає можливим виявляти та контролювати появу пружних відтискань. Ця інформація може бути використана для прийняття обґрунтованих рішень і вжиття проактивних дій для контролю та оптимізації процесу обробки, гарантуючи, що відтискання знаходяться в прийнятних межах, і мінімізуючи їх негативний вплив на продуктивність обробки та якість заготовки.

Також як ще один із методів контролю пружних відтискань можна використовувати датчики вібрації, такі як акселерометри.

Акселерометри чутливі до вібрації та можуть вимірювати динамічне прискорення конструкції верстата під час обробки. Прикріпивши акселерометри в зоні контролю, наприклад поблизу зони контакту або на критичних компонентах, можна зафіксувати вібрації, пов'язані з пружними відтисканнями. Під час процесу обробки наявність пружних відтискань може призвести до збільшення вібрацій у структурі верстата. Відстежуючи вібрації за допомогою акселерометрів, стає можливим виявити будь-які аномальні або надмірні рівні вібрації. Відхилення від нормальних моделей вібрації можуть вказувати на появу небажаних відтискань.

Акселерометри можуть фіксувати вібрацію в діапазоні частот. За допомогою методів частотного аналізу, таких як швидке перетворення Фур'є, вібраційні сигнали можна розкласти на їхні частотні компоненти. Цей аналіз

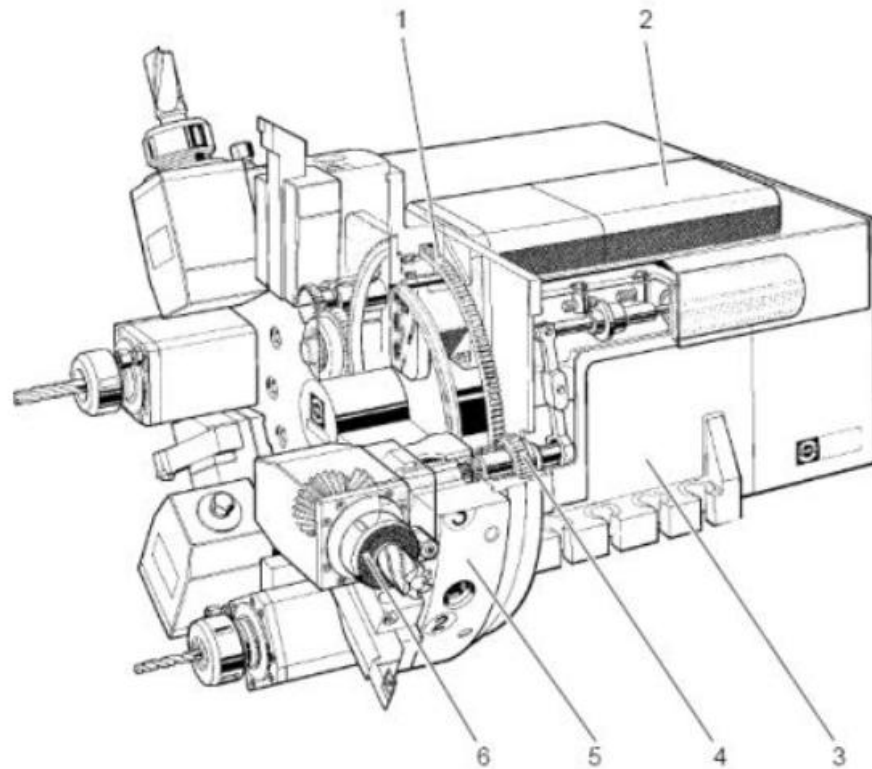
дозволяє визначити конкретні діапазони частот, які відповідають наявності пружних відтискань.

Шляхом встановлення базових сигнатур вібрації або еталонних даних для верстата за оптимальних умов можна порівняти виміряні вібрації з цими еталонними даними. Значні відхилення від довідкових даних можуть свідчити про наявність відтискань і надавати можливість для коригувальних дій.

Використовуючи акселерометри, стає можливим вимірювати та контролювати вібрації, пов'язані з пружними відтисканнями під час обробки. Потім ця інформація може бути використана для ідентифікації та контролю наявності цього явища, забезпечуючи оптимальні умови обробки та мінімізуючи негативний вплив на якість заготовки та надійність верстата.

3.5 Револьверна головка

Також слід приділити увагу такому вузлу, як револьверна головка з приводним інструментом. Вона може чинити вплив на показники технологічної надійності. Так як в конструкції використовується приводний інструмент, а він обертається, можуть виникати тепловиділення, як наслідок температурні зсуви які негативно впливають на обробку. Вібрації, які, в основному можуть виникнути за рахунок процесу різання. Вони беззаперечно впливають на якість та точність процесу обробки. Тому контроль цих показників є важливою складовою для підвищення надійності.



1 – циліндрична зубчаста передача, 2 – приводний двигун інструмента, 3 – базова револьверна головка, 4 – з'єднання з інструментом, 5 – інструментальний диск, 6 – інструмент

Рисунок 3.3 – Інструментальна дискова револьверна головка з приводом інструмента (осьове виконання),

Для контролю температури та вібрацій можна використовувати аналогічно з шпиндельним вузлом, встановлення датчиків температури (термопари, резистивні датчики температур) в характерні зони револьверної головки, з подальшим контролем, збором даних та аналізом їх впливу. Також встановленням акселерометрів, як датчиків вібрацій, у відповідних місцях, які мають бути близько до критичної області.

3.6 Приводи подач (ходовий гвинт, КГП), його точність позиціювання

Точність обробки на металорізних верстатах істотно залежить від точності позиціювання приводів подач, як наслідок вплив на технологічну надійність, в яких значну роль відіграють кулькові гвинтові передачі. Точність позиціювання гвинтової передачі визначається багатьма факторами, в цій роботі я приділяю увагу саме тепловим зсувам від нагріву гвинта. Особливо якщо ходовий гвинт працює на значній швидкості та має великі розміри, тобто довгий.

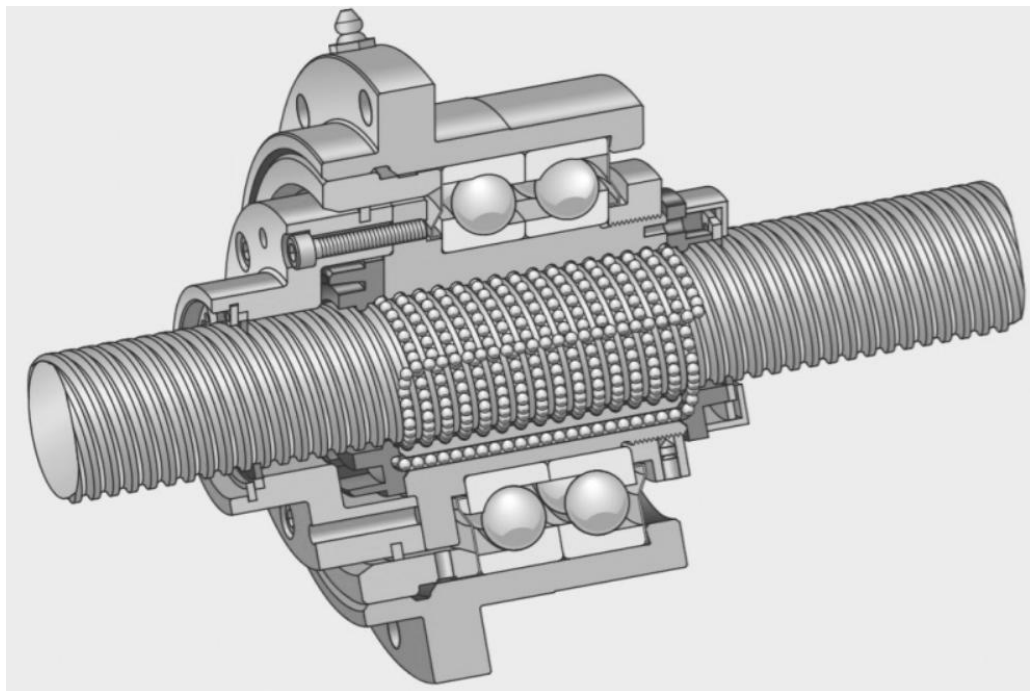


Рисунок 3.4 – Кулькова гвинтова передача

Контроль температури в характерних точках ходового гвинта і аналіз її впливу на зсуви можна виконати аналогічно контролю та аналізу температурних деформацій в шпиндельному вузлу. Встановлення датчиків температури, таких як термопари або резистивні датчики температур, в характерних точках ходового гвинта, в елементах його конструкції, які

формують температурні зсуви. Відстежуючи температуру в певних точках і аналізуючи відповідне теплове розширення, після чого оцінка результуючих температурних зсувів.

В таблиці 3.1 наведені датчики для здійснення контролю, зони в яких відбуватиметься контроль, та показники які контролюються, для підвищення технологічної надійності.

Таблиця 3.1 – Датчики для контролю показників технологічної надійності.

Датчики	Зона контролю	Показники
Термопари, резистивні датчики температури, акселерометри	Шпиндельний вузол	температура та вібрації
Датчики сили струму, акустичні перетворювачі	Інструмент	знос інструменту
Акселерометри, тензодатчики	Столи та поворотні столи	вібрації
Датчики сили струму, датчики АЕ, акселерометри	Інструмент-заготовка	пружні відтискання
Термопари, резистивні датчики температури, акселерометри	Револьверна головка з приводним інструментом	температура та вібрації
Термопари, резистивні датчики температури	Ходові гвинти КГП (кулькова гвинтова передача)	температура

4 РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕТАЛООБРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ

Перш за все хочеться помітити, що в цій роботі зупинимо увагу на такому типі верстатів, як багатоцільові верстати з ЧПК. Багатоцільові верстати з ЧПК, є вдосконаленими виробничими верстатами, які поєднують можливості кількох верстатів в одній системі. Ці машини використовують комп'ютеризоване керування для точної автоматизації різних операцій, таких як розточування, свердління, зенкування, розгортання фрезерування, тощо. Він включає в себе різні різальні інструменти, такі як свердла, фрези, токарні інструменти, що дозволяє виконувати різноманітні операції обробки однієї заготовки.

Багатоцільові верстати з ЧПК можуть бути оснащені змінними інструментальними головками або пристроями для зміни інструментів, що забезпечує швидкий і плавний перехід між різними операціями обробки. Ця гнучкість дозволяє виробляти широкий спектр компонентів або продуктів в рамках однієї установки машини, усуваючи потребу в окремих спеціалізованих машинах і скорочуючи час і витрати виробництва.

Багатоцільові верстати з ЧПК поєднують переваги автоматизації, універсальності та точності для оптимізації виробничих процесів, підвищення продуктивності та створення складних і індивідуальних продуктів для багатьох галузей. Приклад багатоцільового верстата наведений на рис. 4.1.

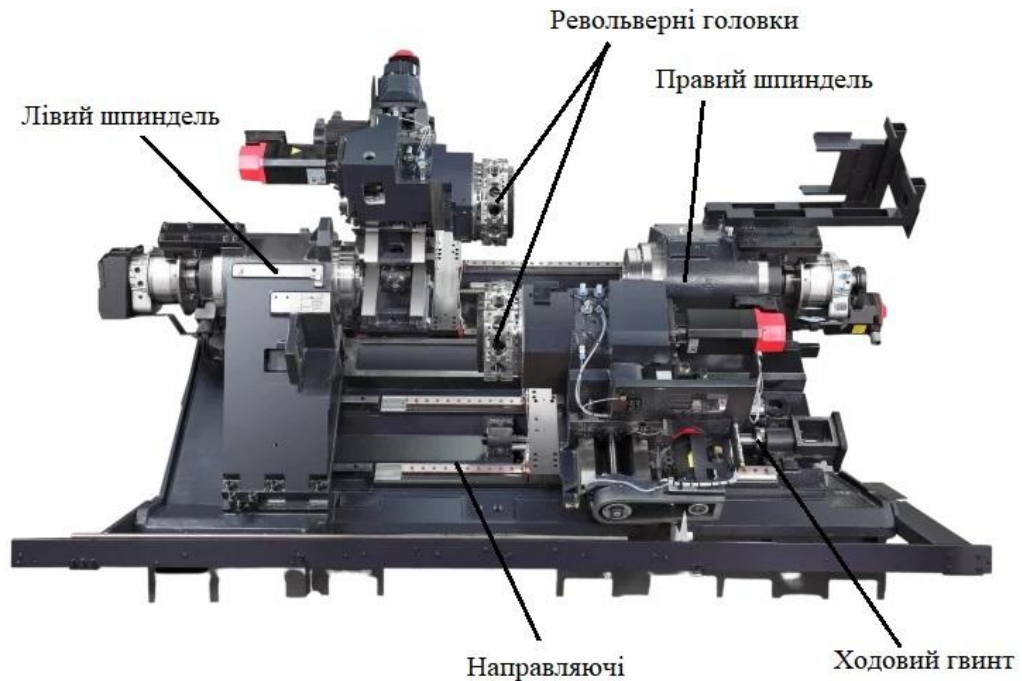


Рисунок 4.1 – Багатоцільовий верстат з ЧПК Puma TT1800SY

4.1 Формування та розробка системи контролю і діагностики параметрів верстата, що визначають його технологічну надійність.

На рис. 4.2 наведена схема роботи сенсорної системи для підвищення технологічної надійності верстата.

На схемі видно, що з відповідних зон верстата відбувається збір даних, дані надходять в блок аналізу. В цьому блоці дані з датчиків, тобто сигнали, підлягають аналізу різними методами, після того як дані проаналізовано, вони оцінюються впливом на надійність, якщо якісь показники виходять за норму допустимого, що спричиняє похибки, то вмикається зворотній зв'язок, який передбачає усунення або компенсацію похибок які створилися в відповідних вузлах верстата. Також запроваджено сигнали тривоги та сповіщення в реальному часі, щоб повідомляти

операторів або систему керування машиною про критичні рівні показників які вимірюються. Порогові значення можна встановити на основі прийнятних обмежень, і коли ці межі перевищено, можна запуснути відповідні дії. Це може включати призупинення процесу обробки, зміну умов різання або запуск процедур технічного обслуговування, щоб запобігти подальшому негативному впливу на надійність і продуктивність. Якщо аналіз даних не виявляє негативного впливу показників на технологічну надійність то верстат працює в режимі нормальної роботи.

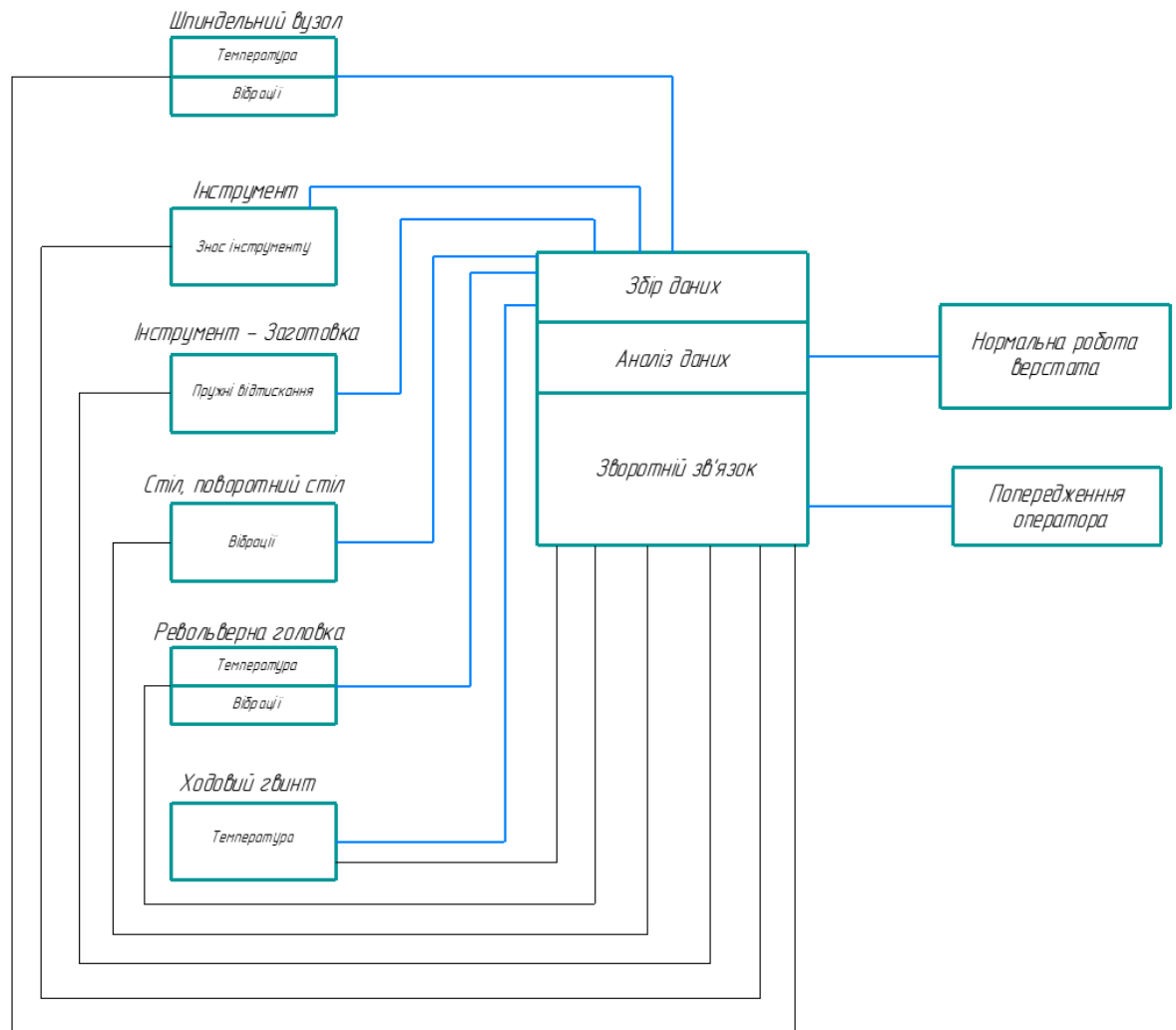


Рисунок 4.2 – Схема роботи сенсорної системи з підвищення надійності

Збір даних системи.

