

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультету  
Кафедра виробництва приладів

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Михайло БЕЗУГЛИЙ

« 19 » 06 2023 р.

**Дипломний проєкт**

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології  
виробництва приладів»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Система моніторингу роботи фрезерного верстата»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПБ-92

Сорока Денис Сергійович



Керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Стельмах Наталія Володимирівна



Консультант з \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Рецензент:

*ст викладач кафедри КІОМС, к.т.н.*

*Машута М.С.* \_\_\_\_\_ *Сорока*

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент 

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультету**  
**Кафедра виробництва приладів**


Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Михайло БЕЗУГЛИЙ

«03» березня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Сороки Дениса Сергійовича**

1. Тема проєкту «Система моніторингу роботи фрезерного верстата», керівник проєкту Стельмах Наталія Володимирівна кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. №2057-с
2. Термін подання студентом проєкту 05 червня 2023 року.
3. Вихідні дані до проєкту: Робочий діапазон частот що генеруються верстатом від 400 до 10 000 Гц, параметри мікрофона: чутливість 1-18 мВ/Па, С/Ш - 64-66 дБ, робочий опір 8Ом, діапазон частот від 20 до 20 000 Гц, мова програмування Python, бібліотека PyAudio, бібліотека NumPy, бібліотека TensorFlow, бібліотека Matplotlib.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Аналіз проблеми моніторингу та управління роботою верстатів. 2. Аналіз існуючих рішень. 3. Опис розробленого програмного забезпечення. 4. Результати тестування програмного забезпечення. 5. Висновки та подальші можливості розвитку проєкту. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 1. Структурна схема системи. 2. Функціональна схема системи. 3. Блок-схема програми. 4. Схема архітектури програмного

забезпечення. 5. Зображення інтерфейсу користувача. 6. Графіки та діаграми результатів тестування.

6. Дата видачі завдання 03 березня 2023 року.

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз проблематики та вибір інструментів для розробки	03.03-13.03.2023	вик.
2	Аналіз відомих програмних рішень	14.03-24.03.2023	вик.
3	Розробка функціональної схеми роботи системи	25.03-13.04.2023	вик.
4	Розробка алгоритму функціонування системи моніторингу	15.04-25.04.2023	вик.
5	Розробка архітектури та загальної структури програми	26.04-03.05.2023	вик.
6	Розробка структур окремих підсистем	04.03-13.05.2023	вик.
7	Програмна реалізація системи	14.05-19.05.2023	вик.
8	Тестування програмного забезпечення	20.05-24.05.2023	вик.
9	Підготовка пояснювальної записки та графічного матеріалу	25.05-29.05.2023	вик.
10	Захист дипломного проєкту.	30.06-02.06.2023	вик.

Студент

Денис Сорока

Керівник

## РЕФЕРАТ

Дипломний проект на тему:

### «Система моніторингу роботи фрезерного верстата»

Текстова частина дипломної роботи: 62 с., 17 рис., 1 табл., 34 джерел

**Мета і завдання роботи:** Метою цього проекту є розробка системи моніторингу фрезерного верстату яка дозволить користувачеві визначати стан фрезерного верстату базуючись на аудіо аналізі даних отриманих в результаті його роботи, базуючись на наданих користувачем даних, за допомогою методів машинного навчання. Це дозволить користувачеві за умови збору якісних проводити базовий аналіз стану верстату спеціально адаптований під даний верстат.

**Структура системи:** Система складається з аудіо детектора (мікрофона), пристроїв передачі даних, та програмного забезпечення що здійснює запис, обробку аналіз даних. Програма реалізована на мові програмування Python, з використанням методів обробки аудіо даних, для аналізу було використано метод машинного навчання класифікатор випадковий ліс.

**Апробація результатів:** У роботі продемонстровано використання програми для аналізу зразків двох станів роботи верстату.

Ключові слова: фрезерний верстат, моніторинг роботи обладнання, машинне навчання.

## ABSTRACT

Text part of the diploma paper consist of 62 pages, 17 figures, 1 tables, 34 sources.

**Purpose and task of the work:** The purpose of this project is to develop a milling machine monitoring system that will allow the user to determine the state of the milling machine based on audio analysis of the data obtained as a result of its operation, based on the data provided by the user, using machine learning methods. This will allow the user, subject to the collection of quality data, to conduct a basic analysis of the condition of the machine specially adapted for this machine.

**System structure:** The system consists of an audio detector (microphone), data transmission devices, and software that performs recording, data processing and analysis. The program is implemented in the Python programming language, using methods of audio data processing, the machine learning method of the random forest classifier was used for analysis.

**Approbation of the results:** The work demonstrates the use of the program for the analysis of samples of two states of machine operation.

Keywords: milling machine, equipment monitoring, machine learning.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	10
1. Аналіз проблеми моніторингу та управління роботою верстатів .....	10
1.1. Опис роботи фрезерних верстатів та їх основних характеристик.....	10
1.2. Виявлення проблем, що виникають при моніторингу та управлінні роботою верстатів .....	16
1.3. Виявлення потреби в системі моніторингу роботи фрезерних верстатів ...	25
2. Аналіз проблеми моніторингу та управління роботою верстатів.....	28
2.1. Огляд наявних систем моніторингу роботи верстатів .....	28
2.2. Порівняння різних підходів та технологій, використовуваних у цих системах.....	34
2.3. Визначення переваг та недоліків існуючих рішень .....	39
КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....	43
3. Опис розробленого програмного забезпечення.....	43
3.1. Визначення функціональних вимог до системи моніторингу .....	43
3.2. Опис архітектури та компонентів системи.....	44
3.3. Опис алгоритмів та методів, використовуваних у програмному забезпеченні.....	48
3.4. Пояснення інтерфейсу користувача та можливостей взаємодії з системою ..	52
4. Результати тестування програмного забезпечення .....	53
4.1. Опис методів та процедур тестування системи.....	53
4.2. Проведення експериментів та аналіз результатів .....	54
4.3. Виявлення переваг та недоліків розробленої системи.....	59
ВИСНОВКИ ТА ПОДАЛЬШІ МОЖЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ПРОЕКТУ .....	62
5.1. Підсумок проведених досліджень та розробки .....	62
5.2. Загальна оцінка ефективності системи моніторингу .....	62
5.3. Рекомендації щодо подальшого розвитку .....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	63
ДОДАТКИ .....	67

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ЦПК	–	цифрове програмне керування
ЧПУ	–	числове програмне управління
BDC	–	Bottom Dead Center
BER	–	Bit Error Rate
CAM	–	Computer-Aided Manufacturing
CNC	–	Computer Numerical Control
IaaS	–	Infrastructure as a Service, інфраструктура як послуга
IIoT	–	Industrial Internet of Things
MMS	–	Machine Monitoring System
PaaS	–	Platform as a Service, платформа як послугу
RSM	–	Response Surface Methodology
SaaS	–	Software as a Service, програмне забезпечення як послуга
SLD	–	Stability Lobe Diagram
SNR	–	Signal-To-Noise Ratio
WSNs	–	Wireless Sensor Networks

## ВСТУП

*Актуальність теми дослідження.* Неполадки при роботі фрезерного верстату, що використовується в комерційній діяльності призводять до простоїв на виробництві, затримці виконання замовлень та угод, втраті фінансових ресурсів та репутаційних збитках. Планові перевірки не адаптовані до реального стану верстату що призводить до нераціональних витрат на перевірку, для планування ефективного використання верстату необхідно мати статистичні данні про час його роботи, витрати часу на окремі операції та час простою між використанням верстату.

Разом ці чинники зумовлюють необхідність систем моніторингу роботи фрезерного верстату, що збирають необхідні данні та аналізують їх з метою завчасного виявлення та виправлення несправностей.

При наявності великого парку фрезерних верстатів із застарілим програмним забезпеченням актуальними є покращення їхніх технічних характеристик за рахунок заміни програмного забезпечення, використання найсучасніших інструментів провідних фірм-виробників, а також прогресивних пристосувань для підвищення продуктивності та якості виготовлених деталей.

Системи моніторингу роботи обладнання задовольняють ці потреби. В залежності від розміру та типу виробництва та обладнання використовуються різні методи для аналізу роботи, стану, продуктивності та ефективності в відповідності до вимог споживача.

Проведений мною попередній аналіз наукових теоретичних праць та результатів експериментальних досліджень щодо можливих несправностей фрезерних верстатів свідчить, що розробка систем промислового моніторингу, зокрема щодо контролю роботи фрезерних верстатів, містить значний технічний і комерційний потенціал.

Метою роботи є розробка прототипу системи моніторингу фрезерного верстату, що аналізує стан фрезерного верстату на основі акустичних даних, отриманих в результаті його роботи, створивши модель машинного навчання

базуючись на зібраних користувачем даних. За умови збору якісних даних ця система дасть користувачеві можливість проводити базовий аналіз стану верстату спеціально адаптований під даний верстат.

В процесі дипломного проектування виконуються такі завдання:

- аналіз проблеми моніторингу та управління роботою верстатів, зокрема, опис роботи фрезерних верстатів та їх основних характеристик, виявлення проблем, що виникають при моніторингу та управлінні роботою верстатів, визначення потреби в системі моніторингу роботи фрезерних верстатів;
- аналіз проблеми моніторингу та управління роботою верстатів, а саме: огляд наявних систем моніторингу роботи верстатів, порівняння різних підходів та технологій, використовуваних у цих системах, визначення переваг та недоліків існуючих рішень;
- опис розробленого програмного забезпечення, в тому числі: визначення функціональних вимог до системи моніторингу, архітектури та компонентів системи, пояснення інтерфейсу користувача та можливостей взаємодії з системою;
- оформлення результатів тестування програмного забезпечення: опис методів та процедур тестування системи, проведення експериментів та аналіз результатів, виявлення переваг та недоліків розробленої системи;
- формулювання висновків та подальші можливості розвитку проекту
- підведення підсумків проведених досліджень та розробки, визначення загальної оцінки ефективності системи моніторингу, рекомендації щодо подальшого розвитку.

Структурно дипломний проект складається із

Дипломний проект складається з пояснювальної записки на 62 сторінках (не включаючи Список першоджерел і Додатків) та графічного матеріалу (5 креслень). Список опрацьованих першоджерел складає 34 посилання.

## ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1. Аналіз проблеми моніторингу та управління роботою верстатів

#### 1.1. Опис роботи фрезерних верстатів та їх основних характеристик

Фрезерний верстат – металообробний верстат, призначений для обробки фрезою плоских і фасонних поверхонь, тіл обертання, зубчастих коліс та інших заготовок. Деталь, закріплена на столі, робить поступальний рух (криволінійний або прямолінійний), при цьому фреза робить обертовий рух. Керування металорізальним верстатом здійснюється вручну, механічно або автоматично за допомогою системи ЧПК.

Основні *типи* фрезерних верстатів:

1. Універсально-фрезерний верстат – це металорізальний верстат із горизонтальним розташуванням шпинделя, призначений для роботи з різними типами фрез. Цей фрезерний верстат використовується для обробки вертикальних і горизонтальних фасонних і гвинтових поверхонь, пазів і кутів. У горизонтальній площині верстат має поворотний стіл, що дозволяє фрезерувати гвинтові канавки.
2. Горизонтально-фрезерний верстат відрізняється від універсально-фрезерного відсутністю поворотного механізму.
3. Широкоуніверсальний фрезерний верстат – це металорізальний верстат, який має додаткову шпиндельну головку. Її можна повертати під будь-яким кутом у двох взаємно перпендикулярних площинах. Для більшої ефективності на поворотній головці монтують накладну фрезерну головку. З її допомогою можна обробляти на верстаті деталі складної форми не лише фрезеруванням, але і свердлінням, зенкеруванням, розточуванням і т. д.
4. Вертикальний консольно-фрезерний верстат – металорізальний верстат з вертикально розташованим шпинделем. У деяких моделях верстатів допускається зсув уздовж своєї осі й поворот навколо горизонтальної осі, розширюючи тим самим технологічні можливості верстата.

5. Вертикально- і горизонтально-фрезерний безконсольний верстат призначений для обробки різних поверхонь, а також пазів у великогабаритних деталях. У цих верстатах відсутня консоль, а полози та стіл переміщуються по напрямних станини, встановлених на фундамент.

6. Поздовжньо-фрезерний верстат – металорізальний верстат, який використовується для обробки великогабаритних заготовок. Обробка здійснюється, головним чином, торцевою фрезою, також є можливість обробки циліндричними, кінцевими, дисковими та фасонними фрезами.

**Система позначень.** За прийнятою класифікацією фрезерні верстати відносять до шостої групи, але частина фрезерних верстатів входить й у п'яту групу – зубо- і різьбообробних верстатів. Кожен верстат має свій шифр, який складається з цифр і букв: перша цифра позначає групу верстата, друга – його тип:

- 1 – консольні вертикально-фрезерні,
- 2 – безперервної дії,
- 3 – одностійкові поздовжньо-фрезерні,
- 4 – копіювальні та гравірувальні,
- 5 – вертикальні безконсольні (із хрестовим столом),
- 6 – поздовжньо-фрезерні,
- 7 – широкоуніверсальні,
- 8 – консольні, горизонтальні,
- 9 – різні.

Третя та четверта цифри позначають один з характерних розмірів верстата. Якщо буква розташована між першою та другою цифрами, то це означає, що конструкція верстата модифікована. Наприклад, універсальний консольно-фрезерний верстат протягом багатьох років вдосконалювався, тому змінювався шифр його позначення: *682*, *6H82*, *6M82*, *6P82*, *6T82* та *6P82Ш*.

Коли буква розташована наприкінці номера верстата, те це означає наступне:

- конструктивну модифікацію основної моделі, наприклад, *6P82M* – верстат горизонтально-фрезерний; *6P12B* – швидкохідна модель, *6P82Ш* – широкоуніверсальний;
- різне виконання верстатів по класах точності: Н – нормальної точності, П – підвищеної, В – високої, А – особливо високої і С – верстати особливо точні;
- різні виконання по використовуваних системах керування верстатами.

Фрезерні верстати із програмним управлінням можуть бути додатково оснащені механізмами автоматичної зміни інструментів. Якщо цей механізм виконаний у вигляді револьверного барабана, у позначенні моделі верстата після цифр ставиться буква Р (наприклад, *6P13PФ3*), якщо ж він виконаний у вигляді інструментального магазину – буква М (наприклад, *6T13MФ4*).

В окремих випадках після основного позначення моделі через дефіс (рису) ставляться одна або дві цифри, які вказують на те, що заводом-виготовлювачем внесені зміни в базову модель, пов'язані в основному із приводами подач або із системами керування. У чому складаються ці зміни, вказується в паспорті верстата.

Залежно від різального фрезерного інструмента оброблювані поверхні набувають плоскої, фасонної та інших форм, а процес оброблення називають відповідно фрезеруванням площин, фрезеруванням канавок, фрезеруванням шліців і прорізу, фрезеруванням фасонних поверхонь тощо. Процес відокремлення готової деталі від заготовки називається відрізуванням.

Фрезерні верстати бувають різних конструкцій, які, залежно від виконуваної на них роботи й конструктивних особливостей, поділяють на верстати загального призначення і спеціальні.

За ступенем спеціалізації металорізальні верстати поділяють на універсальні, спеціалізовані та спеціальні.

На універсальних верстатах можна обробляти деталі найрізноманітніших назв і розмірів. Спеціалізовані верстати призначені для обробки деталей різних розмірів, але лише однієї назви. Спеціальні верстати призначені лише для обробки однієї певної деталі.

За ступенем точності розрізняють верстати нормальної точності та високоточні (прецизійні). За масою розрізняють верстати нормальної маси (до 10 т), важкі (10...100 т) і особливо важкі (понад 100 т).

Горизонтально-фрезерні верстати характеризуються горизонтальним розташуванням шпинделя та наявністю у верстата трьох взаємно перпендикулярних рухів – поздовжнього, поперечного та вертикального.

У промисловості із загального парку устаткування фрезерні верстати становлять близько 18%, а в авіаційній промисловості до 50–60% всього заводського парку.

Процес фрезерування реалізується з використанням двох або трьох рухів. Головний рух різання обертання фрези, інші – рухи подачі. В якості інструмента використовують фрези різних конструкцій [19].

Горизонтально-, вертикально- і універсально-фрезерні верстати є основними модифікаціями консольно-фрезерних верстатів і є верстатами загального призначення.

На фрезерному верстаті виконуються наступні операції [19]:

- операція звичайного або слябового фрезерування;
- операція фрезерування ВГОРУ та ВНИЗ;
- операція торцевого фрезерування;
- операція кінцевого фрезерування;
- операція групового фрезерування;
- операція фрезерування;
- операція фрезерування канавок;
- операція зубофрезерування;
- операція бокового фрезерування;
- операція фрезерування Т-образних пазів.

### **Фрезерні верстати з ЧПК**

Комп'ютерне числове програмне керування або ЧПК – це автоматизоване керування обробними інструментами за допомогою комп'ютера. Верстат з ЧПК

обробляє шматок матеріалу відповідно до специфікацій за допомогою закодованої програмної інструкції без прямого ручного оператора.

Для використання верстатів з ЧПК потрібні два типи програмного забезпечення: CAD (комп'ютерне проектування) і CAM (комп'ютерне автоматизоване виробництво). В основі лежить самостійно розроблена за допомогою програми CAD модель, тоді як програма CAM повідомляє комп'ютеру, як потрібно будувати модель [11].

Фрезерні верстати з ЧПК використовують обертові інструменти для відрізання матеріалу з інструкціями, отриманими з файлу CAD, для створення конструкції деталі. Функціонування та координати фрези контролюються комп'ютером фрезерного верстата з мінімальними людськими втручаннями, необхідними для завершення виробництва.

Фрезерний верстат з ЧПК виготовляє складні деталі для кількох галузей промисловості за допомогою субтрактивної технології обробки. Фрезерний верстат відрізає заготовку та виготовляє кінцеву деталь через 3, 4 або 5 осей. Залежно від кількості осей, які має фрезерний верстат з ЧПУ, збільшується складність кінцевої деталі. Фрезерний верстат з ЧПК використовується різними галузями промисловості, включаючи аерокосмічну та медичну промисловість, для виготовлення складних деталей.

Процес фрезерування з ЧПК працює за допомогою машини, яка зчитує закодовані інструкції, а потім вводить їх у дію. Все починається з розробки файлу 3D CAD, який представляє кінцеву частину. Після завершення дизайн перетворюється в машиночитаний формат. Програмне забезпечення CAM (Computer-Aided Manufacturing) потім експортує це в програму верстата з ЧПК, зазвичай у форматі G-коду, який діє як інструкції, керуючи кожним рухом машини. Це повторює дизайн CAD у вибраному матеріалі з високою точністю та ефективністю [32].

Згідно з ГОСТ 21609-82Е, ГОСТ 21610-82Е, ГОСТ 21613-82Е верстатобудівною промисловістю випускаються такі типи верстатів з ЧПУ [3]:

1. Токарної групи – токарно-гвинторізні, токарно-револьверні, лоботокарні, токарно-карусельні, одно-та двостоякові з різним числом супортів.
2. Фрезерної групи – консольно-фрезерні горизонтальні та вертикальні; вертикально-фрезерні, консольні з хрестовим столом; поздовжньо-фрезерні вертикальні двостоякові з вертикальною бабкою, з поворотним пересувним і не пересувним столом.
3. Вертикально-розточувальної групи – вертикально-свердлильні одностоякові з хрестовим столом і револьверною головкою, двостоякові з револьверною головкою; горизонтально-розточувальні з непересувним переднім стояком і хрестовим столом, з поздовжньо-пересувним стояком і поперечнопересувним поворотним столом, а також з поздовжньо- та поперечнопересувним стояком.