Перш за все збір даних починається з попередньої обробки сигналів які надходять з датчиків. Так як аналоговий сигнал від датчиків не бажано підключити безпосередньо до аналого-цифрового перетворювача. Обробка може включати такі етапи, як підсилення отриманого сигналу, перед перетворенням у цифрову форму. Спочатку відбувається буферне підсилення, яке має не великий коефіцієнт підсилення, тому що максимальне підсилення і подальші етапи обробки можуть спотворитись та призвести до оманливої оцінки даних.

Подальшим етап це фільтрування, аналоговий сигнал слід відфільтрувати, щоб утримувати його в діапазоні частотної характеристики датчика, придушивши високочастотний шум або безперервні зміщення, фільтрування низьких частот і використання смугових фільтрів, які використовуються відповідно до смуги частот сигналу який надходить.

Далі можна застосувати такий етап, як нормалізація, цей етап передбачає перетворення сигналів в логічний рівень зі збереженням їх амплітуди в незмінному співвідношенні. Ця процедура застосовується після буферного підсилення та фільтрації, щоб нормалізувати їх масштаб для процесу ідентифікації. Необроблені дані до нормалізації підлягають застосуванню деяких коефіцієнтів рівнянь, щоб зменшити їх значення до визначеного рівня. Після такого підходу існуючі дані стають готовими для подальшої обробки.

Наступним етапом можна виконати усунення шуму. Процес спрямований на видалення небажаної або непотрібної інформації для чіткого опису. Порогове визначення є найкращим методом усунення шумів, шляхом розрізнення бажаного сигналу від небажаного шуму на основі їх амплітуди або рівнів інтенсивності.

Далі відбувається підсилення сигналу, для найвищої можливої точності, сигнал зазвичай посилюється так, щоб максимальний діапазон напруги сигналу дорівнював максимальному діапазону вхідного сигналу

АЦП. Цифровий сигнал також часто піддають попередній обробці, наприклад цифровій фільтрації, яка зменшує смуги частот, не пов'язані з процесом, показником, що контролюється, або витягує інформацію необхідну для певних етапів розпізнавання.

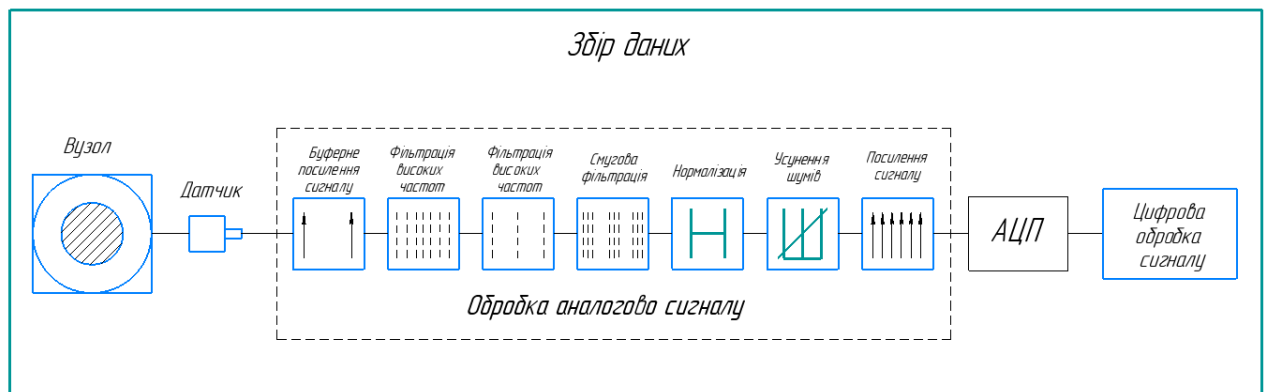


Рисунок 4.3 – Схема збору та обробки даних (сигналів) з відповідних датчиків

Аналіз даних.

Після того, як дані з датчиків буде зібрано та попередньо оброблено, можна приступити до їх аналізу для подальшої роботи системи. Піддавати дані аналізу можна такими методами, як:

- **Статистичний аналіз.** Середнє значення, дисперсія, асиметрія та ексцес є основними компонентами статистичного аналізу. Ці фактори надають чудову інформацію про дані та їх розподіл відповідно до часової або частотної області. Середнє визначає центральну тенденцію розподілу за усередненими даними. Дисперсія досягнення відхилення від середнього значення, яке застосовується при механічній обробці як аналіз у статистичному методі. Асиметрія пояснює асиметричну тенденцію даних. І, нарешті, ексцес ідентифікує жирність і піковість одночасно для розподілених даних.

- **Аналіз Фур'є.** Аналіз Фур'є використовує перетворення рівнянь для розкладання функцій на основі просторових або часових частот. Основною метою тут є отримання частотного простору сигналів за допомогою рівнянь перетворення Фур'є. Це широко відомий метод у аналізі механічної обробки, особливо для вібрації, сил різання та сигналів акустичної емісії.
- **Вейвлет-аналіз.** Необхідно вибрати головну або більше відому як ключову функцію для розкладання сигналу на пакети у формі масштабованого та зміщеного в вейвлет-аналізі. Вейвлет-аналіз здатний показувати сигнали як у часовому, так і в частотному представленні. Вейвлет визначає коливальну хвилю у вигляді зростаючої та спадної кривої, яка виконується для отримання корисних властивостей від цього переходу.
- **Моделювання часових рядів.** Моделювання часових рядів — це підхід до обробки даних, який також використовується в статистиці та багатьох галузях. Основний підхід тут полягає в тому, щоб зібрати дані в певний і рівномірний час і представити їх як дискретний час. Це водночас модель, яка дозволяє передбачити невідомі точки на часовому графіку. Особливо для блоків великих даних аналіз часових рядів забезпечує простий підхід. Датчики, які використовуються в обробці, можуть видавати тисячі даних протягом короткого часу. Таким чином, цей метод може бути успішним у застосуванні багатьох сигналів датчиків в операціях обробки.

4.2 Зворотній зв'язок для усунення або компенсації похибок показників

Усунення або компенсація похибок, що і передбачає зворотній зв'язок є основною складовою цієї системи, так як саме це слугує зерном підвищення технологічної надійності обладнання. Для різних вузлів та різних показників

які впливають на надійність багатоцільового верстата повинен відбуватись свій зворотній зв'язок.

Шпиндельний вузол.

Після збору даних з датчиків температури в цьому вузлі та подальшій обробці їх, аналізу, якщо значення температур негативно впливає на точність обробки створюючи температурні зсуви то виконуючи зворотній зв'язок треба впливати на ці значення.

Пропонується реалізувати методи температурної компенсації. Це передбачає налаштування параметрів обробки, таких як швидкість різання, швидкість обертання шпинделя на основі вимірної температури. Алгоритм компенсації можна розробити на основі емпіричних даних або математичних моделей, які описують взаємозв'язок між температурою та тепловим розширенням елементів шпиндельного вузлу. Ця методика дозволяє в режимі реального часу підтримувати стабільні умови обробки, незважаючи на коливання температури.

Щодо вібрацій, якщо враховувати основні причини виникнення вібрацій в шпиндельному вузлу то найкращим рішенням для зворотного зв'язку буде регулювання параметрів різання, зміна швидкості різання, швидкості подачі та глибини різання, щоб уникнути нестабільних умов різання, які можуть викликати та посилювати вібрацію. Таким чином на основі даних про вібрацію в реальному часі система може мінімізувати негативний вплив вібрації на точність обробки та якість поверхні.

Знос інструменту.

Зворотній зв'язок для поліпшення цього показника може використовувати методи описані нижче.

Одним із способів компенсації зносу інструменту є налаштування параметрів різання в реальному часі. Це включає зміну швидкості різання, швидкості подачі або глибини різання для підтримки стабільних умов обробки та досягнення бажаної точності розмірів. Відстежуючи знос інструменту можна динамічно регулювати параметри різання, щоб

компенсувати спричинені зносом зміни геометрії та продуктивності інструменту.

Також можна використовувати компенсацію корекції інструменту, яка передбачає коригування значень корекції інструменту в системі керування верстатом на основі вимірювання зносу інструменту в реальному часі. Оновлюючи значення зсуву, машина може автоматично компенсувати знос і підтримувати точні розміри обробки. Це може бути зроблено операторами вручну або за допомогою автоматизованих систем, які інтегруються з програмним забезпеченням керування машиною.

Автоматична зміна інструменту, у ситуаціях, коли знос інструменту досягає критичного рівня, можна використовувати системи автоматичної зміни інструменту для заміни зношених інструментів новими під час процесу обробки. Ці системи можна використовувати для ініціювання заміни інструменту при досягненні попередньо визначеного порогу зносу. Це мінімізує час простою та забезпечує безперервну роботу з новим інструментом.

Інструмент – Заготовка.

При наявності та виходу за межі допустимих значень похибки обробки внаслідок пружних відтискань між інструментом та заготовкою її треба усувати або компенсувати, так як вона безпосередньо впливає на технологічну надійність верстата.

В першу чергу слід зазначити, що деякі з похибок показників які розглядаються можуть діяти одно направлено, тобто їх вектор дії направлений в один бік, тому регулювання та зміна положення інструменту може вплинути на дію похибок внаслідок пружних відтискань і вони будуть діяти різнонаправлено з деякими показниками і компенсуватись.

Також можна використовувати адаптивні алгоритми керування, які можуть динамічно регулювати процес обробки на основі вимірюваних пружних відтискань. Ці алгоритми передбачають використання зворотного зв'язку від датчиків для оновлення параметрів керування та зміни траєкторії

інструменту, параметрів різання або положення заготовки, інструменту під час обробки. Це дозволяє здійснювати компенсацію в реальному часі та забезпечує точну обробку, незважаючи на пружні зсуви.

Столи та поворотні столи.

Для зворотного зв'язку який буде усувати або компенсувати похибки показників в цьому вузлу можна обрати такі методи, як активний контроль причини виникнення вібрацій в цій зоні, режимів різання, в основному глибини різання, створення моделі залежності виникнення вібрацій від цього параметру та використання її для його корегування.

Або використання спеціальних демпфуючих приводів. Такі пристрої, які призначені для активного контролю та зменшення вібрацій у механічних системах. Приводи активного демпфування можуть приймати різні форми залежно від конкретного застосування. Поширені типи приводів, що використовуються для контролю вібрації, включають п'єзоелектричні приводи, електродинамічні приводи, гідравлічні приводи та електромагнітні приводи. Ці приводи створюють сили або рухи, які протидіють вібраціям.

В системі контролю з використанням зворотного зв'язку можна безперервно регулювати сигнали приводу на основі даних датчиків у реальному часі, намагаючись мінімізувати вібрації та підвищити стабільність і точність процесу обробки. Завдяки активній протидії вібрації можна зменшити або усунути негативний вплив вібрації на столи й поворотні столи машини.

Револьверна головка.

Чудовим рішенням буде запровадити адаптивний алгоритм компенсації та усунення похибок від впливу температури та вібрацій. Цей алгоритм використовує зв'язок від датчиків для оновлення параметрів керування, таких як швидкість різання, швидкість подачі, або глибину різання у режимі реального часу. Постійно контролюючи рівні температури та вібрації, система керування може вносити корективи, щоб компенсувати негативний вплив та підтримувати точність обробки.

Ходовий гвинт.

В наслідок збору та аналізу даних з датчиків в цій зоні на основі взаємозв'язку між температурою та тепловим розширенням, враховуючи конструкцію та виконання цього вузлу запровадити алгоритм теплового контролю в разі суттєвого впливу показників на точність обробки. Алгоритми може бути реалізований в системі керування машиною для динамічного регулювання процесу обробки на основі даних температури. Аналізуючи ці закономірності, система керування може змінювати швидкості подачі тим самим зберігаючи точність позиціювання та усуваючи вплив теплових зсувів на процес обробки.

5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЙ В ШПИНДЕЛЬНОМУ ВУЗЛУ

5.1 Коливання в шпиндельному вузлу

В дипломному проєкті увага буде приділена саме шпиндельному вузлу так, як він є одним із основних вузлів робота якого безпосередньо впливає на технологічну надійність та відіграє вирішальну роль у загальній продуктивності верстата. Як було зазначено вище в цьому вузлу є два дуже важливих показники які несуть вплив на надійність, вібрації та температурні деформації. Ці явища дещо пов'язані між собою, але в даній роботі будуть розглядатись саме вібрації, як чинник вплив якого може впливати на технологічну надійність. Серед причин виникнення вібрацій при обробці в шпиндельному вузлу можна виділити: збурення від процесу різання, роботи вузлів верстата та від зовнішніх чинників, також впливають і такі чинники. як температурні деформації, геометрична точність вузлу та знос інструменту.

Шпиндельний вузол – один з найбільш відповідальних елементів динамічної системи верстата, оскільки коливання в цьому вузлу впливають на показники якості та точності обробки, стійкості ріжучого інструменту і т.д.

Викликані коливання у верстатах спричиняються зовнішніми впливами. Зовнішні втручання у динамічну систему верстата можна розділити на дві основні категорії:

- Силові та кінематичні впливи ззовні на елементи ЕПС.
- Зміни налаштувань системи, тобто впливи на процес різання або тертя.

Щодо поширення у верстатах, змушені коливання займають друге місце після автоколивань за ступенем поширення. Різноманітні частоти

збурювальних впливів та значна кількість несучих ланок верстата з власними частотами по різних координатних осях створюють сприятливі умови для виникнення резонансу.

Змушені коливання виникають тоді, коли на матеріальну точку діє збурювальна сила F , крім відновлювальної сили, яка змінюється за гармонічним законом $F \sin \omega t$, де ω - колова частота збурювальної сили.

Диференціальне рівняння руху такої системи, що має один степінь вільності, матиме вигляд:

$$m y'' + \beta y' + c y = F \sin \omega t, \quad (5.1)$$

де m , β і c – маса, коефіцієнт в'язкого демпфування та коефіцієнт жорсткості відповідно.

Важливим завданням оцінки змущених коливань в металорізальних верстатах є їх вплив на точність обробки. В залежності від частоти коливань і швидкості відносного руху інструмента і оброблюваної заготовки змінюється характер викривлення форми поверхні, що оброблюється. Крок хвилі, що утворюється на поверхні, визначається виразом:

$$l_{\text{хв}} = \frac{v}{\omega}, \quad (5.2)$$

де v – швидкість руху (швидкість різання для точіння і стругання; швидкість колової або поздовжньої подачі для шліфування і фрезерування);

ω – частота коливань.

На мою думку особливо небезпечними коливаннями в шпиндельному вузлу є змушені та власні коливання.

Вільними, або власними, коливаннями механічної системи називають її коливання під дією консервативних сил, зумовлені початковим відхиленням точки чи точок системи від положення рівноваги або наданням їм початкової швидкості, наприклад за допомогою удару.

Власні коливання в шпиндельному вузлу виникають самопідтримуючим чином в системі шпиндельного вузлу. Шпиндель є основною частиною верстата або іншого обладнання і призначений для утримання та обертання різального інструменту або деталі під час обробки.

Колівання в шпиндельному вузлу можуть виникнути через внутрішні властивості самого вузла, такі як його маса, жорсткість та демпфуючі характеристики. Ці коливання можуть бути результатом взаємодії внутрішніх компонентів, таких як підшипники, вал, гайки і інші деталі.

Власні коливання можуть виявитися проблемою в обробці матеріалів, оскільки вони можуть призводити до нерівномірності обробки, погіршення якості обробки та впливу на точність.

Негативний вплив несе саме явище резонансу, збіг частоти власних коливань (ЧВК) конструкції шпиндельного вузлу і частоти змушених коливань, які в свою чергу залежать від частоти збурення. При цьому збільшується амплітуда коливань, що безпосередньо впливає на точність та якість процесу обробки.

В цьому проєкті розглядатиметься шпиндельний вузол багатоцільового верстата PicoMax 60M, технічні характеристики якого наведені в таблиці 5.1.



Рисунок 5.1 – Багатоцільовий фрезерний верстат Рісомак 60М

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики верстата Рісомак 60М

Параметр	Розмірність	Значення
Переміщення:		
X	мм	500
Y	мм	350
Z	мм	610
B	градуси	від -5° до 108°
C	градуси	від 0° до 360°
Швидкість подачі	мм/хв	1 - 20000
Розміри стола	мм	920x380
Відстань від стола до шпинделя	мм	94 – 704
Макс. навантаження на стіл	кг	250
Потужність шпинделя на S6 (40%ED)	КВт	10,2

Кінець таблиці 5.1

Діапазон частот обертання	об/хв	50-10000
Макс. крутний момент шпинделя	Н·м	70
Число гнізд накопичувача	кількість	24
Макс. діаметр інструменту при повному/неповному навантаженні	мм	63/125
Макс. довжина інструменту	мм	280
Макс. вага інструменту	кг	3
Система керування Heidenhain CNC-control		iTNC 530
Габаритні розміри (ширина/глибина/висота)	м	2/1,7/3
Вага	кг	3350

5.2 Принцип роботи системи контролю вібрацій

Сама система буде базуватися на принципі постійного контролю вібрацій під час обробки на верстаті за допомогою відповідного датчика
 рисунок 5.2.