З досвіду експлуатації верстатів з ЧПУ відомо, що при обробці одних деталей їхня ефективність є достатньо високою, а при обробці інших – незначною. Таким чином, ефективність використання верстатів з ЧПУ залежить від конструктивних і технологічних особливостей.

Основна особливість фрезерних верстатів з ЧПУ – автоматизація всіх формоутворюючих та допоміжних рухів і зміна інструмента, режимів різання, корекція положення інструменту тощо.

Для високопродуктивного процесу фрезерування площини на фрезерних верстатах з ЧПУ застосовують пальцеві циліндричні, пальцеві сферичні, торцеві та дискові фрези.

При базуванні заготовок на фрезерних верстатах з ЧПУ необхідно у всіх випадках позбавляти їх усіх ступенів вільності відносно нульової точки. Базування повинно забезпечити однозначне положення заготовки на верстаті при обробці всіх її поверхонь. Бажано забезпечити принцип сполучення баз.

При обробці площин, розташованих під кутом, застосовують кутові плити з постій- 55 ним кутом  $90^\circ$  або універсальні, що допускають поворот на будь який кут навколо однієї або двох осей.

Для закріплення деталей застосовують лещата різних конструкцій: прості неповоротні, поворотні навколо однієї або двох осей та спеціальні з ручним, пневматичним, гідравлічним або пневмогідравлічним приводом.

**Переваги процесу фрезерування з ЧПУ** - висока якість і точність, які досягаються за 100%-автоматизованого виробничого процесу. Окрім того, Фрезерування з ЧПУ забезпечує високу продуктивність, оскільки є менш трудомістким процесом

## **1.2. Виявлення проблем, що виникають при моніторингу та управлінні роботою верстатів**

Повторювана робота, яку зазнає верстат або заготовка в процесі виробництва, іноді може призвести до збоїв у вигляді втоми та розтріскування [33]. Раннє виявлення таких несправностей необхідне, щоб запобігти ймовірності значного пошкодження обладнання або погіршення якості продукції. Одним із рішень подолання цієї проблеми є раннє виявлення шляхом впровадження системи моніторингу.

Для перевірки стану машини та виробничого процесу системі моніторингу зазвичай потрібні такі параметри даних, як **вібрація, напруга та температура**. Ці параметри можна виміряти під час таких виробничих процесів, як фрезерування [3]. Кожен виробничий процес має унікальні характеристики та використовує різноманітне обладнання та суворі протоколи. Ці характеристики заважають пристрою моніторингу детально спостерігати за станом машини та процесом виробництва [4].

У машинах, які виконують циклічні операції, вібрація є одним з параметрів, який потрібно контролювати. Таким чином, датчики вібрації широко використовуються як основний чутливий пристрій для систем моніторингу, особливо в механізмах циклічної роботи, таких як фрезерні верстати [16].

Вібрація - це періодичний рух, який допустимо, коли це бажано. Проблеми можуть виникнути, коли вібрація є неконтрольованою, а значення вище бажаного,

що призводить до механічної несправності або погіршення якості виробів обробки.

Одним із виробничих процесів, які широко використовуються для виробництва машинобудівної продукції, є фрезерування. Фрезерування – це процес видалення матеріалу, у якому використовується фрезерний інструмент циліндричної форми, який обертається та рухається за попередньо визначеною траєкторією.

Багато факторів можуть створювати вібрацію в процесі фрезерування, наприклад затискання інструменту, биття інструменту, затискання заготовки та налаштування параметрів фрезерування, таких як глибина різання, швидкість шпинделя та швидкість подачі.

Вібрація при фрезеруванні може призвести до стукоту. Шум - це явище самозбудженої вібрації структур і процесів обробки [22, 34]. За даними Yue et al. [34], існує три типи механічної вібрації в процесах різання металу, тобто **вільна вібрація**, **вимушена вібрація** та **самозбуджена вібрація**. Вільна вібрація в основному спричинена ударом. Вимушена вібрація виникає через дисбаланс між шестернями, підшипниками, шпинделями та іншими верстатами, тоді як самозбуджена вібрація спричинена змінними силами, створеними взаємодією між інструментом і деталлю.

Rejzud і Eunian [22] стверджують, що під час обробки генеруються два типи вібрації: **вимушена вібрація** та **стукіт**. Відновлювальний тріск виникає через різницю у фазі вібрації між поточним і попереднім різаннями. Скреготіння виникає, коли дві вібрації не збігаються по фазі [22].

Вібрація прискорює зношування інструменту та погіршує якість обробленої поверхні, збільшуючи шорсткість поверхні [16, 34]. Знос інструменту також може збільшити залишкову напругу в нижній частині обробленої деталі [9]. Прискорене зношування інструменту скоротить термін служби інструменту та зрештою збільшить час виготовлення та вартість. Якщо вібрація неконтрольована, вона може навіть погіршити здоров'я оператора.

Ефект вібрації перебільшений при мікрофрезеруванні (мікрофрезеруванні) через малий розмір фрезерного інструменту, слабку жорсткість інструменту, високу швидкість шпинделя та нерівномірну твердість матеріалів. Крім того, вібрація при мікрофрезеруванні збільшує утворення задирок, де розміри задирок можна порівняти з особливостями, що створюються [10].

Багато технологій виявляють вібрацію та стукіт за допомогою методів обробки сигналів, таких як сигнали сили, сигнали вібрації, звукові сигнали або сигнали зображення [34]. Щоб перевірити вібрацію та стукіт і визначити найкращі параметри різання для процесу фрезерування, зазвичай використовується діаграма пелюстків стабільності (SLD) [28]. Ця діаграма також використовується для прогнозування стійкості процесів помелу.

Розширення SLD включає осьову глибину різання та швидкість шпинделя, які можуть бути використані для визначення параметрів стійкості до тріскотіння.

Дослідники та інженери намагалися знизити рівень вібрації, спостерігаючи за параметрами обробки. Оптимальний набір параметрів обробки залежить від матеріалів заготовки, інструментальних матеріалів і верстатів [25].

Правильна комбінація таких параметрів фрезерування, як глибина різання, швидкість шпинделя та швидкість подачі, може зменшити вібрацію та зменшити швидкість знімання матеріалу.

Шайк і Срінівас (цитуються за [33]) стверджували, що швидкість шпинделя та осьова глибина різання значно впливають на амплітуду вібрації. Крім того, комбінація низької подачі та високої швидкості шпинделя може зменшити амплітуду вібрації інструменту.

Рахман та ін. (цитуються за [33]) припустили, що глибина різання та швидкість подачі є значними факторами вібрації інструменту під час фрезерування. Подібним чином Tran і Liu (цитуються за [33]) помітили, що швидкість подачі є критичним параметром поведінки вібрації. Навпаки, Chuangwen та ін. (цитуються за [33]) стверджували, що швидкість подачі лише незначно впливає на вібрацію фрезерування, тоді як збільшення глибини різання призводить до збільшення сили різання, таким чином збільшуючи вібрацію.

Таким чином, в ході наукових експериментів було виявлено [33], що характеристики вібрації, особливо її прискорення, амплітуда, стандартне відхилення та середньоквадратичне значення (RMS), збільшуються при збільшенні швидкості подачі і глибини різання. Навпаки, збільшення швидкості різання зменшує вібрацію. Помічено, що швидкість різання є значним фактором, що впливає на вібрацію інструменту. Швидкість шпинделя є найбільш критичним параметром у контролі вібрації при мікрофрезеруванні. Низька швидкість шпинделя може зменшити вібрацію.

Для прогнозування та придушення вібрації були запропоновані різні методи аналізу моделювання та експерименти з фрезерування в різних умовах фрезерування, наприклад використання методології поверхні відгуку (RSM) і штучної нейронної мережі.

Математичні та статистичні моделі з використанням методології поверхні відгуку (RSM) були застосовані з різними параметрами різання для прогнозування обробки поверхні, вібрації інструменту та зносу інструменту. Модель поверхні відгуку забезпечила високу точність прогнозування вібрації та оптимізації параметрів фрезерування, особливо мікрофрезерування прямих канавок.

Штучні нейронні мережі були застосовані для прогнозування вібрації при фрезеруванні. Дані про вібрацію можна витягти зі звуку, який створює процес. У наш час мобільні платформи, такі як телефони, мають розширені можливості для запису та аналізу звукових даних процесів обробки. Таким чином, можна побудувати спрощений SLD. Pejryd і Eynian (цитуються за [33]) розробили програмне забезпечення під назвою iCut для запису звуку операцій обробки та створення SLD. Алгоритм програмного забезпечення базується на теорії балаканини та розроблений для мобільних платформ, таких як телефони та планшети. Аналіз частоти домінуючого звуку від SLD використовується для пропозиції нової швидкості шпинделя.

Обладнання в промисловому секторі зараз оновлюється, автоматизується та підключається до Інтернету в рамках промислової революції 4.0, наприклад, шляхом встановлення бездротових систем моніторингу (цитуються за [33]).

Заправлені кабелі та висока вартість великогабаритного обладнання є основними проблемами дротових систем моніторингу. З цієї причини в нових версіях моніторингу верстатів застосовують бездротову систему моніторингу вібрації, яка працює на основі принципу роботи бездротових сенсорних мереж (WSN).

У цьому дослідженні [33] була розроблена бездротова система моніторингу вібрації для вирішення проблем, з якими стикаються дротові системи моніторингу вібрації. Відсутність кабелів у системі виключає можливість заправлення кабелів у механізм.

Бездротова система моніторингу вібрації, запропонована в цій статті, складається з трьох компонентів: вузла датчика, вузла моніторингу та базової станції.

Сенсорний вузол діє як сенсорний пристрій для виявлення вібрації в машині, а моніторинговий вузол передає дані з сенсорного вузла на базову станцію. Базова станція записує вібрацію, яку відчуває сенсорний вузол, і завантажує дані на сервер. Було проведено експеримент із фрезерування щілин, щоб перевірити можливості запропонованої бездротової системи моніторингу вібрації.

Передумовою для виявлення основних несправностей систем керування фрезерними верстатами є **три обмеження фрезерного верстата:**

1. *Складність* – фрезерні верстати можуть бути складними та вимагати висококваліфікованих операторів для ефективного керування ними.
2. *Обмеження розміру* – Розмір матеріалів, які можна подрібнювати, обмежений розміром фрезерного верстата.
3. *Вартість* – Фрезерні верстати можуть бути дорогими для придбання, експлуатації та обслуговування, що робить їх менш доступними для малих підприємств або любителів.

**Типові проблеми, що виникають у верстатах з ЧПК [18]:**

Верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) широко використовуються в обробній промисловості завдяки своїй точності та ефективності. Однак, як і будь-який інший верстат, верстати з ЧПК також схильні

до певних проблем. Деякі з найпоширеніших проблем, які виникають у верстатах з ЧПК, включають:

1. *Знос інструменту*: верстати з ЧПК використовують ріжучі інструменти для формування та вирізання заготовки у потрібну форму. З часом ріжучі інструменти зношуються та стають менш ефективними, що призводить до низької якості різку. Тому важливо регулярно міняти ріжучі інструменти, щоб підтримувати бажану точність.
2. *Помилки програмування*: верстати з ЧПК покладаються на комп'ютерні програми для керування своїми рухами та операціями. Неправильно написані або застарілі програми можуть призвести до помилок у процесі обробки, що призведе до неточних розрізів і марних витрат матеріалу.
3. *Механічні поломки*: верстати з ЧПК мають багато рухомих частин, які можуть вийти з ладу через знос або погане обслуговування. Механічна поломка може спричинити затримку виробництва та дорогий ремонт.
4. *Збої в електроживленні*: верстати з ЧПК потребують стабільного джерела живлення для належної роботи. Збої в електроживленні можуть призвести до перерв у процесі обробки, спричиняючи помилки та втрату матеріалу.
5. *Людська помилка*: нарешті, людська помилка є ще однією важливою проблемою верстатів з ЧПК. Оператори повинні бути належним чином навчені керувати машинами та дотримуватися всіх процедур безпеки. Недотримання цієї вимоги може призвести до нещасних випадків, пошкодження обладнання та марних витрат матеріалів.

Щоб мінімізувати ці проблеми, важливо проводити регулярне технічне обслуговування, ефективно навчати операторів і бути в курсі останніх технологій і програмного забезпечення.

Варто також звернути увагу, що одним із дієвих способів діагностики проблем в роботі фрезерних верстатів є моніторинг діаграми пелюстків стабільності (SLD) [28].

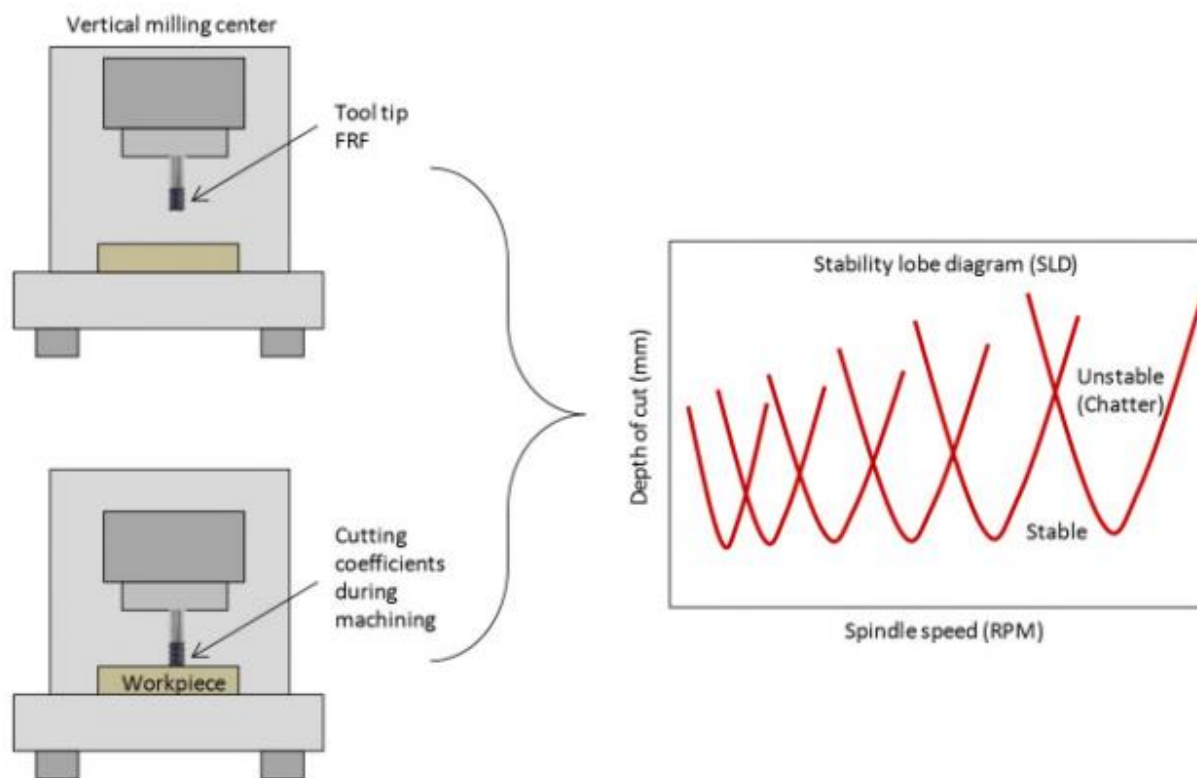


Рисунок 1. Розробка діаграми пелюстків стабільності (SLD) [28]

Класична методологія отримання SLD включає комбінацію модальних параметрів і коефіцієнтів спрямованої динамічної сили, обидва отримані експериментально.

Експериментальне отримання динамічних коефіцієнтів сили обмежує аналіз чутливість різних різців, заготовок і параметрів процесу, які визначають SLD. Для потреб аналізу необхідний узагальнений алгоритм MATLAB на основі механіки процесу. Тоді комплексний аналіз чутливості SLD проводиться з використанням різних параметричних рівнів вхідних змінних.

Дослідники високошвидкісного фрезерування звертають увагу на значний вплив таких аспектів **геометрії ріжучого інструменту**, як діаметр інструменту та кількість канавок, спостерігався на SLD. **Внутрішні характеристики матеріалу** заготовки, такі як температура плавлення та коефіцієнти Джонсона Кука (A, B, C, n і m), серед інших, значно впливають на SLD.

На відміну від глибини різання, швидкість різання та швидкість подачі є важливими **параметрами обробки, що визначають природу SLD**. Авторами було виявлено, що найбільш чутливим параметром серед усіх є динамічна жорсткість наконечника інструменту, за якою слідує тип фрезерування, фрезерування вгору, фрезерування вниз або шліфування [28].

Нижче розглянемо плюси та мінуси фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК).

**Переваги** фрезерних верстатів з цифровим програмним керуванням (ЧПК) [18]:

- *точність*: фрезерні верстати з ЧПК здатні виробляти високоточні й точні деталі незмінної якості.
- *автоматизація*: після програмування фрезерні верстати з ЧПК можуть працювати безперервно, виробляючи велику кількість деталей з мінімальним втручанням людини.
- *гнучкість*: фрезерні верстати з ЧПК можна використовувати для фрезерування різноманітних матеріалів, у тому числі металів, пластику та деревини, що робить їх універсальними для різноманітних застосувань.
- *налаштування*: фрезерні верстати з ЧПК дозволяють створювати складні форми та конструкції, відкриваючи нові можливості для налаштування.

**Недоліки** фрезерних верстатів з цифровим програмним керуванням (ЧПК) [18]:

- *вартість*: фрезерні верстати з ЧПК можуть бути дорогими для придбання та обслуговування, що робить їх непомірними для малих підприємств або окремих осіб;
- *складність*: керування та програмування фрезерних верстатів з ЧПК вимагає спеціальних навичок і знань, що може бути складним для тих, хто не має технічної підготовки;
- *розмір*: фрезерні верстати з ЧПК часто займають багато місця, що робить їх непрактичними для невеликих майстерень або приміщень;

- *технічне обслуговування*: фрезерні верстати з ЧПК потребують регулярного технічного обслуговування для забезпечення оптимальної продуктивності та довговічності, що може збільшити час і витрати на їхню роботу.

**Отже, одним з основних недоліків фрезерного верстата є його вартість**, яка може бути досить високою в залежності від типу верстата. Крім того, **фрезерні верстати вимагають багато місця для роботи та зберігання**, що робить їх непрактичними для невеликих майстерень або домашніх гаражів. Вони також **можуть бути шумними та створювати сильну вібрацію під час роботи**, що може пошкодити машину та потенційно небезпечно для оператора, якщо вони не закріплені належним чином. Нарешті, **для роботи з фрезерними верстатами потрібні значні знання та навички**, оскільки вони включають складні процеси, такі як вибір і налаштування різальних інструментів, контроль швидкості та швидкості подачі, а також забезпечення точних вимірювань і різання. Загалом, незважаючи на те, що фрезерний верстат може надати багато переваг з точки зору точності та універсальності, важливо зважити потенційні недоліки, перш ніж інвестувати в нього для своєї майстерні чи підприємства.

**Поширеними причинами збоїв у системах керування фрезерними верстатами є збої в електроживленні, перегрів компонентів системи керування, погане програмне забезпечення, несправності апаратного забезпечення, неправильні процедури технічного обслуговування та очищення**, застарілі технології та **помилки оператора**. Ці несправності можуть призвести до **зниження точності та точності машини**, зниження продуктивності та навіть загрози безпеці для операторів. Щоб запобігти таким несправностям, важливо регулярно обслуговувати та оновлювати компоненти системи керування, забезпечувати належне охолодження та вентиляцію системи, а також забезпечувати адекватне навчання операторів, щоб уникнути помилок **під час експлуатації чи обслуговування**. Крім того, вибір високоякісних систем керування з надійним програмним і апаратним забезпеченням також може допомогти уникнути таких збоїв у фрезерних верстатах [18].