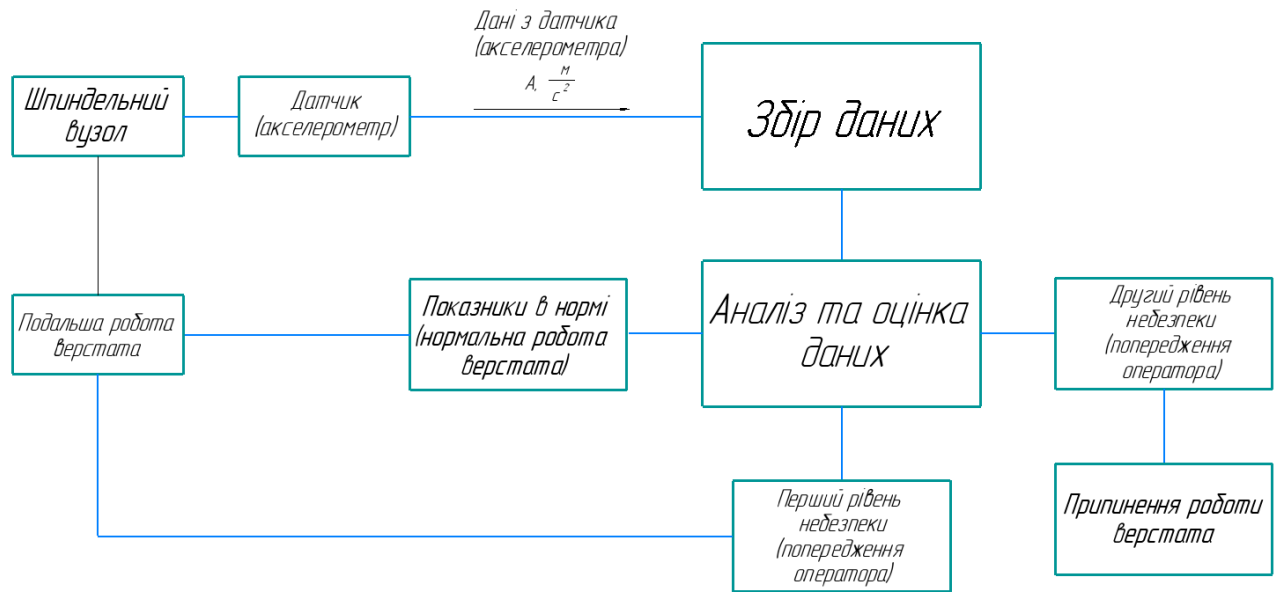


Рисунок 5.2 – Узагальнена схема роботи системи контролю вібрацій в шпиндельному вузлу

Системи контролю вібрацій працює таким чином, що в шпиндельному вузлу верстата встановлюється датчик який контролює параметри вібрацій, дані з датчика проходять попередню обробку та потрапляють в блок зберігання, після чого відбувається аналіз обробка та оцінка цих даних. Якщо показники в нормі, то відбувається його подальша робота. Система сигналізує перший рівень (I) небезпеки якщо показники вібрацій досягають критичної межі, відбувається попередження оператора та подальша робота верстата. Другий рівень (II) небезпеки сигналізує про те, що було досягнуто максимальних значень показників, також відбувається попередження оператора і одночасно з цим припинення роботи верстата.

Таким чином система підвищує надійність (технологічну надійність) верстата. Запобігаючи погіршенню якості обробки та можливого зносу, заклинюванню та виходу зі строю різального інструменту так, як вібрації в шпиндельному вузлу напряму впливають на якість обробки та стійкість різального інструменту.

На роль датчика який зможе вимірювати амплітуду коливань в шпиндельному вузлу як ніщо підходить акселерометр. Акселерометр - це пристрій, який вимірює прискорення, в нашому випадку віброприскорення. Принцип дії акселерометра зазвичай базується на вимірюванні зміни відносної позиції маси всередині пристрою.

Дані з акселерометрів оброблятимуться після чого буде оцінка амплітуди коливання системи і подальші дії.

Для розробки системи контролю вібрацій в шпиндельному вузлу, системи з підвищення надійності за допомогою сенсорних технологій, потрібно вирішити деякі задачі:

- Побудова 3D моделі шпиндельного вузлу верстата.
- Проведення модального аналізу ШВ.
- Проведення гармонічного аналізу ШВ.
- Визначення критеріїв вибору датчика (акселерометра) та його вибір.
- Обладнання для збору та обробки даних.
- Визначення понять якості обробки та стійкості різального інструменту.
- Визначення впливу вібрацій на якість обробки та стійкість різального інструменту.
- Розробка алгоритму аналізу даних для роботи системи.
- Рекомендації для зниження вібрацій в шпиндельному вузлу під час різання.

Так як в даній системі увага приділена саме коливанням (вібраціям) в ШВ верстата, а особливо небезпечним є явище резонансу коливань, після чого підвищується амплітуда коливань, то слід визначити умови за яких відбувається це явище, тому для цього треба побудувати 3D модель ШВ досліджуваного верстата, за якою провести модальний та гармонічний аналіз, щоб визначити частоту власних коливань вузлу та вигляд форм коливань і

місця їх концентрації, а також інші параметри вібрацій. Це допоможе виявити область частоти в якій слід працювати задля підвищення надійності верстата.

5.3 Побудова 3D моделі шпиндельного вузлу верстата

За допомогою програмного забезпечення було побудовано 3D модель шпиндельного вузлу верстата Ricomax 60M. Модель будувалася за кресленням шпиндельного вузлу рисунок 5.3.

При створенні 3D моделі деякі елементи спрощено, для спрощення розрахунків складної динамічної системи шпиндельного вузлу, на рисунку 5.4 можна побачити модель та її зображення в розрізі.

Ротор моторшпинделя було зроблено таким чином, щоб зімітувати реальний ротор, він був поділений на секції, які по чергово змінюють матеріал тим самим імітуючи пакети феромагнітної сталі в пазах яких забиті алюмінієм. Також зроблена гільза за допомогою якої ротор електродвигуна напрасовується на шпиндель.

Оправка для інструменту HSK з конусом 1:10. В таких оправках є низка переваг, таких як висока точність закріплення, завдяки тому, що вона базується не тільки по конусу, а і по торцю. Також полегшена заміна інструменту враховуючи малій довжині конуса та вазі.

Змодельована була оправка HSK – A63, яка розрахована на закріплення інструменту діаметром від 3 до 26 мм, довжина оправки 100 мм, діаметр оправки 63 мм, вага 1,5 кг.

Інструмент змодельований на базі торцевої фрези з діаметром 80 мм, сам інструмент був спрощений до циліндру з зубами так, щоб зосередити масу.

Властивості матеріалів з яких виготовлена модель шпиндельного вузлу наведені у таблиці 5.2.

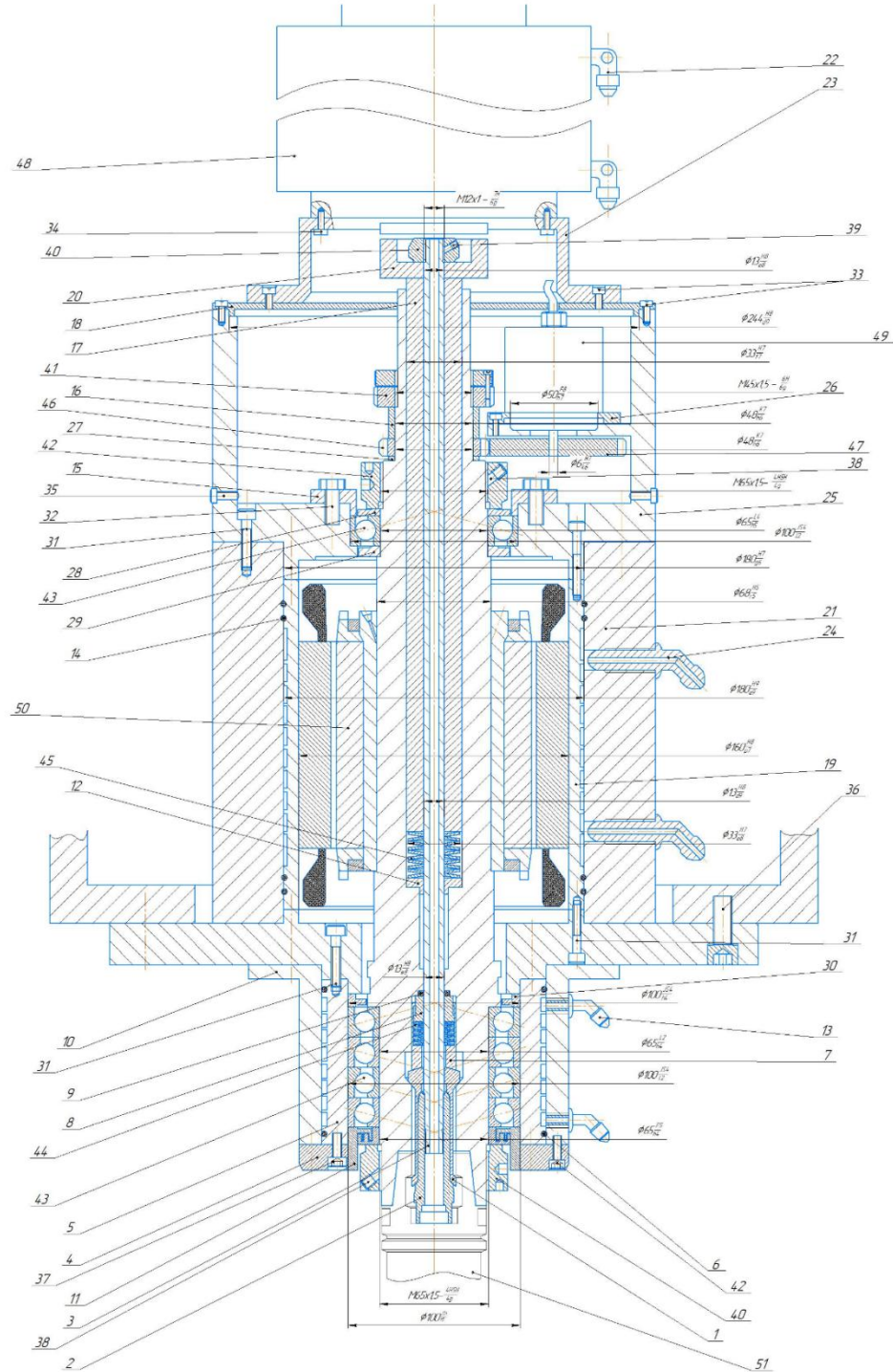


Рисунок 5.3 – Креслення шпиндельного вузлу верстата Ricomax 60M

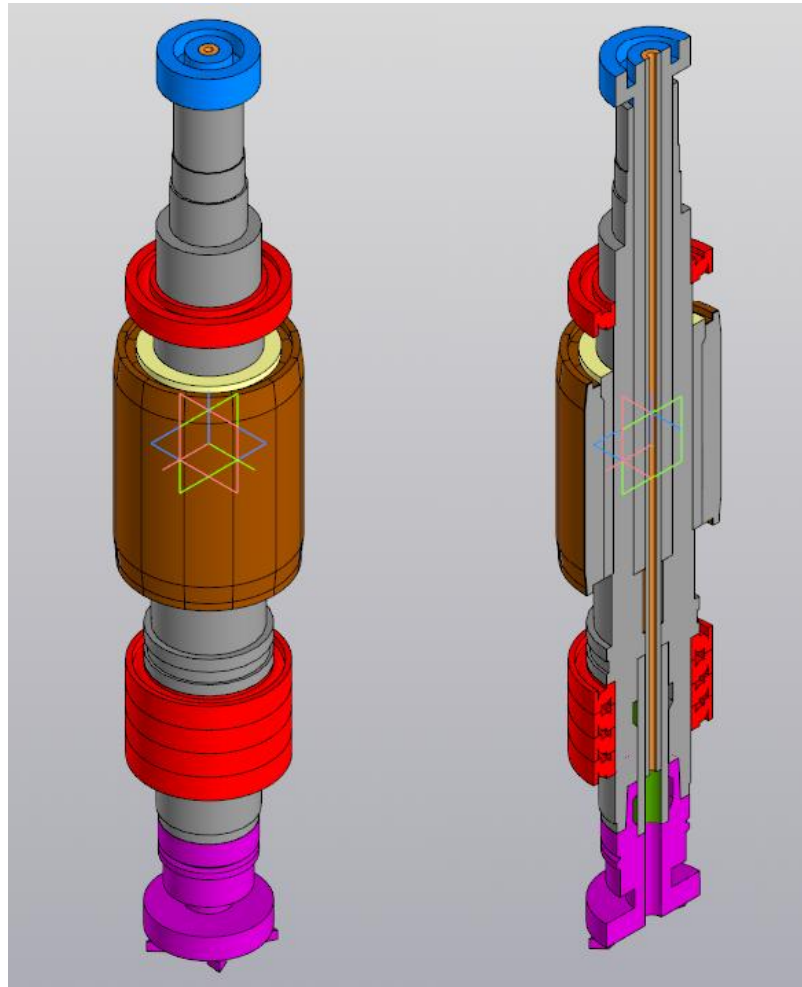


Рисунок 5.4 – 3D модель шпиндельного вузлу верстата Рісوماх 60М

5.4 Модальний аналіз шпиндельного вузлу

Було проведено модальний аналіз шпиндельного вузлу для виявлення частот власних коливань, результати якого наведені на (рис. 5.7 – 5.8). Значення частот власних коливань наведені в таблиці 5.3.

Сам модальний аналіз проводився за допомогою програмного забезпечення Ansys за допомогою методу скінченних елементів.

Ansys — це набір програмного забезпечення для інженерного моделювання, розробленого компанією Ansys, Inc. Він використовується для

різних типів моделювання, включаючи структурний аналіз, динаміку рідини, електромагнетику та термічний аналіз. Програмне забезпечення Ansys широко використовується в таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна, обробна промисловість та електроніка, для моделювання та аналізу поведінки продуктів і систем до їх створення або впровадження.

Програмне забезпечення надає ряд інструментів для аналізу кінцевих елементів (FEA). Інженери та дослідники використовують Ansys для моделювання та імітації продуктивності проєктів у різних умовах, допомагаючи оптимізувати та перевірити їхні продукти до створення фізичних прототипів.

В даній роботі я використовував ліцензовану студентську версію програмного забезпечення Ansys. А саме Ansys Workbench, це комплексна платформа моделювання, розроблена Ansys, Inc. Вона надає інтегроване середовище для виконання різноманітних інженерних симуляцій, зокрема структурного, теплового, гідродинаміки, електромагнітного та мультифізичного аналізів.

Модальний аналіз проводився на базі побудованої 3D моделі шпиндельного вузлу верстата Ricomax 60M методом скінченних елементів. Скінчено-елементна модель складається з 50505 елементів, з'єднаних 114967 вузлами. Також слід зазначити, що більшість окремих деталей з'єднані між собою контактними скінченними елементами, встановленими в зафіксоване положення «bonded».

Bonded:

У стані зв'язаного контакту поверхні, що контактують, вважаються з'єднаними так, ніби вони склеєні або зварені разом. Це означає, що під час аналізу не допускається ковзання, роз'єднання або відносний рух між поверхнями.

Зв'язаний контакт (bonded) часто використовується під час моделювання жорстко з'єднаних частин, наприклад зварних з'єднань або компонентів, які фізично приєднані один до одного.

В даній моделі налічується близько 46 таких контактних з'єднань, одне із яких наведено нижче на (рис. 5.5), гільза ротора електродвигуна, яка напресована на шпиндель. Для чого ротор з гільзою нагрівають до $140^{\circ}\div 150^{\circ}\text{C}$ при температурі шпинделя $10^{\circ}\div 20^{\circ}\text{C}$ або шпиндель охолоджують до $-160^{\circ}\div -190^{\circ}\text{C}$ при температурі ротора $20^{\circ}\div 30^{\circ}\text{C}$.

Контакти між шпинделем та інструментальною оправкою та оправкою і інструментом також приймався, як «bonded». Так, як сили натягу затискного пристрою, що фіксує інструмент з оправкою в шпинделі розраховуються з запасом.

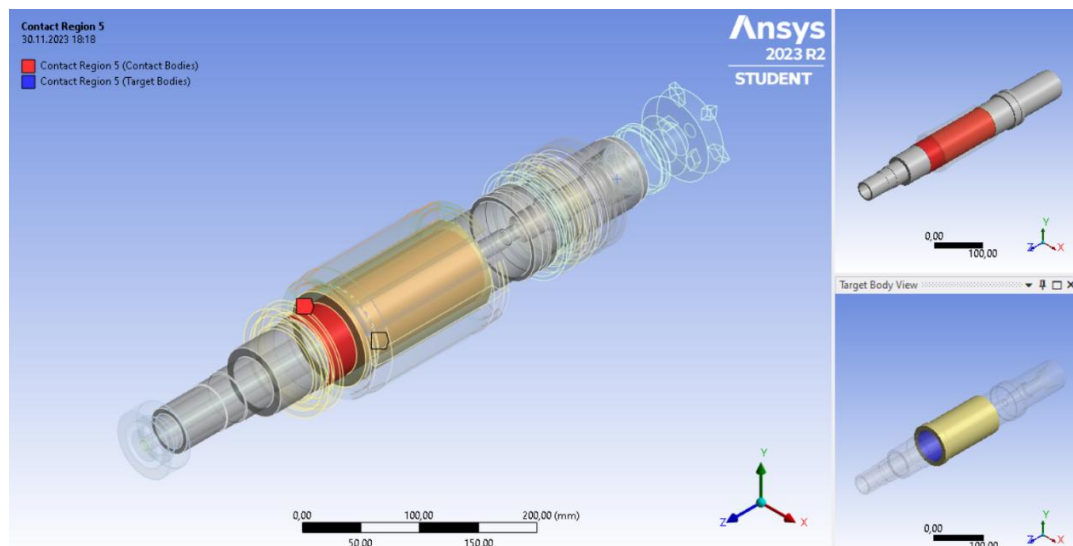


Рисунок 5.5 – Контактне з'єднання гільзи ротора електродвигуна яка напресована на шпиндель

Сам шпиндель надійно закріплений на двох опорах, які мають чотири радіально-упорні підшипники в передній опорі та один підшипник у задній опорі. Попередній натяг застосований до підшипників передньої опори. Нерівномірний розподіл підшипників зумовлений діючими навантаженнями на шпиндель (рис. 5.6). Використання мотор-шпинделя забезпечує відсутність навантажень на шпиндель елементів, що передають крутільний

момент. В результаті шпиндель піддається тільки навантаженню від сил різання.