**Оператори фрезерних верстатів можуть запобігти збоєм системи керування, вживаючи наступних заходів:**

1. **Регулярне технічне обслуговування:** фрезерні верстати необхідно регулярно обслуговувати, щоб уникнути будь-яких збоїв системи керування. Це включає перевірку електричних з'єднань, заміну зношених частин і підтримку машини в чистоті.

2. **Належне навчання:** Оператори повинні бути навчені правильному використанню фрезерного верстата, включно з керуванням системою керування. Це запобіжить випадковому пошкодженню системи та забезпечить її правильне використання.

3. **Моніторинг системи:** Оператори повинні регулярно контролювати систему керування, щоб виявити будь-які ознаки збою. Це включає пошук повідомлень про помилки, незвичних шумів або ненормальної поведінки машини.

4. **Запобіжні заходи:** Оператори повинні вживати запобіжних заходів, щоб уникнути збоїв системи керування. Це включає використання пристроїв захисту від перенапруги для захисту системи від стрибків напруги, забезпечення належної вентиляції для запобігання перегріву та уникнення перевантаження машини понад її потужність.

Вживаючи цих заходів, оператори фрезерних верстатів можуть запобігти збоєм системи керування та забезпечити плавну та ефективну роботу машини.

Рекомендації щодо вирішення проблем при фрезеруванні у разі виникнення вібрації, пакетування стружки, повторного різання стружки, незадовільної якості обробленої поверхні, утворення задирок, недостатньої потужності верстата та зношування інструменту представлені в таблиці (Додаток А, цитується за [27]).

### **1.3. Виявлення потреби в системі моніторингу роботи фрезерних верстатів**

**Несправності системи керування фрезерними верстатами можна виявити за допомогою різних методів усунення несправностей [18].** По-перше, важливо провести ретельний огляд усіх електричних компонентів, таких як датчики,

перемикачі та виконавчі механізми. Перевірити, чи немає ослаблених з'єднань, зламаних проводів і пошкоджених компонентів.

Для збору даних слід використовувати діагностичні інструменти, такі як мультиметри або осцилографи, щоб перевірити напругу, струм і сигнали системи керування. Це може допомогти визначити конкретну проблему та визначити, чи пов'язана вона з апаратними чи програмними компонентами.

Якщо проблема пов'язана з програмним забезпеченням, можливо, буде потрібно перепрограмувати або оновити систему керування. Під час внесення будь-яких змін у систему важливо дотримуватися інструкцій та рекомендацій виробника, щоб уникнути подальших пошкоджень.

Крім того, може бути корисно проконсультуватися з іншими експертами в цій галузі або отримати посилання на технічні посібники для конкретного фрезерного верстата. Можливо, вони зіткнулися з тією самою проблемою та знайшли рішення, яке могло б заощадити час і гроші.

Загалом виявлення збоїв у системі керування вимагає систематичного підходу та пильної уваги до деталей. Регулярне технічне обслуговування та перевірки також можуть запобігти виникненню проблем.

Отже, система керування фрезерними верстатами зазнала кількох збоїв, які вплинули на їх продуктивність та ефективність. Основні недоліки включають поганий дизайн, неналежне технічне обслуговування та застарілу технологію. Для виробників вкрай важливо вирішити ці проблеми та впровадити більш вдосконалені системи керування, які прості у використанні та обслуговуванні. За допомогою правильної системи керування фрезерні верстати можуть працювати на оптимальних рівнях і підвищувати продуктивність у різних галузях промисловості. Крім того, необхідно проводити регулярне технічне обслуговування та оновлення, щоб забезпечити ефективне функціонування системи керування. Таким чином виробники можуть зменшити ризик простою, зменшити витрати та покращити загальну продуктивність.

Модернізація, проектування та побудова ланцюжків вимірювань, а також архітектура системи Інтернету речей і моделювання процесів можуть допомогти

вам розробити правильні інструменти для роботи. Розробка інформаційної панелі може допомогти вам відстежувати свій прогрес і знаходити області для вдосконалення.

Сучасне промислове виробництво – це точна робота в кількох аспектах. Продукти виготовляються відповідно до строгих стандартів, які вимагають від механіки верстатів надійної та безкомпромісної точності – наприклад, небажана вібрація може спричинити дефекти необхідної геометрії виробу та призвести до дорогих відходів. Подібним чином виробничі процеси зазвичай відбуваються за щільним графіком. Збої або поломки машин призводять до втрати часу та, потенційно, до накладення штрафних санкцій за невиконання поставок до кінцевого терміну.

Розумне та прогнозоване технічне обслуговування призначене для якнайшвидшого виявлення будь-яких ознак пошкодження чи зносу компонентів машини, щоб уникнути незапланованих і неочікуваних поломок. Датчики, встановлені на машинах, відстежують активні операції та вимірюють температуру, вібрацію, споживання енергії та багато інших параметрів. Кожного разу, коли є відхилення від норми або ознаки потенційно проблемних тенденцій, система запускає тривогу, щоб оператори могли розпочати контрзаходи. Однак більшість комерційно доступних систем моніторингу залишаються ізольованими власними рішеннями, які відстежують лише стан окремих компонентів [26].

Прогнозне технічне обслуговування, моніторинг стану та контекстно-залежна підтримка можуть допомогти вам забезпечити безперебійну та надійну роботу ваших машин.

Модернізація, проектування та побудова ланцюжків вимірювань, а також архітектура системи Інтернету речей і моделювання процесів можуть допомогти вам розробити правильні інструменти для роботи. Розробка інформаційної панелі може допомогти вам відстежувати свій прогрес і знаходити області для вдосконалення.

Сучасне промислове виробництво – це точна робота в кількох аспектах. Продукти виготовляються відповідно до строгих стандартів, які вимагають від

механіки верстатів надійної та безкомпромісної точності – наприклад, небажана вібрація може спричинити дефекти необхідної геометрії виробу та призвести до дорогих відходів. Подібним чином виробничі процеси зазвичай відбуваються за щільним графіком. Збої або поломки машин призводять до втрати часу та, потенційно, до накладення штрафних санкцій за невиконання поставок до кінцевого терміну.

Розумне та прогнозоване технічне обслуговування призначене для якнайшвидшого виявлення будь-яких ознак пошкодження чи зносу компонентів машини, щоб уникнути незапланованих і неочікуваних поломок. Датчики, встановлені на машинах, відстежують активні операції та вимірюють температуру, вібрацію, споживання енергії та багато інших параметрів. Кожного разу, коли є відхилення від норми або ознаки потенційно проблемних тенденцій, система запускає тривогу, щоб оператори могли розпочати контрзаходи. Однак більшість комерційно доступних систем моніторингу залишаються ізольованими власними рішеннями, які відстежують лише стан окремих компонентів.

Fraunhofer IPK шукає рішення, які інтегрують моніторинг машин у цілісні концепції обслуговування парку. Комплексний підхід цього типу охоплює датчики, які фіксують стан компонентів і виявляють навіть крихітні ознаки зносу чи пошкодження, до прогнозування критичних умов за допомогою подвійних віртуальних машин і підтримки технічних спеціалістів на місці з обслуговуванням і ремонтом, які можуть знадобитися.

## **2. Аналіз проблеми моніторингу та управління роботою верстатів**

### **2.1. Огляд наявних систем моніторингу роботи верстатів**

У виробництві моніторинг верстатів – це метод використання датчиків для збору даних із ключових частин обладнання у вашому виробничому процесі.

Кінцева мета моніторингу устаткування – отримати глибоке розуміння всіх аспектів вашого виробничого процесу, що дозволить відслідковувати масиви виробничих даних на рівнях машини, заводу та підприємства.

Особливо цінним виявляється те, що допомогою **обмеженої кількості датчиків** (наприклад, двох-трьох) можна згенерувати дані для понад 100 істотних і значущих показників і перетворити їх у інтуїтивно зрозумілі звіти, які можуть потім стати основою для управлінських дій [1].

Впровадивши автоматизований збір даних у **режимі реального часу** для ключових етапів всього виробничого процесу за допомогою моніторингу верстатів, керівництво отримує точну та повну базу даних, яку можна використовувати для покращення на всіх рівнях: від оператора цеху і наглядача лінії, до директора заводу.

Моніторинг обладнання – це процес отримання, зберігання та відображення машинних даних у промисловому контексті. Це швидка, масштабована техніка для перетворення даних виробничої машини на статистичні дані в реальному часі.

Моніторинг машин однаково добре працює в дискретних і переробних галузях. За останні п'ять років датчики стали доступнішими, периферійні пристрої – гнучкішими, а зв'язок – надійнішим. Є більше параметрів для відстеження та більше можливостей для створення цінності, ніж будь-коли раніше [17].

Системи моніторингу машин – це, зазвичай, апаратні та програмні засоби, необхідні для обробки необробленої інформації, створеної машинами.

Вони охоплюють все: від програмного забезпечення для моніторингу й аналізу до промислових датчиків і сенсорних інтерфейсів, встановлених на машинах. Зазвичай системи моніторингу машин координуються платформою IoT або Frontline Operations Platform , наприклад, як Tulip.

Система моніторингу обладнання дозволяє збирати й аналізувати в режимі реального часу стан, використання, продуктивність, стан та інші дані про обладнання на основі Інтернету речей. Рішення може оптимізувати роботу обладнання та впорядкувати технічне обслуговування обладнання у виробництві,

будівництві, охороні здоров'я, нафтогазовій, електротехнічній, гірничодобувній та інших галузях промисловості. Для наскрізної синхронізації даних він може інтегруватися з ERP, програмним забезпеченням для управління активами, бухгалтерським програмним забезпеченням тощо.