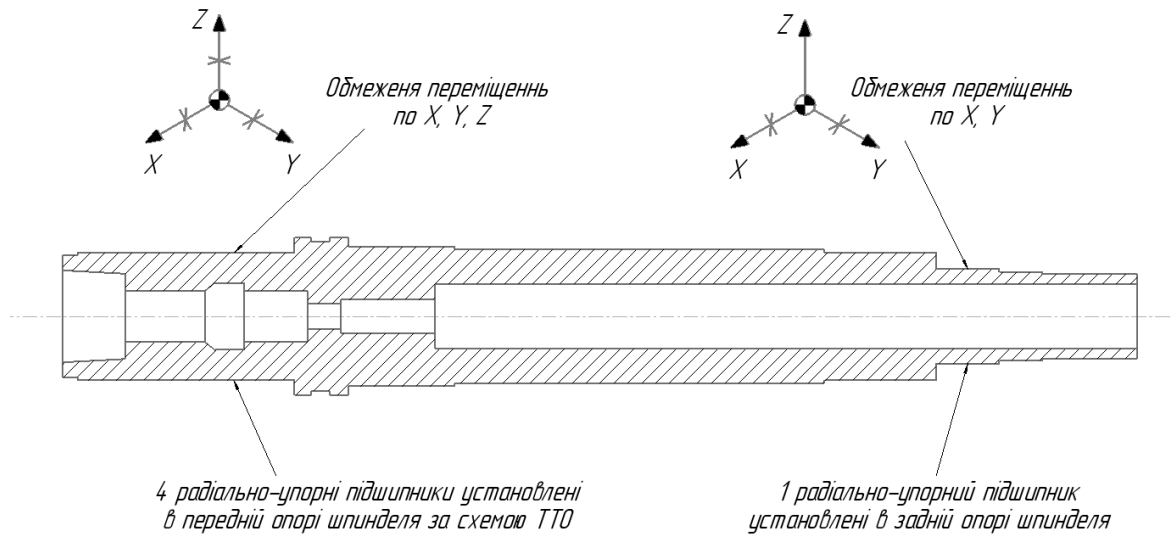


Рисунок 5.6 – Умови закріплення шпинделя

Щоб змодельовати це закріплення місця в яких розташовані підшипники були зафіксовані відповідним чином так, що передня опора фіксується без переміщень по всім 3-м осям, а задня опора фіксується по 2-м осям X та Y повздовжня вісь Z залишається вільною. Властивості матеріалів з яких виготовлена модель шпиндельного вузлу наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Властивості матеріалів шпиндельного вузлу.

Елемент ШВ	Матеріал	Модуль пружності E, ГПа	Коефіцієнт Пуансона, μ	Густина ρ , кг/м ³
Інструмент	BK8	560	0,24	14800
Інструментальна оправка	40XH2MA	215	0,3	7850

Кінець таблиці 5.2.

Ротор	Електротехнічна сталь	210	0,3	7800
	Алюміній	70	0,23	2700
Інші елементи ШВ	Вуглецева сталь	200	0,3	7850

Таблиця 5.3 – Результати модального розрахунку (ЧВК) шпиндельного вузлу.

Номер форми коливань	Частота, Гц
I	594.65
II	934.74
III	969.4
IV	970.8
V	976.71

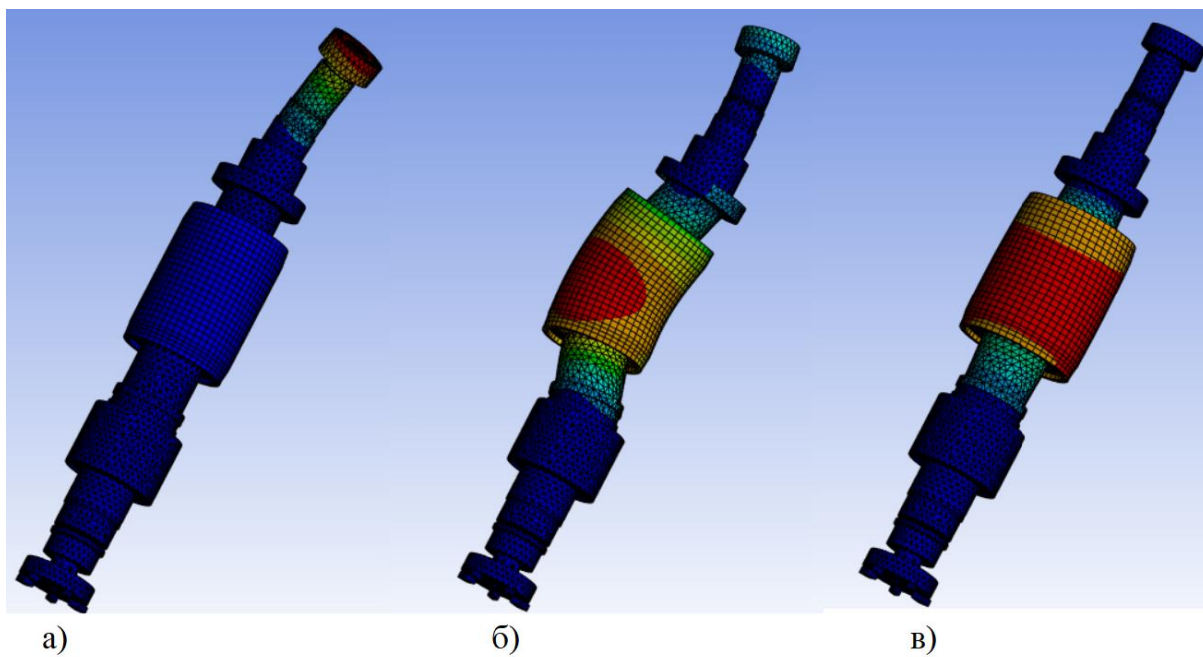


Рисунок 5.7 – Результати модального аналізу, а) – перша форма коливань, б) – друга форма коливань, в) – третя форма коливань

Перша форма коливань впливає на задній кінець шпинделя, ЧВК 594,65 Гц деформують задній кінець шпинделя (рис. 5.5, а). Також видно, як частота в 934,74 Гц другої форми коливань, деформує центральну частину шпиндельного вузлу де розташований ротор моторшпинделя, при цій частоті незначною мірою коливання впливають і на задній кінець шпинделя (рис. 5.5, б). Третя форма коливань при частоті 969,4 Гц також деформує ротор двигуна напресований на шпиндель, в цьому випадку він розширюється (рис. 5.5, в).

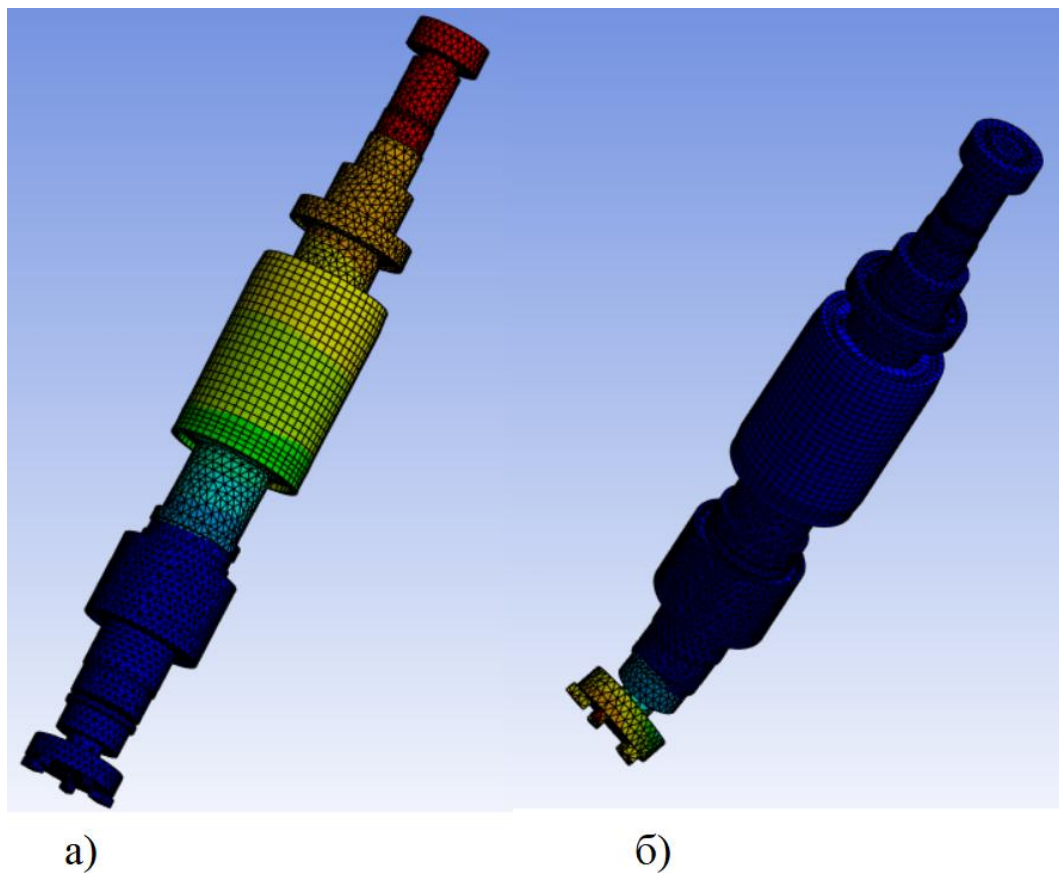


Рисунок 5.8 – Результати модального аналізу, а) – четверта форма коливань, б) – п'ята форма коливань

ЧВК в 970,8 Гц четвертої форми коливань деформує задній кінець шпинделя, витягуючи його (рис. 5.6, а), при цьому також деформується центральна частина ШВ. При коливаннях на частоті 976,71 Гц,

деформується саме передній кінець шпинделя разом з оправкою та інструментом (рис. 5.6, б), що може впливати на процеси під час обробки.

Для того щоб уникнути явища резонансу потрібно, щоб частота власних коливань відрізнялася від частоти змушених коливань хоча б на (25...30)%.

Враховуючі те, що якщо взяти умову того, що максимальна частота обертання шпинделя обраного верстата становить 10000 об/хв, то якщо наприклад розглядати 5-зубу фрезу, частота збурення від врізання леза в заготовку становитиме:

$$f_3 = \frac{n \cdot z}{60} = \frac{10000 \cdot 5}{60} = 833.33 \text{ Гц}, \quad (5.3)$$

де n – частота обертання шпинделя, об/хв;

z – кількість зубів ріжучого інструменту.

Всі форми коливань з їх частотами можуть входити в зону резонансу. Також слід враховувати вплив того, що різноманітні види доступних оправок та різального інструменту, які значно відрізняються геометричними параметрами (такими як виліт та діаметр інструменту), а також фізико-механічними властивостями матеріалів, з яких вони виготовлені, впливають на зміну частоти власних коливань під час технологічних переходів.

В нашому випадку особливо небезпечною частотою коливань є частота коливань п'ятої форми, а саме 976.71 Гц, так як в даному випадку коливається передній кінець шпинделя (оправка з інструментом), саме вібрації в цій зоні є особливо небезпечними, впливаючи на такі показники, як якість оброблюваної поверхні та стійкість різального інструменту.

5.5 Гармонічний аналіз шпиндельного вузлу

Гармонічний аналіз, також відомий як аналіз частотної характеристики, – це метод, який використовується в структурній і механічній інженерії для вивчення динамічної поведінки системи в умовах гармонічного (циклічного) навантаження. В випадку з ШВ, аналіз покаже відгук системи на гармонічне навантаження від сили різання при обробці.

Гармонічний аналіз проводився на базі даних модального аналізу. Дані які вводились при модальному аналізі та результати розрахунків сполучались з даними при гармонічному аналізі.

Імітацією сили різання під час обробки при аналізі була сила в 100 Н, яка була прикладена в зону розташування інструмента, компонентами по осям X, Y, Z імітуючи силу, яка найбільш впливає на показники обробки, результатом ГА був відгук на дію цієї гармонічної сили. Також було встановлено демпфування системи 2%. Умови закріплення в гармонічному аналізі були аналогічно таким, як в модальному аналізі.

Аналіз проводився в діапазоні частот від 500 до 1200 Гц, щоб охопити весь діапазон власних коливань шпиндельного вузлу, самі значення результатів розбивалися на 200 частин, щоб слідкувати за плавністю протікання процесу. Результатами розрахунку були деформацій та віброшвидкості по всім осям (X, Y, Z) окремо. Результати розрахунків наведені на рисунках 5.9 – 5.11.

На графіках видно, що амплітуда коливань та амплітуда віброшвидкості наростає зі зміною частоти власних коливань в передній опорі (в зоні розташування інструмента з інструментальною оправкою). Вони набувають своїх пікових значень та плавно знижують свої значення.

Слід зазначити, що максимальні значення амплітуд коливань та віброшвидкості в гармонічного розрахунку це ніщо інше, як пікові значення від явища резонансу коливань, на графіках чітко видно, що резонанс

наступає на частоті власних коливань (976,71 Гц) п'ятої форми коливань, зони де розташовані оправка з інструментом (передній кінець шпинделя). Значення досить великі і вони несуть дуже негативний вплив на показники обробки та стійкість різального інструменту, тому контроль вібрацій в цій зоні є дуже важливим рішенням для збільшення технологічної надійності верстата.

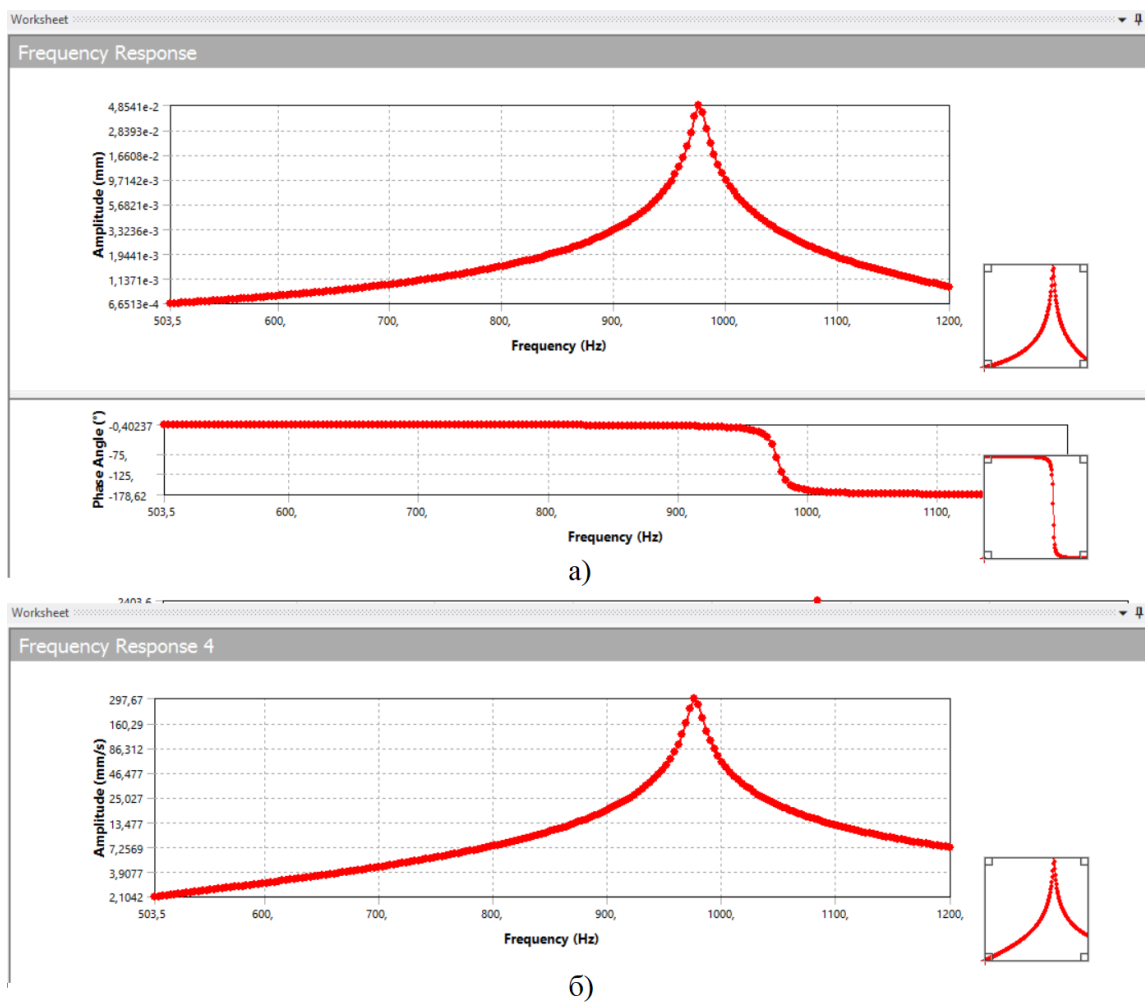


Рисунок 5.9 – Результати гармонічного розрахунку, а) – амплітуда коливань по осі X, б) швидкість коливань по осі X

За результатами гармонічного розрахунку по осі X видно, що максимальна амплітуда коливань дорівнює 48,54 мкм. А максимальна швидкість коливань становить 297,67 мм/с.

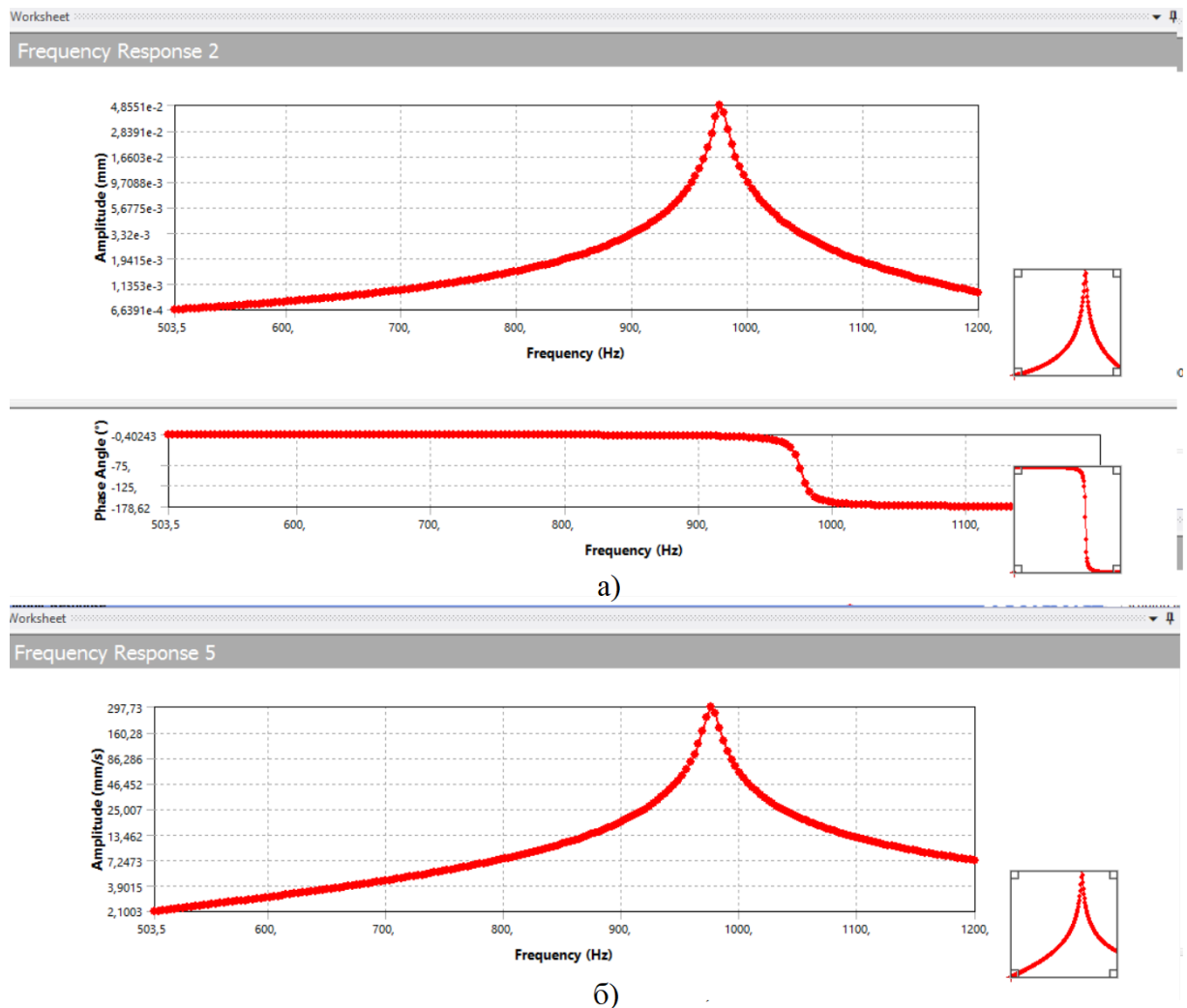


Рисунок 5.10 – Результати гармонічного розрахунку, а) – амплітуда коливань по осі Y, б) швидкість коливань по осі Y

За результатами гармонічного розрахунку по осі Y видно, що максимальна амплітуда коливань дорівнює 48,55 мкм. А максимальна швидкість коливань становить 297,73 мм/с.

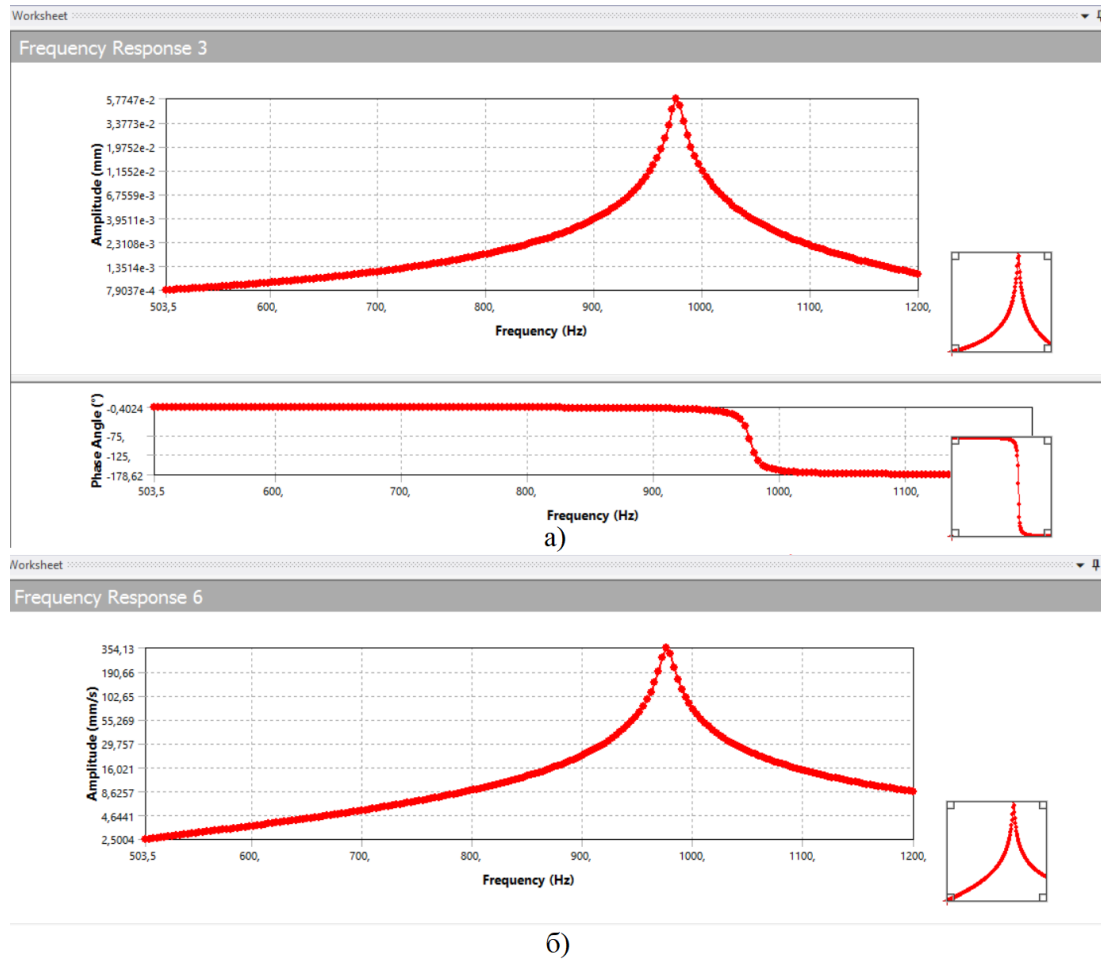


Рисунок 5.11 – Результати гармонічного розрахунку, а) – амплітуда коливань по осі Z, б) швидкість коливань по осі Z

За результатами гармонічного розрахунку по осі Z видно, що максимальна амплітуда коливань дорівнює 57,74 мкм. А максимальна швидкість коливань становить 354,13 мм/с.

5.6 Визначення критеріїв вибору датчика (акселерометра) та його вибір

Для вимірювання параметрів вібрації у шпиндельному вузлу верстата підходить такий тип датчика, як акселерометр.

Переваги:

- Акселерометри є універсальними і зазвичай використовуються для вимірювання вібрації в промислових умовах.
- Вони підходять для вимірювання широкого діапазону частот, що робить їх ефективними для моніторингу вібрації машин.
- Акселерометри, як правило, є більш економічно ефективними порівняно з іншими типами датчиків.
- Вони надають інформацію про прискорення, яку можна інтегрувати для отримання даних про швидкість і переміщення.

Особливості:

- Потрібен прямий контакт, який може незначно вплинути на власну частоту та поведінку системи через масове навантаження.
- Для точних вимірювань переміщення інтеграція даних прискорення вносить потенційні помилки з часом.
- Для низькочастотних вібрацій можуть знадобитися акселерометри з нижчими граничними частотами.

Критерії за якими обирається акселерометр для даного типу задачі:

Діапазон частот:

- діапазон частот, повинен охоплювати цільовий діапазон (як мінімум від 500 до 1200 Гц). Треба переконатися, що датчик має достатню чутливість і точність у цьому діапазоні частот.

Чутливість:

- обирається з чутливістю, що відповідає очікуваній амплітуді вібрацій у нашому застосуванні. Вища чутливість може забезпечити кращу роздільну здатність вимірювань для менших вібрацій.

Монтаж і форм-фактор:

- треба враховувати фізичні обмеження. Обирати акселерометри, які підходять для монтажу в шпиндельному вузлу або в інших відповідних точках. Деякі акселерометри розроблені для певних конфігурацій кріплення, наприклад кріплення на клей або різьбові шпильки.

Температура та умови навколишнього середовища:

- вибрані акселерометри повинні витримувати температуру та умови навколишнього середовища та металообробного верстата. У промислових умовах датчики можуть піддаватися впливу високих температур, вологості або забруднень.

Вихідний сигнал:

- треба перевіряти сумісність вихідного сигналу з нашою системою збору даних. Загальні вихідні сигнали включають сигнали напруги, струму або заряду.

Репутація бренду та виробника:

- розглядати акселерометри від відомих виробників, які мають досвід виробництва надійних і точних датчиків. До популярних виробників акселерометрів належать PCB Piezotronics, Bruel & Kjaer, KISTLER, Meggitt Sensing Systems та інші.

Враховуючи вказаний діапазон частот, можна шукати акселерометри, призначені для моніторингу високочастотної вібрації або моніторингу стану обладнання. Деякі моделі акселерометрів можуть містити низку функцій, таких як вбудовані підсилювачі, TEDS (таблиця електронних даних перетворювача) для автоматичної ідентифікації датчика та різні варіанти кріплення.

З огляду на вищесказане, було обрано акселерометр типу 8396А який виготовляє компанія KISTLER (рис. 5.12). Технічні характеристики датчика наведені в таблиці 5.4.



Рисунок 5.12 – Акселерометр типу 8396А

Опис:

Сімейство трьохосьових ємнісних акселерометрів типу 8396А... використовує кремнієвий чутливий елемент із змінною ємністю мікроелектромеханічної системи (MEMS). Чутливий елемент кожної осі складається з дуже малої інерційної маси та гнучкого елемента, розташованого між двома пластинами. Коли маса відхиляється під дією прискорення, ємність між цими пластинами змінюється. Схема збудження змінного струму та демодуляції синхронної амплітуди, яка міститься у внутрішньому формувачі сигналу акселерометра, забезпечує аналоговий вихідний сигнал, пропорційний прикладеному прискоренню. Цей вихідний сигнал масштабується як напруга, яка пропорційна прикладеному прискоренню.

Формат вихідного сигналу доступний як біполярний 0 ± 4 В, односторонній $2,5\pm2$ В і диференціальний 0 ± 4 В або 0 ± 8 В. Акселерометр живиться від одного регульованого джерела живлення від 6 до 50 В постійного струму. Вихід температури надається, якщо потрібна зовнішня компенсація вихідного сигналу. Чутливий елемент і електроніка містяться в легкому зварному титановому корпусі з круглим 9-контактним з'єднувачем або інтегральним кабелем*, закінченим косичкою, або 9-контактним роз'ємом D-Sub. Ізоляція від землі досягається шляхом монтажу датчика за допомогою одного з аксесуарів або шляхом кріплення датчика до об'єкта випробування за допомогою сторони датчика з вбудованою жорсткою анодованою пластиною.

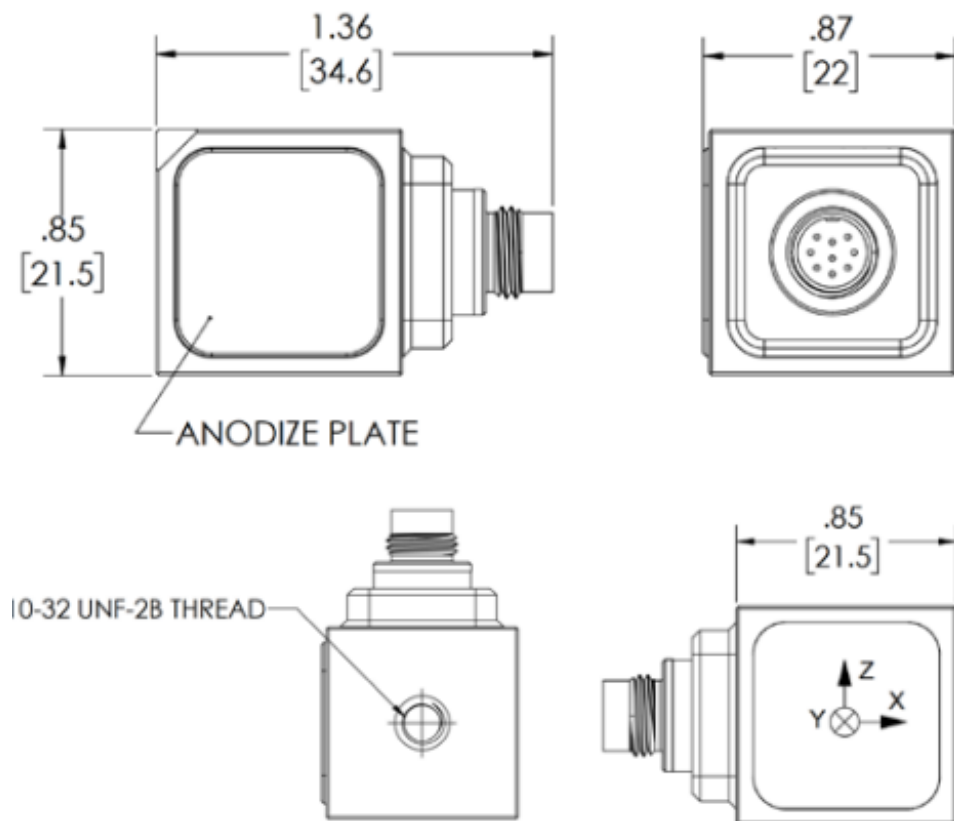


Рисунок 5.13 – Розміри датчика, (дюйм [мм])

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики акселерометра 8396A010.

Показник	Одиниці вимірювання	Акселерометр 8396A010
Діапазон прискорення	g	± 10
АЧХ	Гц	0...2000
Коефіцієнт демпфування		0,7
Резонансна частота	кГц	3,2
Поперечна чутливість, тип. (макс.)	%	1,0 (3,0)
Амплітудна лінійність, тип. (макс.)	% FSO	$\pm 0,1$ ($\pm 0,3$)
Фазовий зсув (макс.) при 0 Гц	ступенів	0
при 10 Гц	ступенів	2
при 100 Гц	ступенів	10
Вихід, тип виходу (A; B; C; D)	мВ	0 ± 60 (A); $2,5 \pm 30$ (B); 0 ± 60 (C); 0 ± 120 (D)
Струм живлення, ном.	мА	12
Напруга живлення (температура)	В	6...50 ($\leq 100^\circ\text{C}$ [210 °F])
Захист від зворотної полярності	так/ні	так
Діапазон робочих температур	$^\circ\text{C}$ [°F]	-55...125 [-65...260]
Монтаж	тип	10-32 шпилька/клей
Заземлення	так/ні	так
Вага (без кабелю), вихід (A, B, C, D)	грамів	31(A,B); 33(C, D)
Допуск на довжину кабелю	м	$\pm 0,1$

Примітка: Робота датчика з напругою живлення, що перевищує вказані значення за вказаних температур, приведе до незворотного пошкодження датчика, $1\text{ g} = 9,80665\text{ м/с}^2$, $1\text{ дюйм} = 25,4\text{ мм}$.

Повну характеристику на датчик можна подивитися [13].

Також на рисунку 5.14 показані центри чутливих елементів датчика.