Моніторинг буває [13]:

1. Моніторинг стану обладнання (наприклад, увімкнення/вимкнення, початок циклу, кроки роботи, програми, що виконуються обладнанням).
2. Моніторинг продуктивності (наприклад, швидкість, час роботи/простої, заплановані/незаплановані зупинки).
3. Моніторинг споживання ресурсів (наприклад, електроенергії, води, теплоносіїв).
4. Моніторинг стану обладнання та навколишнього середовища (наприклад, температури, вологості) за допомогою датчиків шуму, вібрації, температури, тиску та інших.
5. Відстеження місцезнаходження та наявності обладнання та запасних частин за допомогою штрих-кодів, QR-кодів, RFID-міток тощо.

Залежно від розміру, потужності та віку ваших машин, рішення для моніторингу машини, яке підходить конкретному підприємству, матиме свої особливості. Тим не менш, є кілька основних елементів, які об'єднують усі системи моніторингу машин.

Системи моніторингу машини можуть бути такими ж простими, як програмне забезпечення, яке робить дані машини зрозумілими. Це може бути хмарне програмне забезпечення як послуга (SaaS), більш комплексна платформа як послуга (PaaS) або воно може працювати локально в ІТ-інфраструктурі вашої організації.

Для виробників машин, які працюють зі стандартними мережевими протоколами, такими як OPC UA, достатньо для початку роботи підключення до Ethernet. Програмне забезпечення для моніторингу машини Plug-and-play містить усе необхідне для відстеження, зберігання та аналізу даних машини.

Типи програмного забезпечення для виробництва включають програмне забезпечення як послугу (SaaS), платформу як послугу (PaaS) і локальне програмне забезпечення (рис. X).

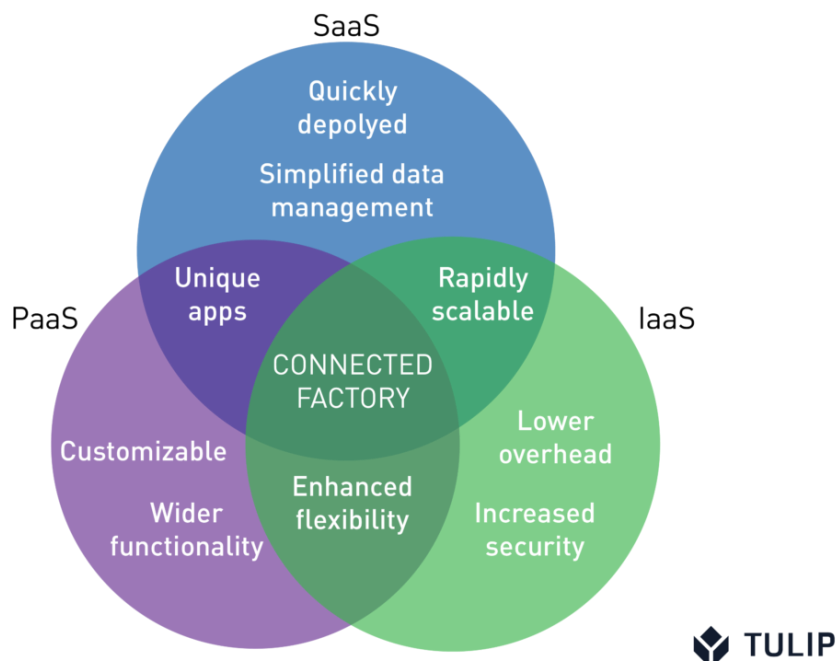


Рисунок 2. Комплекс програмного забезпечення для машинного моніторингу [17]

За загальноприйнятою класифікацією, системи моніторингу диференціюються на:

1. *Системи візуального моніторингу:* Ці системи використовують вбудовані камери або зовнішні пристрої, щоб надавати зображення з верстатів в режимі реального часу. Оператори можуть візуально спостерігати за роботою верстатів і виявляти можливі проблеми, такі як збої в роботі або несправності.
2. *Системи моніторингу продуктивності:* Ці системи збирають дані про продуктивність верстатів, такі як часи простою, часи обробки та швидкість виробництва. Вони надають операторам та менеджменту інформацію про роботу верстатів, дозволяючи виявляти проблемні зони та вдосконалювати процес виробництва.
3. *Системи моніторингу стану обладнання:* Ці системи використовують датчики та монітори для вимірювання різних параметрів верстатів, таких як температура, вібрація, рівень шуму тощо. Вони дозволяють виявляти ненормальні

або несправні стани обладнання, що може свідчити про можливі проблеми та потребу в обслуговуванні або ремонті.

4. *Системи діагностики та прогнозування*: Ці системи використовують аналітику даних та машинне навчання для аналізу великого обсягу даних про роботу верстатів. Вони можуть прогнозувати можливі відмови, виявляти аномальні зміни та рекомендувати заходи для попередження проблем та підвищення ефективності.

5. *Системи дистанційного моніторингу та управління*: Ці системи дозволяють операторам та інженерам віддалено моніторити та керувати роботою верстатів. Вони можуть надавати доступ до даних про стан верстатів, дистанційно налаштовувати параметри роботи та віддалено виконувати діагностику та обслуговування.

Основним недоліком таких моніторингових рішень є інвестиційні витрати (купівля програмного забезпечення, налаштування, тестування, впровадження, обслуговування тощо). У деяких випадках такі системи можуть мати слабку реконфігурацію або вимагати експертних знань системи, що може вплинути на гнучкість компанії, коли кожна зміна в конфігурації (машини, матеріали, дизайн, постачальники тощо) повинна бути підготовлена постачальником програмного забезпечення та імпортовано до системи [24].

Існує багато компаній, які надають рішення з обмеженою функціональністю і працюють в певній сфері (наприклад, Evocon Line Efficiency, Wintriss ShopFloorConnect). Такі рішення, як правило, призначені для отримання найпростіших вхідних даних від виробничої лінії (машини): підрахунок одиниць і швидкості потоку, список завдань, простої та звіти про якість тощо. Крім того, багато виробничих компаній розробляють і впроваджують свою власну унікальну нішу рішення для моніторингу виробництва відповідно до їхніх конкретних потреб, а не купувати або орендувати. Повна історія діяльності цеху підтримує можливість перегляду проблем якості на будь-якому етапі життя продукту, що є однією з функцій управління життєвим циклом продукту (PLM) [24].

Невід’ємними частинами PMS є збір та аналіз даних, прогнозування, візуалізація та зберігання (рис. X).

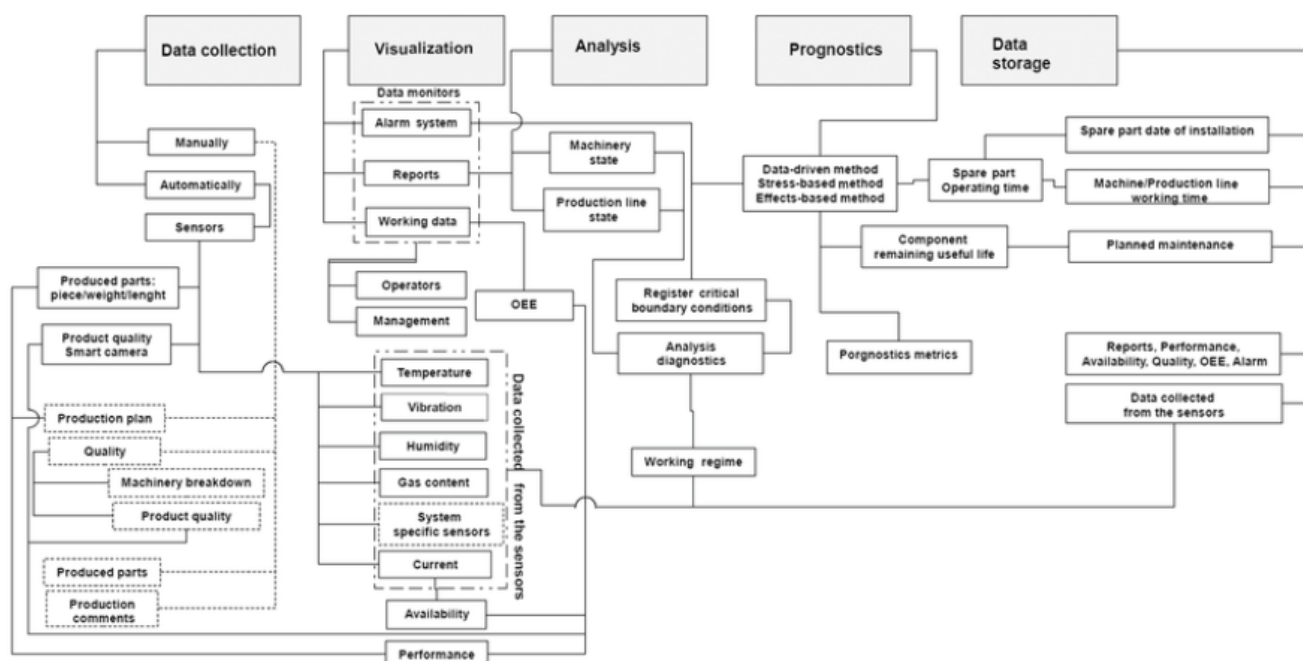
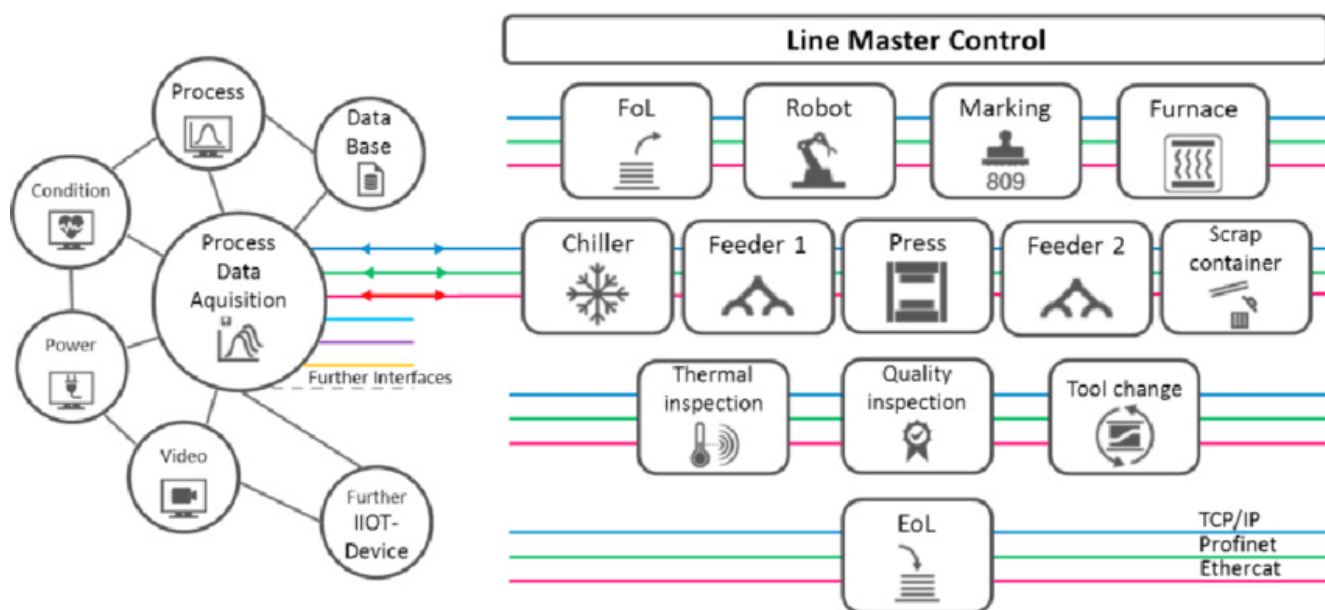