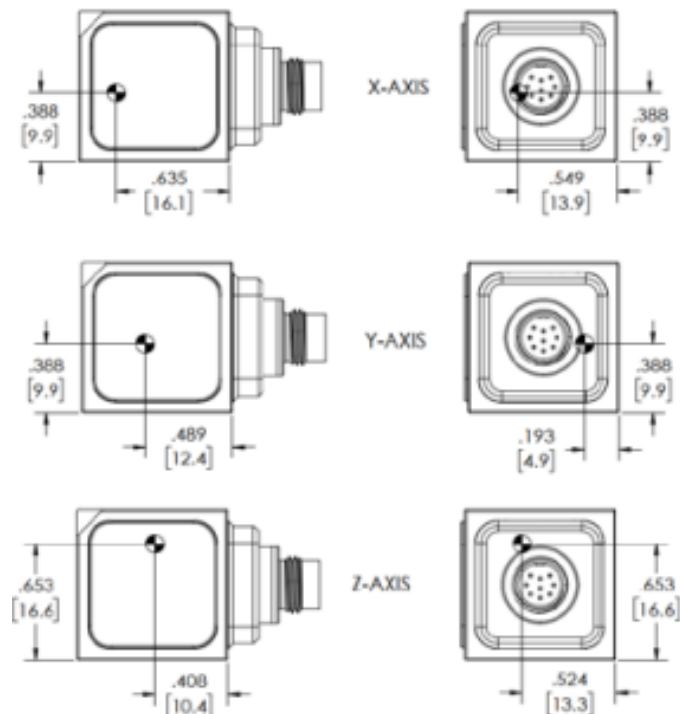


Рисунок 5.14 – Центр чутливих елементів датчика, (дюйм [мм])

Дещо треба відмітити про сам монтаж датчика.

Клейовий монтаж. Перевагою цього методу є забезпечення надійного кріплення. Клей може бути у вигляді епоксидної смоли, або воску. Клейовий монтаж вимагає, щоб монтажна поверхня була дуже чистою та хорошою обробленою. З іншого боку, такий монтаж може знизити точність і максимальний діапазон частотної характеристики акселерометра. Крім того, порівняно з іншими методами, заміна та видалення акселерометра вимагає особливо багато часу. Іншою альтернативою є віск, який у порівнянні з клеєм дозволяє легше знімати акселерометр.

На рисунку 5.15 показані установки акселерометрів клейовими методами, (рис. 5.15, а) – акселерометри кріпляться безпосередньо за

допомогою клею. (рис. 5.15, б) – використовується адаптер між акселерометром і поверхнею. (рис. 5.15, в) – проілюстровано типову помилку при використанні цього монтажу, надмірна товщина шару клею, це створюють власну механічну систему (рис. 5.15, г). Той самий ефект може виникнути, коли поверхні (або основа акселерометра або монтажна поверхня) не плоскі.

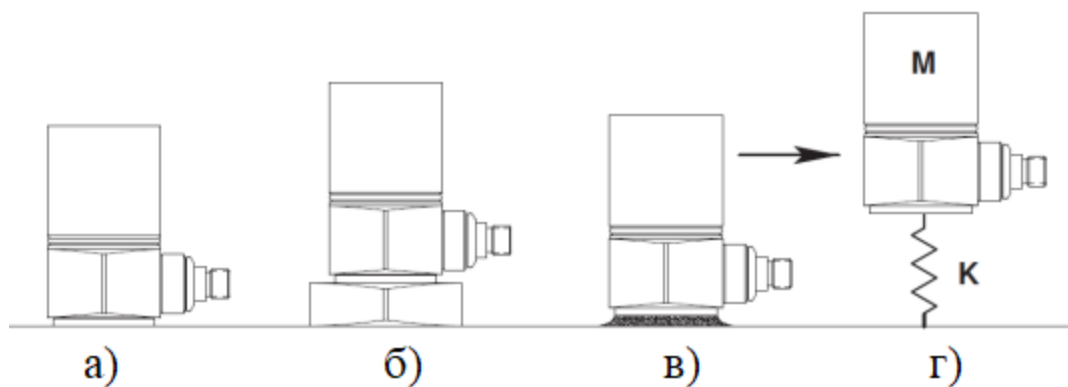


Рисунок 5.15 – Клейовий монтаж акселерометра

Шпильковий монтаж. Використовується для стаціонарного монтажу, оскільки потрібен отвір для різьби, щоб акселерометр можна було вкрутити. Для цього пропонується акселерометр із постійною або знімною шпилькою залежно від моделі (рис. 5.16). За допомогою цього при цій технології монтажу, поверхня монтажу повинна бути плоскою, гладкою та рівною для забезпечення достатнього контакту з поверхнею та запобігання зсуву. При використанні цього монтажу необхідно забезпечити відмінну якість поверхні. Крім того, акселерометр необхідно бути відрегулювати за допомогою динамометричного ключа з конкретним монтажним моментом.

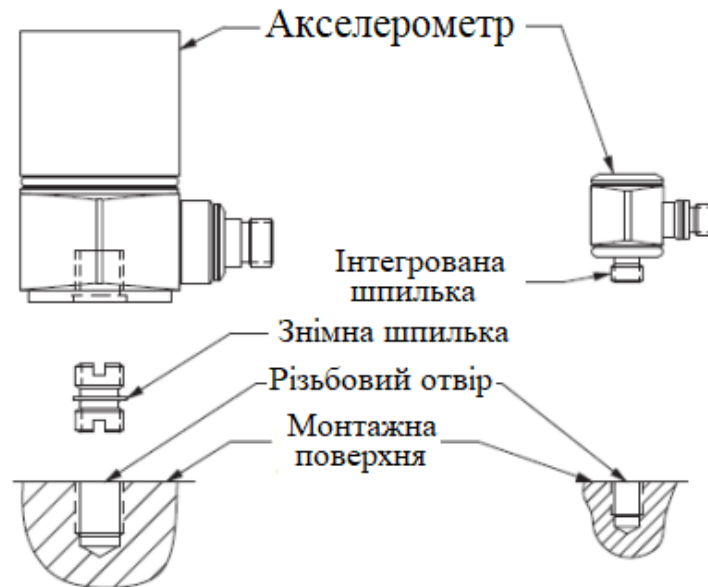


Рисунок 5.16 – Конфігурація шпильок для монтажу акселерометра

В даній роботі перевага надається саме клейовому монтажу акселерометра з таких причин як, простота встановлення та демонтажу, тому що не треба робити різьбовий отвір на поверхні кріплення, регулювання за допомогою динамометричного ключа з конкретним монтажним моментом та з економічної точки зору клейовий монтаж більш вигідний ніж шпильковий.

5.7 Місце установки акселерометра в шпиндельному вузлу

Було вирішено встановити датчик акселерометр саме на корпусі шпиндельного вузлу біля передньої опори шпинделя у верстаті Рісмах 60-М, так як це має стратегічне значення, узгоджуючи його з унікальними характеристиками, виявленими за допомогою модального та гармонійного аналізу, характеристиками самого датчика та методу його монтажу, а також з

геометричними характеристиками корпусу шпиндельного вузлу верстата Pícomax 60-M.

Провівши модальний аналіз було визначено критичну власну частоту переднього кінця шпинделя де розташована оправка з інструментом в 976,71 Гц, пов'язану з передньою опорою шпиндельного вузла. Розміщення акселерометра поблизу цього конкретного місця дозволяє здійснювати цілеспрямований моніторинг вібрацій, що виникають в цій зоні, а особливо контроль явища резонансу частот. Цей цілеспрямований підхід гарантує, що датчик фіксуватиме вібрації, які впливатимуть на точність, якість та загальну стабільність і продуктивність обробки.

Датчик розміщується в безпосередній близькості від області інтересу рисунок 5.17. Така близькість підвищує чутливість датчика до вібрацій, що виникають в оправки з інструментом, забезпечуючи більш точне вимірювання в робочих умовах.

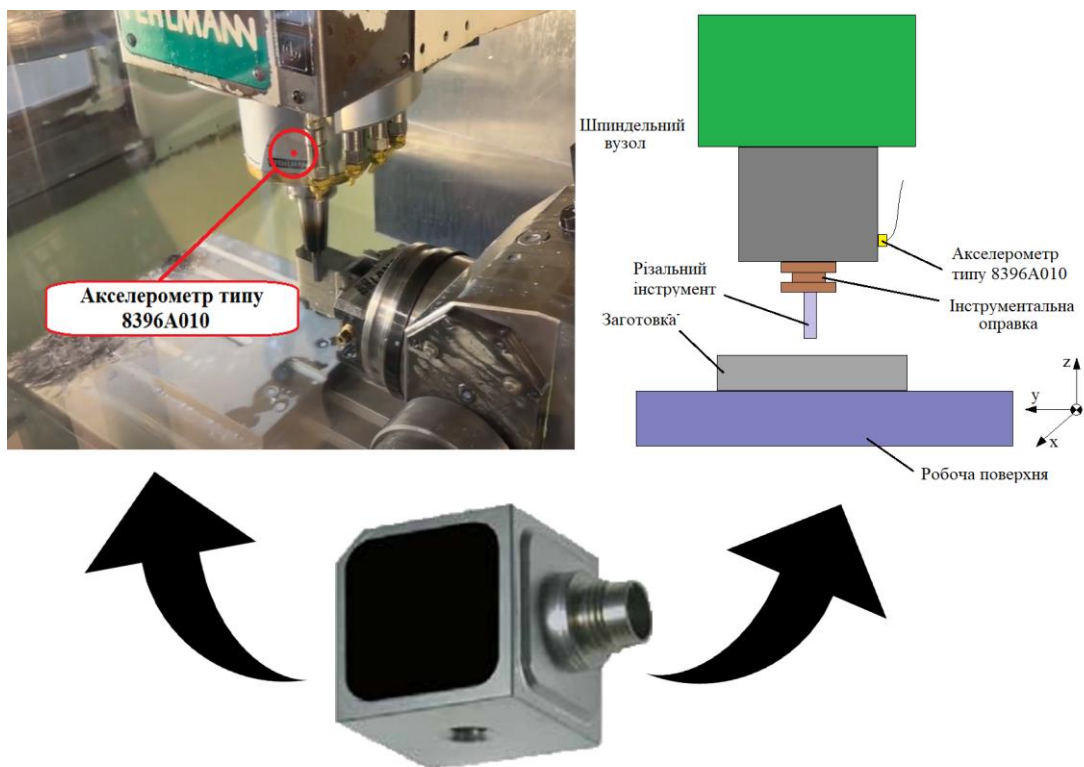


Рисунок 5.17 – Місце встановлення акселерометра

Встановлення акселерометра біля передньої опори дозволяє стратегічно втручатися у разі високо-амплітудних вібрацій. Завдяки точному моніторингу цієї критичної області оператори можуть впроваджувати цільові заходи контролю для пом'якшення вібрації, мінімізуючи ризик проблем, пов'язаних з резонансом, і підтримуючи оптимальні умови обробки.

Таким чином, встановлення акселерометра на корпусі шпинделя біля передньої опори є обґрунтованим рішенням. Це забезпечує стратегічне розташування датчика для вимірювання вібрації, пов'язаної з критичними резонансними частотами, надаючи цінну інформацію для оптимізації процесів обробки та підтримки точності, якості та працездатності під час обробки на верстаті Picosax 60-M.

5.8 Обладнання для збору та обробки даних

В нашому випадку можна використовувати таке обладнання для збору даних, як SEMA 600 (SEMA-TEC), це портативний збирач і аналізатор вимірювання вібрації, який використовується в промисловості, (рис. 5.18). Це Обладнання зазвичай використовується для технічного обслуговування, тому що забезпечує зручний для користувача інтерфейс. Цей збирач/аналізатор має спеціальне програмне забезпечення під назвою SEMALYST, використовується для швидкого отримання ключових параметрів при вимірюванні вібрації. Він також має 6 каналів, в яких чотири з них відповідають картам ICP для підключення акселерометрів. Карти ICP працюють в діапазоні частот від 0,1 Гц до 25 кГц. Крім того, карти працюють на частоті дискретизації до 500 кС/с. Ця частота дискретизації знижується до 65 кС/с, коли 6 каналів збирають паралельно.



Рисунок 5.18 – Обладнання для збору даних SEMA 600 від SEMATEC

Також можна використовувати мобільний пристрій SCADAS SCM01, надається компанією LMS, (рис. 5.19). У цьому випадку він відповідає лише блоку запису. Тому обробка даних має виконуватись за допомогою зовнішнього комп'ютера. SCM01 використовується як у лабораторії, так і в промисловому застосуванні, завдяки компактним розмірам і малій вазі (2,5 кг).



Рисунок 5.19 – Мобільний пристрій збору даних SCADAS SCM01 від LMS

5.9 Поняття якості поверхні оброблюваної деталі

Якість продукції або машини є ключовим показником не лише оцінки самого виробу, але й ефективності виробництва. Термін «якість продукції» охоплює сукупність взаємопов'язаних властивостей, що визначають його придатність для використання згідно з призначенням. Підвищення якості продукції має велике значення.

Важливим показником якості, який впливає на багато експлуатаційних характеристик машин, є точність виготовлення деталей. Точність деталі визначається ступенем відповідності реальної деталі, виготовленої механічно, до деталі, яка вказана на кресленні і технічних умовах для виготовлення. Це охоплює відповідність форми, розмірів, взаємного розташування оброблених поверхонь та шорсткості поверхні обробленої деталі до вимог креслення.

Отже, поняття якості є комплексним, охоплюючи всебічну оцінку відповідності реальної деталі до зазначеної, включаючи шорсткості поверхні.

В даній роботі під поняттям якості поверхні оброблюваної деталі буде розглядатися саме шорсткість та хвилястість поверхні, так як ці показники належать до найважливіших чинників які визначають якість оброблюваної поверхні.

Шорсткість поверхні є вирішальним аспектом якості деталей у металообробці, що впливає як на функціональність, так і на естетику. Це відноситься до дрібно розташованих нерівностей на поверхні обробленої або готової деталі. Вибір шорсткості поверхні часто вказується в технічних кресленнях і є важливим для виконання певних функціональних вимог.

Досягнення бажаної шорсткості поверхні в металообробці передбачає поєднання відповідних процесів обробки, інструментів і умов різання, а також дотримання проєктних специфікацій і заходів контролю якості. Параметри і характеристики шорсткості поверхні встановлені ГОСТ 2789-73.

Параметри, які використовуються для оцінки шорсткості поверхні обумовлені ГОСТами (ГОСТ 25142-82, ГОСТ 2789-73). На профілограмі поверхні, (рис. 5.20) наведені всі характеристики профілю [14].

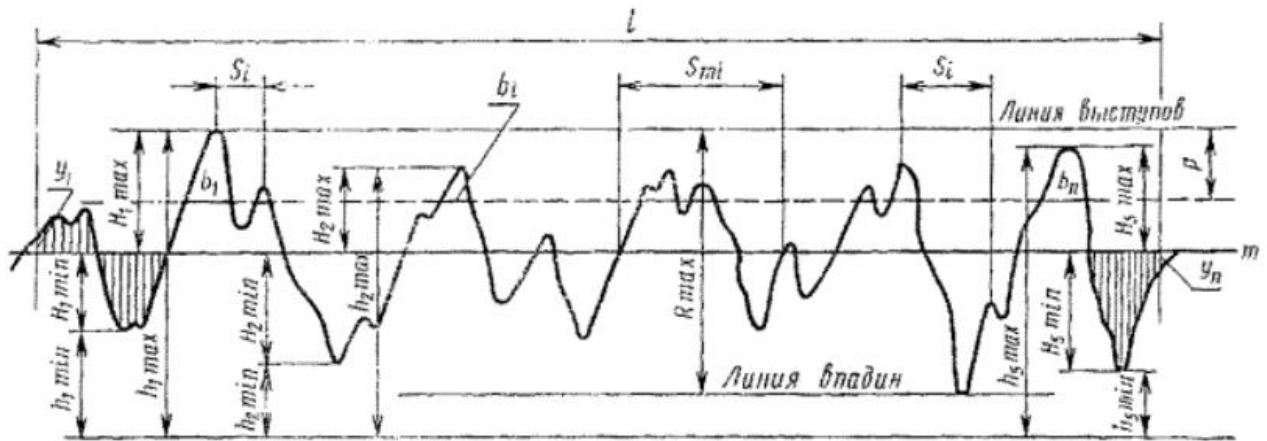


Рисунок 5.20 – Профілограма поверхні, ГОСТ 2789-73

Параметри за якими оцінюється шорсткість поверхні:

- 1) R_a – середнє арифметичне відхилення профілю;
- 2) R_z – висота нерівностей профілю за 10 точками;
- 3) R_{max} – найбільша висота нерівностей профілю;
- 4) S – середній крок місцевих виступів профілю;
- 5) S_m – середній крок нерівностей профілю;
- 6) t_p – відносна опорна довжина профілю.

Числові значення параметрів шорсткості залежать від вимог до точності розміру та форми поверхні, визначаючи відношення між точністю розміру, ступенем точності форми поверхні та її шорсткістю. У таблиці 5.5 представлена середня економічна точність обробки плоских поверхонь фрезеруванням. Як видно з вищезазначеної таблиці, фрезеруванням можна досягти високої точності обробки до 6-го класу точності та відповідної шорсткості поверхні до 0,4 мкм. Це свідчить, що у більшості випадків фрезерування забезпечить остаточну обробку деталі.

Таблиця 5.5 – Середня економічна точність обробки фрезеруванням плоских поверхонь.

Фрезерування		Ra, мкм	Клас шорсткості	Точність
Торцове	Попереднє	25 – 3,2	2 – 5	12 та вище
	Чистове	3,2 – 0,8	5 – 7	8
	Тонке	1,6 – 0,4	7 – 8	6
Циліндричне	Попереднє	25 – 3,2	2 – 5	12 та вище
	Чистове	3,2 – 0,8	5 – 7	7 – 8
	Тонке	1,6 – 0,4	6 – 8	6

Під хвилястістю поверхні мається на увазі сукупність нерівностей, що періодично повторюються, у яких відстань між суміжними виступами або заглибленнями перевищують базову довжину. Хвилястість займає проміжне положення між відхиленнями форми і шорсткості поверхні, (рис. 5.21).

Параметри стосовно хвилястості встановлені рекомендаціями РЕВ (РС 3951 – 73).

$$W_z = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}{5}, \quad (5.4)$$

де W_z – висота хвилястості, як середнє арифметичне з п'яти її значень, визначених на довжині ділянки вимірювання L_w , що дорівнює не менше ніж п'яти дійсним найбільшим крокам S_w хвилястості (рис. 222, а).

$$S_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{wi}, \quad (5.5)$$

де S_w – середній крок хвилястості, як середнє арифметичне значення довжини відрізків середньої лінії S_{wi} , які обмежені точками їх перетину з сусідніми ділянками профілю.

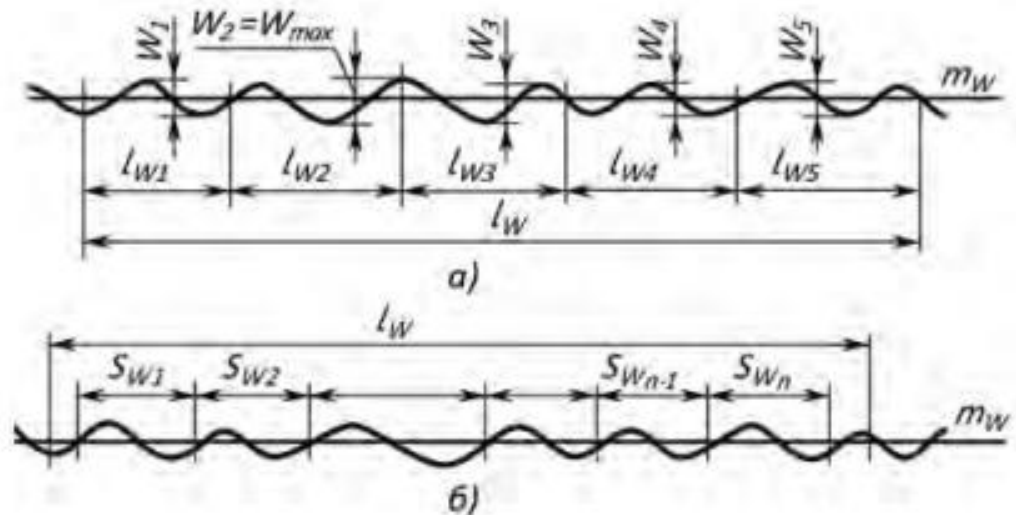


Рисунок 5.21 – Визначення параметрів хвилястості, а) – визначення висоти хвилястості, б) – визначення кроку хвилястості

Від причин які викликають хвилястість напряму залежить її форма. Найчастіше хвилястість має синусоїдальний характер в зв'язку з коливаннями в системі ВПД.

5.10 Поняття стійкості різального інструменту

Стійкість різального інструменту визначається як період роботи інструменту між процедурами заточування, що означає час від використання знову заточеного інструменту до моменту, коли його знос досягає критичного (допустимого) рівня. При визначенні стійкості враховується тільки час фактичної участі інструменту в процесі різання. Залежно від критерію зносу існують два види стійкості: фізична, де критерій визначається як припустимий знос на задній поверхні h_z , і розмірна, яка визначається після досягнення допустимого значення радіального зносу.

Цей параметр важливий для оцінки довговічності інструменту та його здатності підтримувати постійну продуктивність різання протягом тривалого часу. Стійкість є важливим технологічним фактором, що впливає на продуктивність і вартість різання. Чим вища стійкість інструменту, тим менше втрат часу, пов'язаних із його заточуванням та встановленням на верстаті. Таким чином, доцільно використовувати інструменти із підвищеними стійкісними властивостями, якщо інші їх характеристики, наприклад, підвищена крихкість, не заважають використанню в конкретній операції, також контролювати цей параметр запобігаючи його погіршенню.

Стійкість інструменту є змінною величиною і залежить від різних умов обробки, таких як режим різання, властивості оброблюваного матеріалу, жорсткість устаткування, а також використанні рідини для охолодження і геометрія заточування.

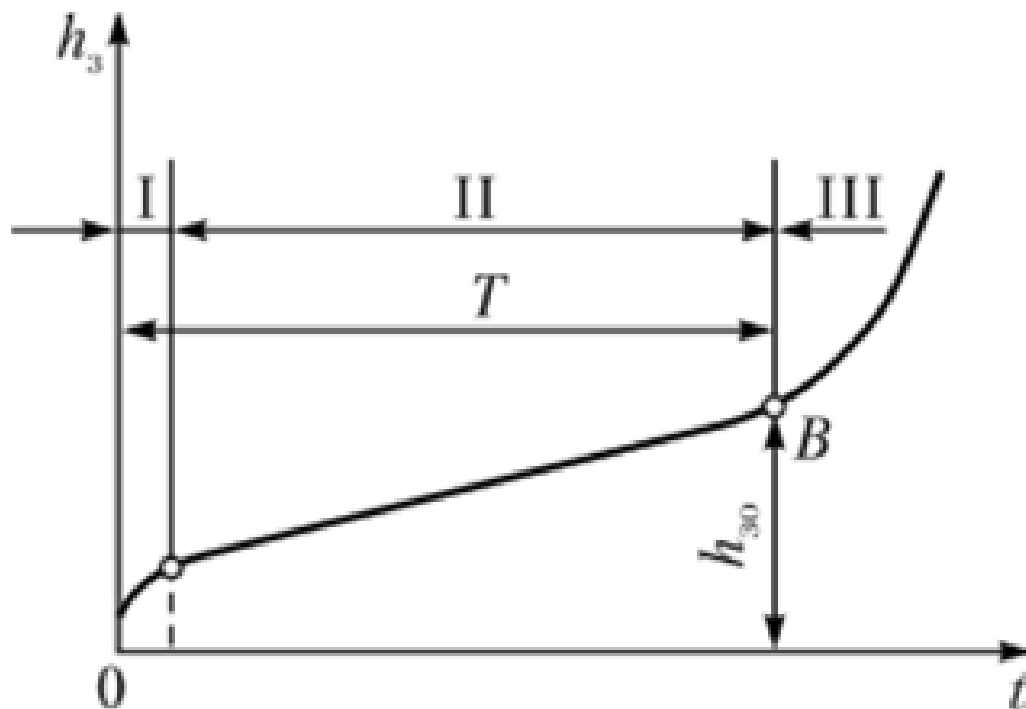


Рисунок 5.22 – Залежність зносу від часу обробки

I – ділянка припрацювання, II – період нормального зносу, III – період посиленого зносу, h_z – довжина зносу, T – стійкість різального інструменту під час обробки.

5.11 Вплив вібрацій на стійкість різального інструменту та якість оброблюваної поверхні

Вібрації в шпиндельному вузлу металообробного верстата можуть мати значний вплив на якість поверхні оброблених деталей. Шорсткість поверхні є критичним фактором для визначення якості оброблених поверхонь, і будь-які порушення в процесі обробки, можуть призвести до небажаної якості поверхні. Пропорційно збільшенню амплітуди коливань збільшується і висота хвилястості поверхні. Відомо, що величина значень амплітуди коливань може повністю визначати величину хвилястості при різних видах фрезерувань.

Шорсткість оброблюваної поверхні при роботі з вібраціями, прямо пропорційна амплітуді вібрацій. Зі збільшенням амплітуд коливання при фрезеруванні, пропорційна зростає, шорсткість. Наприклад, шорсткість обробленої поверхні при фрезеруванні кінцевими фрезами зі сплаву ВК8, титанового сплаву ВТ20 залежать від амплітуди і частоти коливань таким чином:

$$Ra = 0,18 + 0,022A - 0,0003f \quad (5.6)$$

Слід зазначити, що амплітуда і частота коливань не однаково впливають на шорсткість поверхні, збільшуючи частоту коливань, зменшується шорсткість, а збільшення амплітуди коливань призводить до збільшення показнику.

Особливо відзначаються вібрації на так званих резонансних частотах, коли частота власних коливань верстата співпадає з вимушеними коливаннями під час обробки, амплітуда коливань може збільшитись в десятки разів. Вібрації спричинені резонансом, можуть призвести до серйозніших проблем під час обробки, безпосередньо впливаючи на якість оброблюваної деталі.

Під час процесу фрезерування спостерігали екстремальну залежність стійкості від інтенсивності коливань [15]. Наприклад, дослідження, яке проводилися за участю кінцевих і дискових фрез, обладнаних твердим сплавом ВК8, і кінцевих фрез із швидкорізальної сталі Р18 при обробці титанових сплавів і нержавіючих сталей. Досягнення більшої амплітуди коливань досягалося за рахунок зменшення жорсткості оправки інструменту. Зменшення жорсткості інструмента в 9–10 разів приводило до збільшення амплітуд в 15–25 разів.

Для усіх вивчених процесів фрезерування існує оптимальна амплітуда коливань, при якій спостерігається максимальна стійкість інструменту, (рис. 5.23). Наприклад, крива 1 на рисуюнок 1 (а) відповідає обробці сплаву ОТ4 дисковою фрезою, оснащеною твердим сплавом ВК8. Крива 2 відображає обробку сплаву ВТ20 кінцевою фрезою з твердим сплавом ВК8, але з іншими параметрами. Крива 3 відображає ті ж умови, що і крива 2, але з іншим кутом нахилу гвинтової лінії фрези.

При оптимальних значеннях амплітуд коливань) поліпшується якість і точність обробки, а хвилястість і шорсткість поверхні знижуються. Залежність стійкості інструменту від амплітуди коливань ефективно апроксимується емпіричними рівняннями:

$$T = QA^m l^{-nA}, \quad (5.7)$$

де T – стійкість, хв;

A – амплітуда коливань, мкм;

Q, m, n – постійні, залежні від властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів і умов різання.

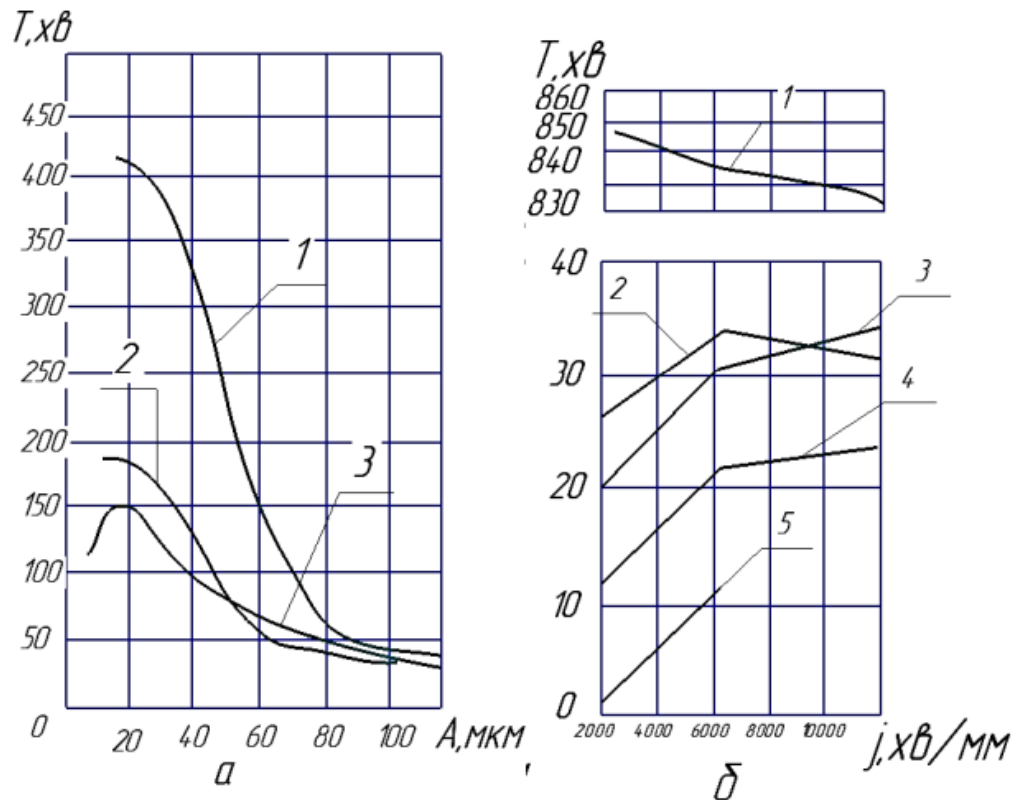


Рисунок 5.23 – Залежність стійкості фрези від амплітуди коливань і статичної жорсткості

Екстремальна залежність стійкості від амплітуди пояснюється тим, що коливання, що виникають під час різання, полегшують пластичне деформування. Крім того, коливання системи призводять до змін робочих кутів, швидкостей різання і товщини шару, що зрізається, що впливає на співвідношення між дотичними і стискаючими напруженнями, а також опір пластичній деформації.

Зі збільшенням інтенсивності вібрацій до певного оптимального рівня спостерігається зменшення сил різання, споживаної потужності, і збільшення стійкості інструменту. Проте, при певній інтенсивності, коливання можуть

спричинити втомне руйнування лез інструменту, що проявляється у виникненні тріщин та інших пошкоджень.

В роботі система контролю вібрацій буде працювати на основі відповідності амплітуди коливань та хвилястості поверхні, так як сказано вище, що величина (амплітуда) цих коливань може прямо визначати хвилястість оброблюваної поверхні.

Хвилястість, викликана надмірними амплітудами коливань, безпосередньо впливає на обробку деталі. У прецизійній обробці, де вимоги до точності становлять 8 або вище квалітет, навіть незначні відхилення від бажаного профілю поверхні можуть призвести до неприйнятних результатів. Хвилястість стає критичним параметром, оскільки вона сприяє відхиленням від заданих допусків і може поставити під загрозу загальну якість продукту.

Так, як хвилястість визначається вимогами до точності та якості обробки, а також являє собою одним із основних критеріїв відхилення форми оброблених поверхонь, буде логічним вважати допуски форми як критерій оцінки величини хвилястості поверхні.

Відхилення форми T_F визначається як розбіжність між фактичною формою реального елемента та його номінальною формою. Це вимірюється як максимальна відстань від точок реального елемента до прилеглого елемента по нормалі.

Відхилення форми можуть бути комплексними або окремими. Комплексні відхилення форми складаються з декількох окремих відхилень. У кресленнях числові значення допусків відхилень визначаються за умовним позначенням, а числові значення допусків окремих відхилень вказуються у технічних вимогах. Види відхилень та допусків форми наведені в таблиці 5.6.

Щодо допусків форми, якщо вони не вказані індивідуально, то допускаються будь-які відхилення форми в межах допуску розміру елемента. Проте, існує виняток з цього загального правила: для елементів, для яких вказані допуски паралельності, перпендикулярності, нахилу або торцевого биття, невказаний допуск прямолінійності або площинності, буде прийнятим

допуском на розташування чи торцевого биття. ГОСТ 25069-81 встановлює невказані допуски форми та розташування елементів деталей.

Таблиця 5.6 – Знаки для позначення допусків форми на кресленнях (за ДСТУ ГОСТ 2.308:2013).

№ п/п	Вид відхилення на допуску форми	Знак позначення допуску форми
1	Відхилення та допуск прямолінійності TFL	—
2	Відхилення та допуск циліндричності TFZ	
3	Відхилення та допуск круглості TFK	
4	Відхилення та допуск профілю повздовжнього перерізу TFP	=
5	Відхилення та допуск площинності TFE	

5.12 Розробка алгоритму аналізу даних для роботи системи

Початок роботи алгоритму починається зі зчитування даних про обробку, під такими даними мається на увазі інформація про умови точності та якості щодо поточної обробки. Допуски форми на обробляючу поверхню, які мають бути витримані. Величина цих допусків встановлює величину максимально допустимої хвилястості поверхні $W_{z\ max}$. Це робиться для того, щоб за цією величиною встановити межі зон амплітуд коливань.

Встановлення кореляції між критичними амплітудами коливань і хвилястістю підсилює важливість системи контролю вібрації. Підтримка амплітуд у встановлених межах безпосередньо означає дотримання умов обробки. Таким чином, система контролю вібрації не тільки сприяє

динамічній стабільності, але стає невід'ємним елементом у захисті якості та точності кінцевого обробленого продукту.

$$A_{кр} = W_{z\ max} = TF, \quad (5.8)$$

де $A_{кр}$ – критична амплітуда коливань;

$W_{z\ max}$ – максимальне значення хвилястості;

TF – допуск форми поверхні;

Таким чином критична амплітуда коливань дорівнює максимальній хвилястості поверхні. А от максимальне значення амплітуди коливань A_{max} визначається збільшенням критичної на 5% і більше відсотків. Але значення A_{max} можна корегувати за необхідністю.

$$A_{max} = A_{кр} \cdot 1.05 \quad (5.9)$$

Далі з блоку зберігання зчитуються попередньо оброблені дані, зняті з датчика, який розташований в ШВ верстата, вони проходять подальшу обробку.

Обробка даних для отримання амплітуди A включає в себе знаходження амплітуди коливань (вібропереміщення) з віброприскорень які надає акселерометр. Це можна зробити за допомогою інтеграційних перетворень.