Рисунок 3. Спрощена концепція системи моніторингу виробництва (мовою оригіналу) [24].

Складність кожного компонента може відрізнятись залежно від вимог замовника. Це означає, що система є розширюваною: додаткові користувацькі модулі можуть бути додані для створення єдиної інтегрованої платформи.

PMS не забезпечує основні функції системи планування виробництва та має тісно співпрацювати з системами планування виробництва для обміну даними (наприклад, через MES, ERP тощо). Наприклад, такі дані, як кількість штук, які потрібно виготовити, та ідеальний час циклу для розрахунку продуктивності машини, слід вставити один раз і використовувати в різних системах. Автономне рішення може потребувати ряду ручних введів і мати обмежену функціональність.

Чим більше датчиків буде інтегровано в систему, тим більше даних буде згенеровано, які потрібно обробляти – *рис. X*. Але обробка цієї зростаючої кількості даних за допомогою традиційних технологій баз даних буде складною. Остання проблема безпосередньо пов'язана з концепцією Big Data. Але використання хмарних обчислень може допомогти спростити ці проблеми обробки даних [24].



*Рисунок 4. Схема взаємодії моніторингової системи з сенсорами [29]*

Нижче розглянемо наявні на ринку моніторингові системи, їх переваги та недоліки.

## **2.2. Порівняння різних підходів та технологій, використовуваних у цих системах**

Моніторинг роботи фрезерних верстатів може здійснюватися за допомогою різних підходів та технологій.

1. **Siemens AG.** Siemens пропонує різноманітні рішення для моніторингу та управління верстатами, включаючи системи візуального моніторингу, системи моніторингу продуктивності та системи діагностики стану обладнання.



*Рисунок 5. Система моніторингу стану від Siemens*

Системи моніторингу стану мають досить цікаві рішення. За допомогою системи моніторингу стану від Siemens можна постійно контролювати машини та установки. Процедури технічного обслуговування можна краще спланувати та виконувати лише тоді, коли вони дійсно необхідні – прогнозне технічне обслуговування [12].

2. Fanuc Corporation: Fanuc виробляє інноваційні системи моніторингу та управління верстатами, що базуються на аналізі даних та машинному навчанні. Вони пропонують системи прогнозування відмов та системи дистанційного моніторингу.



Рисунок 6. Система FIELD PMA-Monitor

Нова функція IoT: система FIELD PMA-Monitor – програма, призначена для моніторингу роботи верстатів та інших пристроїв на заводі. Відображаючи статус роботи пристроїв у списку, аномалії можна знайти негайно. PMA-Monitor аналізує дані, зібрані з пристроїв, такі як кількість виробленого, і показує інформацію, включаючи хід виробництва по відношенню до графіка та випадки затримок [15].

3. **Mazak Corporation:** Mazak спеціалізується на розробці рішень для автоматизації та управління верстатами. Вони пропонують системи моніторингу продуктивності, системи діагностики стану обладнання та системи дистанційного моніторингу.

Відстежує та аналізує не лише машини Mazak, але й усі машини на заводі, щоб підвищити продуктивність. Контролює стан роботи машини, підключаючи машини на заводі через комп'ютерну мережу.

Аналітичний блок моніторингової системи Mazak наведений в *Додаток В*.

Аналізуючи накопичені результати роботи, можна підвищити загальну продуктивність підприємства [31].

4. **Haas Automation, Inc.:** Haas Automation виробляє верстати з вбудованими функціями моніторингу та управління. Вони надають рішення для моніторингу стану обладнання та відстежування продуктивності верстатів.

Кожна машина Haas оснащена HaasConnect, системою віддаленого моніторингу машини, яка надає миттєві сповіщення про стан машини електронною поштою та через мобільний додаток MyHaas.

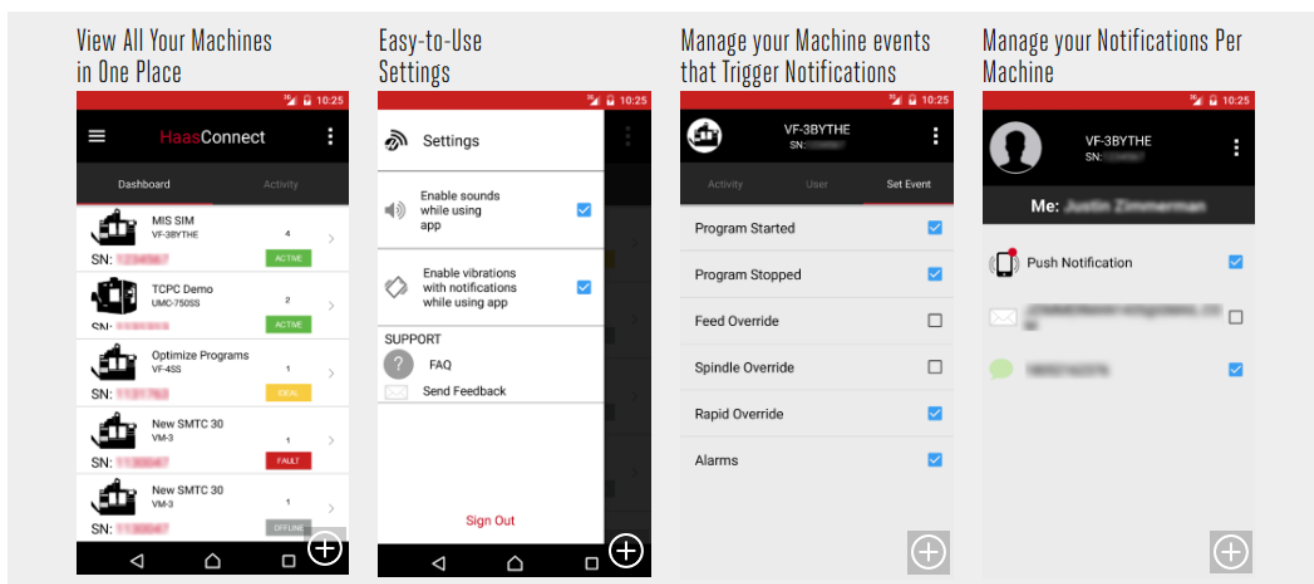


Рисунок 7. Панель індикаторів моніторингового додатку Haas Control Apps

Haas Control має можливість надсилати вам та іншим особам, яких ви призначите, сповіщення про робочий стан вашої машини Haas. Налаштувати просто й легко через портал MyHaas на сайті HaasCNC.com або через додаток MyHaas [14].

5. **Okuma Corporation:** Okuma спеціалізується на розробці інтегрованих систем управління верстатами. Вони пропонують рішення для моніторингу продуктивності, моніторингу стану обладнання та дистанційного управління.

Інтерфейс Okuma Monitoring Control System (OMCS) – це програма, спеціально розроблена для моніторингу промислових датчиків, які можуть видавати аналогові або цифрові сигнали 4–20 мА.

За замовчуванням програма OMCS може контролювати до 8 аналогових датчиків і 8 цифрових датчиків.

Усі датчики, налаштовані для моніторингу програмою, скануватимуться приблизно з інтервалом у 100 мс. Усі дані датчиків будуть зареєстровані та можуть бути налаштовані для виведення в агент MTCconnect.

Відстежуйте та відображайте промислові аналогові та цифрові датчики для швидкої візуальної перевірки.

Живі та історичні звіти датчиків. Включає налаштування рівня тривоги A, B, C, D для кожного окремого датчика, щоб зупинити машину, якщо виконується певна умова [21].

На ринку існує кілька компаній, які пропонують спеціалізовані системи моніторингу фрезерних верстатів, що базуються на аналізі звуку.