Інтеграція віброприскорення до віброшвидкості. Інтегруються дані віброприскорення, щоб отримати віброшвидкість. А саме до дискретних точок даних, використовуються методи чисельного інтегрування, такі як правило трапеції або правило Сімпсона.

Правило трапеції та правило Сімпсона — це методи чисельного інтегрування, які використовуються для наближення визначеного інтеграла

функції. У нашому контексті, про обчислення вібропереміщення на основі даних віброприскорення. Ці методи можна застосувати для інтеграції точок даних дискретного віброприскорення для отримання віброшвидкості та вібропереміщення відповідно.

Правило трапеції приблизно визначає площу під кривою шляхом поділу площі на трапеції та підсумовування їхніх площ. Через дискретні точки даних y_i через однакові проміжки часу x_i , інтеграл можна апроксимувати наступним чином:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} [f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)], \quad (5.10)$$

де h – це відстань між точками даних $h = (x_{i+1}) - x_i$.

Правило трапеції забезпечує простий спосіб апроксимації інтегралів, але може бути не таким точним, як інші методи для сильно коливальних або швидкозмінних функцій.

Правило Сімпсона є більш точним методом, який апроксимує функцію за допомогою квадратичної інтерполяції між наборами трьох суміжних точок даних. Через дискретні точки даних через однакові проміжки часу, інтеграл можна апроксимувати наступним чином:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + \dots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)], \quad (5.11)$$

де h – це відстань між точками даних $h = (x_{i+1}) - x_i$.

Правило Сімпсона забезпечує більш точне наближення, ніж правило трапеції, для плавних і повільно змінних функцій.

Віброшвидкість $v(t)$ можна отримати шляхом інтегрування віброприскорення $a(t)$ через деякий час.

$$v(t) = \int a(t) dt \quad (5.12)$$

Інтеграція віброшвидкості до вібропереміщення. Інтегруються дані про віброшвидкість, щоб отримати вібропереміщення. Знову ж таки, використовуються методи чисельного інтегрування до дискретних точок даних.

$$x(t) = \int v(t) dt \quad (5.13)$$

Вібропереміщення визначають амплітуду коливань в шпіндельному вузлі.

Після чого, перевіряється умова, $A < A_{кр}$, якщо амплітуда є нормальною, тобто менше за критичну амплітуду $A_{кр}$ то верстат продовжує свою подальшу роботу (ніякого впливу вібрацій на показники якості обробки та стійкості інструмента не зафіксовано). Алгоритм потрапляє на початок роботи, тобто він зациклений. Якщо амплітуда не менше критичної $A_{кр}$, то перевіряється наступна умова.

Якщо амплітуда не більше або не дорівнює максимальній A_{max} , то система попереджає оператора про I-й рівень небезпеки та надає відповідні рекомендації, щодо зниження вібрацій, але верстат все рівно продовжує роботу, алгоритм повертається на початок.

Якщо ж умова $A \geq A_{max}$ підтверджується – це означає що була досягнута межа максимальної амплітуди коливань, система попереджає оператора про II-й рівень небезпеки та також надає відповідні рекомендації,

щодо зниження вібрацій, відбувається припинення роботи верстата, кінець алгоритму. Розподіл зон амплітуд вібрацій наведено на рисунку 5.24.

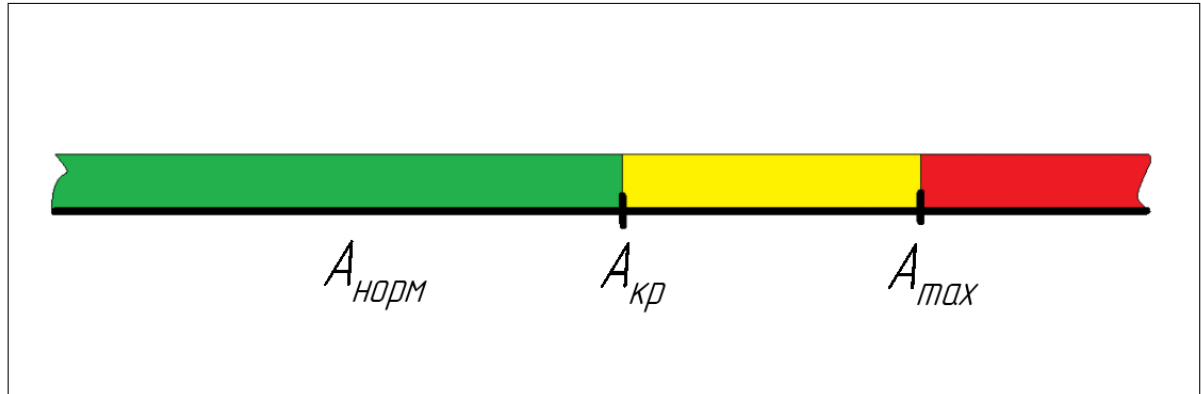


Рисунок 5.24 – Розподіл зон амплітуд вібрацій

Таким чином, алгоритм працює в зацикленому режимі постійно контролюючи значення амплітуди, щоб не контролювати та не допустити критичного впливу на показники які визначають технологічну надійність. Блок-схема алгоритму аналізу даних для роботи системи наведена на рисунку 5.25.

Система працює зі складним зв'язком між вібраціями шпиндельного вузла, критичними амплітудами та результуючою хвилястістю обробленої поверхні. Впроваджена система контролю вібрації, прагне підтримувати високі стандарти точності та якості оброблених поверхонь, необхідні для прецизійної обробки, гарантуючи, що кінцевий продукт відповідає заданим критеріям або перевищує їх.

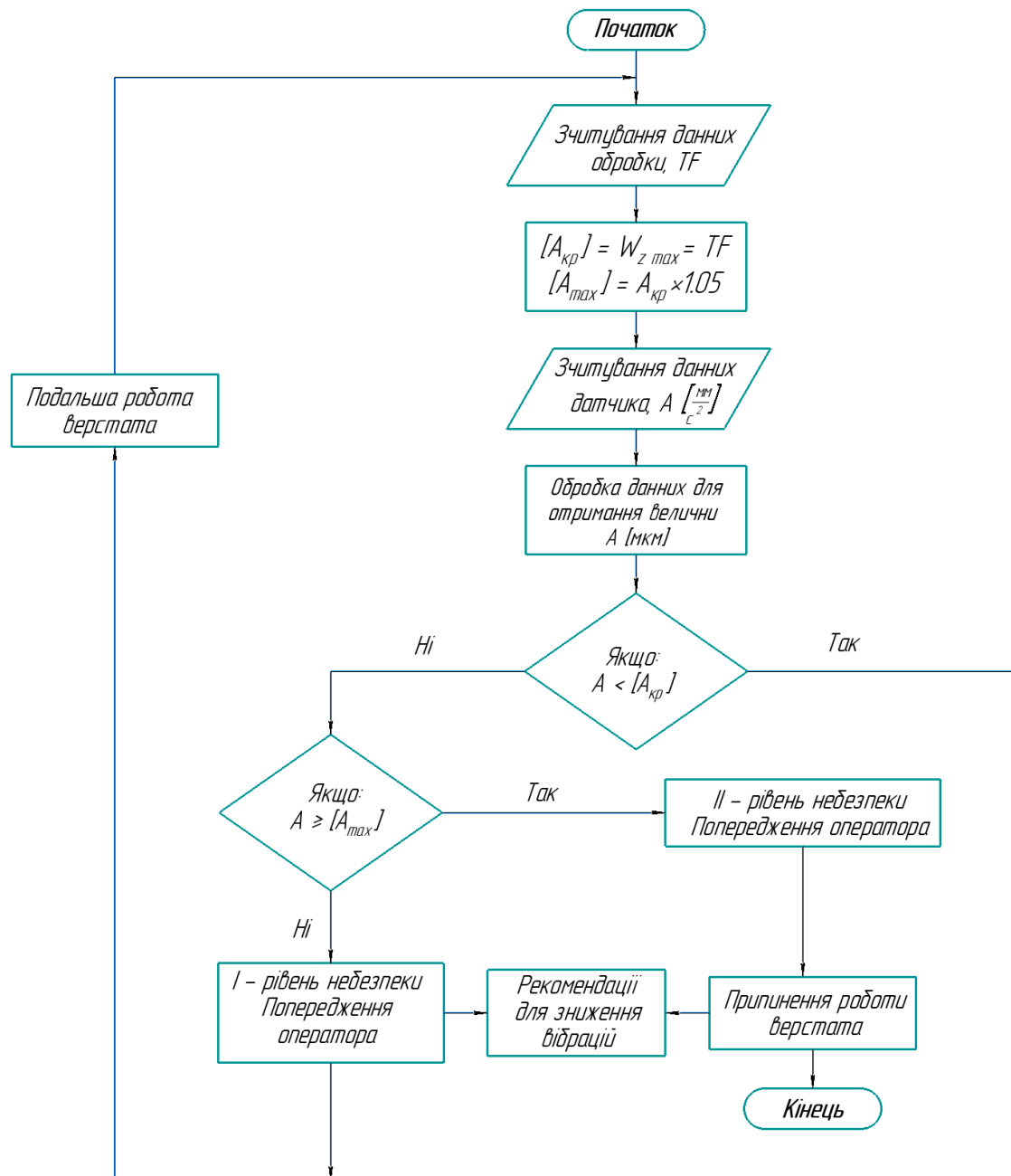


Рисунок 5.25 – Блок-схема алгоритму аналізу даних для роботи системи

В Додатку А наведена повна схема роботи системи контролю вібрацій в шпиндельному верстаті багатоцільового верстата Рісомех 60М, для підвищення його технологічної надійності.

Запропонована система контролю вібрації служить превентивним заходом від досягнення критичних амплітуд. Активно відстежуючи та поведінку шпиндельного вузла в режимі реального часу, система керування може гарантувати, що вібрації підтримуються в прийнятних межах. Цей проактивний підхід мінімізує хвилястість, таким чином дотримуючись суворих вимог до точності та якості обробленої поверхні.

5.13 Рекомендацій щодо зниження вібрацій

Основними рекомендаціями щодо зниження вібрацій будуть технологічні, а не конструктивні, адже останні потребують більше уваги та часу та більш економічно затратні для проведення.

Деякі рекомендації для зміни вібраційних параметрів (амплітуда коливань, частоти як вільних так і змущених коливань, тощо) при обробці:

Одним із головних чинників які впливають на вібрації в шпиндельному вузлу є режими різання (t , S , V), зміна режимів різання при обробці може сприяти зміні вібраційних параметрів при обробці, особливо слід відзначити глибину різання t , яка безпосередньо впливає на сили різання, які в свою чергу і задають величину амплітуд коливання під час обробки. Але на ряду із глибиною ще одним особливим чинником є швидкість різання V , яка несе суттєвий вплив в цьому явищі, так як швидкість задає частоту обертання різального інструменту, що і визначає одну із основних частот збурення, яка може привести до явища резонансу.

Також може допомогти заміна інструменту, так як інструмент безпосередньо впливає на параметри коливань, починаючи з геометрії інструменту (форма ріжучих пластин, кути різання) закінчуючи формою державки та станом зносу інструменту. Наприклад при фрезеруванні застосування фрез зі змінним розташуванням зубів (радіальним та

окружним), змінними кутами нахилу та кутами різання. Або розглянути можливість використання інструменту з антивібраційними функціями.

Заміна оправки для інструменту, вона теж несе не аби який вплив на параметри вібрацій. Оправка повинна бути добре збалансована.

Зміна вильоту інструменту, мінімізувати виліт інструменту, якщо це можливо, так як він впливає на параметри вібрацій.

Переконайтесь, що система змащення та охолодження працює належним чином, вони впливають, як на демпфуючі процеси при обробці так і на сили різання, все це пов'язано з вібраціями під час обробки.

ВИСНОВОК

В дипломному проєкті були підняті питання технологічної надійності металообробного обладнання, розглянуто та проаналізовано те які показники та як впливають на технологічну надійність.

Виконаний огляд та аналіз засобів які зможуть контролювати ці показники, та аналіз методів контролю показників, що визначають технологічну надійність металообробного обладнання. Завдяки чому була отримана цінна інформація про фактори, які впливають на продуктивність і надійність металообробних верстатів.

Проаналізовані вузли та процеси в верстаті, які найбільшою мірою впливають на технологічну надійність. Такими вузлами виявились: шпиндельний вузол, столи, поворотні столи, револьверна головка, приводи подачі, процеси: пружні відтискання в зоні інструмент-заготовка, знос інструменту. Розуміючи важливість сфери моніторингу та контролю, можна ефективно виявляти потенційні проблеми та впроваджувати заходи для підвищення технологічної надійності в цих зонах для підтримки оптимальної продуктивності металообробного обладнання.

Розробка узагальненої системи контролю та діагностики з використанням сенсорних технологій була досліджена, як засіб підвищення надійності металообробного обладнання. Формування та розробка системи, яка ефективно контролює та діагностує параметри машини, що впливають на її технологічну надійність є важливим кроком у запобіганні збоїв і скороченні часу простою. Використовуючи сенсорні технології, можна отримувати зворотній зв'язок у режимі реального часу, що дозволяє оперативно компенсувати або усувати похибки впроваджуючи коригувальні заходи, таким чином підвищуючи загальну надійність обладнання

Розроблена система контролю вібрацій в шпиндельному вузлу багатоцільового верстата Ricomax 60M. Побудована 3D модель

шпиндельного вузлу. Був проведений комплексний аналіз цього вузлу на вібрації та їх вплив на показники точності та якості, вплив на стійкість різального інструменту. Підібраний відповідний датчик та місце його встановлення, розглянута система збору даних, також було розроблено алгоритм аналізу даних цієї системи. Підсумовуючи, можна сказати, що ця система відіграє важливу роль у забезпеченні точності взаємодії інструмента та заготовки. Завдяки ефективному контролю та моніторингу вібрацій підтримується постійна якість та точність протягом усього процесу металообробки, також зберігається і стійкість різального інструменту. Робота цієї системи безпосередньо підвищує технологічну надійність верстата.

Впровадження сенсорних технологій і розробка системи контролю та діагностики мають великий потенціал для підвищення технологічної надійності металообробного обладнання. Завдяки безперервному моніторингу, контролю, та швидкому реагуванню, можна значно підвищити продуктивність роботи, подовжити термін служби та підвищити загальну надійність металообробного обладнання. Цей проєкт створює основу для подальших досягнень та інновацій у сфері надійності, сенсорних технологій та їх застосування в металообробній промисловості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Проников А.С. Надежность машин. [Текст] / А.С. Проников - М.: Машиностроение, 1981.- 479 с.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. [Текст] / А.С. Проников - М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.- 560 с.
3. Измерения в технике. Справ. изд. Под ред. П. Профоса. Пер. с нем. М., Металлургия, 1980. 648 с.
4. Moris, A.S. Measurement and Instrumentation: theory and application [Текст]: кн. / A.S. Moris, R. Langari ; Academic Press, 2012. – 617 с. – ISBN 978-0-12-381960-4.
5. Линевег Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. –544 с.
6. Путілов, М. С. Датчики акустичної емісії / М. С. Путілов // XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 4-5 грудня 2018 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна : збірник праць конференції / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, ФММ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 142–144. – Бібліогр.: 5 назв.
7. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки [Текст] : кн. / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, Г.С. Тымчик. – К.: Техника, 1991. – 152с.
8. Modern Sensors Handbook [Текст] : кн. / під ред. P. Ripka, A. Tіpek. – London: ISTE Ltd, 2007. – 536 с. – ISBN 978-1-905209-66-8.
9. Измерение в промышленности Справ. Изд. В 3-х кн. Кн.2 Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем./Под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 384 с.
10. Справочник технолога - машиностроителя [Текст]: / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 2 т.: ил.

11. Бойко І. А. Разработка математической модели и модальный анализ шпиндельного узла высокоскоростного обрабатывающего центра / И. А. Бойко // Вестник Гомельского гос. техн. университета им. П. О. Сухого. – 2016. – №4 (67). – С. 13–21.
12. Бойко, І. А. Динамічний аналіз поворотного стола 5-ти координатного обробного центру / І. А. Бойко, В. В. Солоха, Л. Й. Івченко // Вісник Чернігівського держ. технол. університету. Серія «Технічні науки». – 2014. – № 1 (73). – С. 134–143.
13. Data sheet, Type 8396A... [Електронний ресурс] / KISTLER, measure. analyze. Innovate. – Режим доступу : <https://www.kistler.com/GB/en/cp/mems-capacitive-triaxial-k-beam-accelerometers-8396a/P0000498>
14. ГОСТ 25142–82 Шероховатость поверхности – Государственный комитет СССР по стандартам. – Введ. 1983.01.01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.
15. Пуховський, Є. С. Вплив вібрацій на стійкість багатолезвийного інструменту [Текст] / Є. С. Пуховський // Технічна інженерія. – 2022. – №2 (90). – ISSN 2706-5847.
16. Kudinov V.A. Dinamika stankov. [Machine tool dynamics], М.: Mashinostroenie, 1967, 359 s.
17. A survey on predictive maintenance for industry 4.0. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2002.08224>.
18. Pech M. Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory/ M. Pech, J. Vrchota, J. Bednář // Sensors. – 2021. – Т.21, вип.4. – 1470.
19. Huihui M. The vibration analysis of the CNC vertical milling machine spindle system considering nonlinear and nonsmooth bearing restoring force/ M. Huihui, L. Changyou, W. Chenyu Wang, X. Mengtao, Z. Yimin // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Volume 161. – 107970.

ДОДАТОК А

Повна схема роботи системи контролю вібрацій в шпиндельному верстаті багатоцільового верстата Рісмах 60М, для підвищення його технологічної надійності.