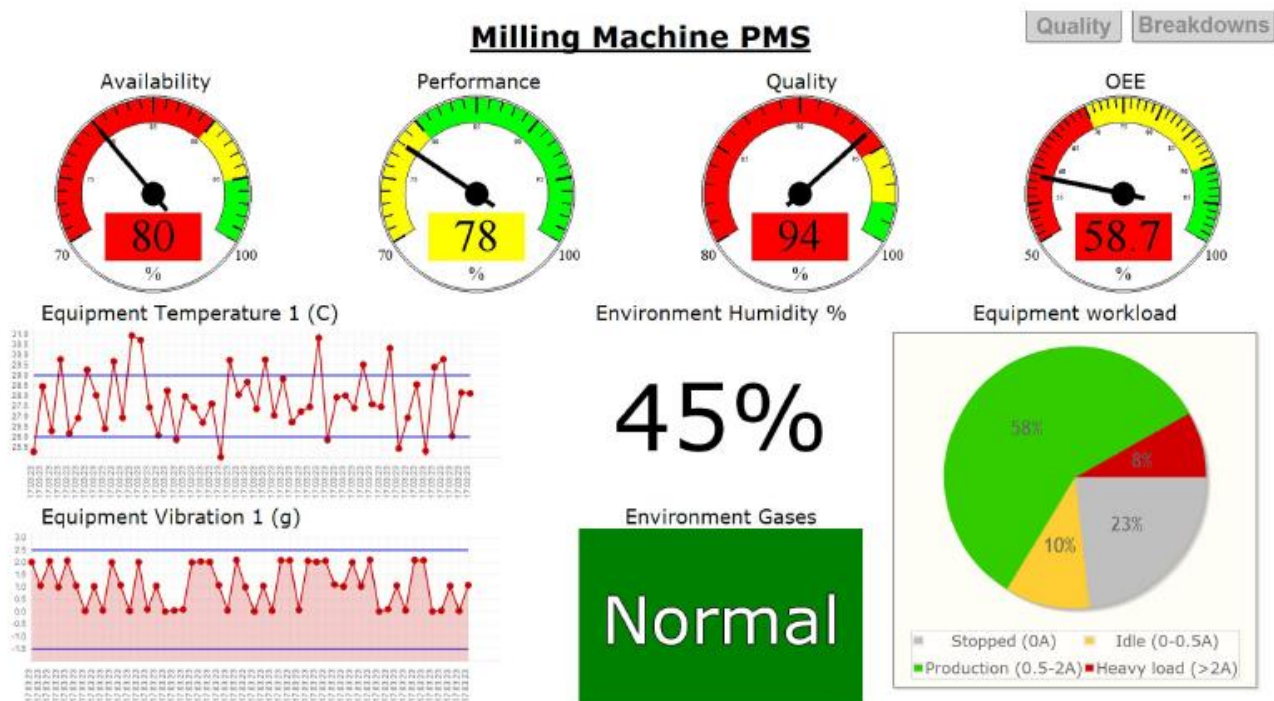


Рисунок 8. Функціонал візуального модуля моніторингу для фрезерного верстата

Ось кілька прикладів постачальників послуг у цій сфері [30]:

1. **SoundTalks:** SoundTalks є провідним постачальником рішень моніторингу на основі аналізу звуку для промислових верстатів. Вони пропонують системи, які використовують штучний інтелект для виявлення аномалій у звуці верстату та раннього виявлення проблем.
2. **Senseye:** Senseye спеціалізується на аналізі даних та моніторингу верстатів. Вони надають системи, які використовують аналіз звуку для виявлення несправностей та попередження відмов у роботі верстату.
3. **IFM Electronic:** IFM Electronic є постачальником рішень для промислової автоматизації та моніторингу верстатів. Вони пропонують системи, які використовують звукові датчики та аналіз звуку для контролю стану верстату та виявлення проблем.
4. **Brüel & Kjaer Vibro:** Brüel & Kjaer Vibro є світовим лідером у вимірюванні та моніторингу вібрацій та звуку. Вони пропонують рішення для моніторингу звуку верстатів, включаючи датчики та програмне забезпечення для аналізу звукових сигналів.

Порівняльна характеристика кількох основних підходів та технологій, що застосовуються для моніторингу роботи фрезерних верстатів:

### **2.3. Визначення переваг та недоліків існуючих рішень**

Моніторинг роботи фрезерних верстатів може здійснюватися за допомогою різних підходів та технологій.

Порівняльна характеристика кількох основних підходів та технологій, що застосовуються для моніторингу роботи фрезерних верстатів:

1. **Аналітика даних:** Застосування аналітики даних дозволяє збирати, аналізувати та інтерпретувати дані, що стосуються роботи верстатів. Це може включати моніторинг параметрів верстату, таких як швидкість, потужність, вібрація та температура. Аналіз даних може допомогти виявити аномалії, передбачити відмови та оптимізувати роботу верстату для забезпечення кращої продуктивності.

2. **Візуальне спостереження:** Використання відеоспостереження або систем візуального моніторингу дозволяє операторам в реальному часі спостерігати за роботою верстату. Це може допомогти виявити незвичайну поведінку, пошкодження або проблеми з обробкою. Візуальне спостереження також може бути використано для аналізу руху інструментів та деталей.

3. **Датчики вимірювання:** Встановлення датчиків на верстаті дозволяє вимірювати різні параметри, такі як тиск, вібрація, температура, рівень шуму та інші. Ці дані можуть бути використані для моніторингу стану верстату, виявлення несправностей або попередження відмов.

4. **Акустичний аналіз:** Застосування акустичного аналізу дозволяє виявляти аномалії в роботі верстату шляхом аналізу звукових сигналів, що генеруються під час обробки. Це може включати виявлення неправильного заточування інструменту, пошкодження деталей, стукіт або несправності в роботі.

5. **Машинне навчання та штучний інтелект:** Використання методів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє створити моделі, які можуть навчитися розпізнавати нормальну та аномальну поведінку верстату. Це дозволяє виявляти незвичайні патерни та передбачати можливі проблеми з роботою верстату.

Їх порівняльна характеристика переваг та недоліків наведена нижче (складено автором за [1, 33, 12, 13, 17, 24]).

### **Аналітика даних**

#### *Переваги:*

1. Здатність виявляти складні кореляції та залежності між різними параметрами верстата.
2. Можливість прогнозувати відмови та розробляти оптимальні стратегії обслуговування та ремонту.
3. Забезпечення підвищеної продуктивності та ефективності верстата.

#### *Недоліки:*

1. Вимагає потужних обчислювальних ресурсів для обробки великих обсягів даних.

2. Потребує достатньо складних алгоритмів та експертного знання для аналізу та інтерпретації даних.

### **Візуальне спостереження**

#### *Переваги:*

1. Надає можливість операторам в реальному часі спостерігати за роботою верстата та виявляти візуальні аномалії.
2. Дозволяє швидко реагувати на проблеми та зменшити час простою.

#### *Недоліки:*

1. Обмежена можливість виявлення проблем, які не проявляються візуально.
2. Вимагає від оператора постійного спостереження та може бути суб'єктивним залежно від його уваги та досвіду.

### **Датчики вимірювання**

#### *Переваги:*

1. Забезпечують точне і об'єктивне вимірювання різних параметрів верстата.
2. Дозволяють виявляти незвичайні показники, що можуть свідчити про проблеми з роботою верстата.

#### *Недоліки:*

1. Вимагають правильного розміщення датчиків та калібрування для точного вимірювання.
2. Можуть бути вразливі до забруднень або пошкоджень.

### **Акустичний аналіз**

#### *Переваги:*

1. Здатність виявляти незвичайні звукові сигнали, що можуть вказувати на проблеми з роботою верстата.
2. Дозволяє виявити аномалії, такі як стукіт, вібрація або несправності.

#### *Недоліки:*

1. Вимагає складних алгоритмів та обробки сигналів для аналізу звукових даних.
2. Потребує спеціалізованих сенсорів та обладнання для збору звукових сигналів.

## **Машинне навчання та штучний інтелект:**

### *Переваги:*

1. Здатність автоматично виявляти аномалії та розпізнавати патерни, що вказують на проблеми з роботою верстата.
2. Можливість прогнозування відмов та оптимізації режиму роботи.

### *Недоліки:*

1. Вимагає великого обсягу даних для навчання моделі.
2. Потребує експертного знання та підготовки даних для ефективного використання.

Важливо враховувати, що кожен підхід має свої особливості, і оптимальний варіант моніторингу роботи фрезерних верстатів може варіюватися залежно від конкретних вимог і умов.

## КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3. Опис розробленого програмного забезпечення

#### 3.1. Визначення функціональних вимог до системи моніторингу

Розроблена система повинна здійснювати моніторинг роботи верстата аналізуючи звукові коливання. З цього випливає, що програма повинна взаємодіяти з периферійними пристроями комп'ютера. Для оптимізації результатів аналізу система повинна включати в себе фільтр шумів для усунення завад з досліджуваного сигналу, та інші інструменти обробки звукових сигналів що підвищують точність результатів.

Програма повинна мати функції завантаження та збереження звукових даних. Аналіз повинен відбуватися автоматично, з мінімальним втручанням з боку користувача. Система повинна проводити класифікацію звукових сигналів на основі моделі машинного навчання, що дозволить системі визначати, до якої категорії відноситься кожен аудіо зразок. Для забезпечення конкурентної переваги, алгоритм машинного навчання повинен мати можливість навчатися на даних наданих користувачем, та мати змогу функціонувати без збоїв при роботі з мінімальними наборами даних.

Для зручності користувача система повинна відображати результати аналізу аудіо даних у зручному для користувача форматі, має бути певний інтерфейс користувача.

Для тривалої роботи система повинна надавати можливість зберігати результати аналізу аудіо даних для подальшого використання в моделі.

Система повинна давати користувачеві можливість вибрати категорії для класифікації.

### 3.2. Опис архітектури та компонентів системи

Опис проекту.

В ході створення дипломного проекту я розробляв систему моніторингу роботи фрезерного верстату. Призначення даної системи полягає в моніторингу роботи фрезерного верстату шляхом аналізу звуку що виникає в наслідок роботи фрезерного верстату з метою відслідковування процесу роботи та стану верстата. Для пояснення принципу роботи системи моніторингу додано структурну та функціональну схеми, блок схему та архітектурну схему програми моніторингу.

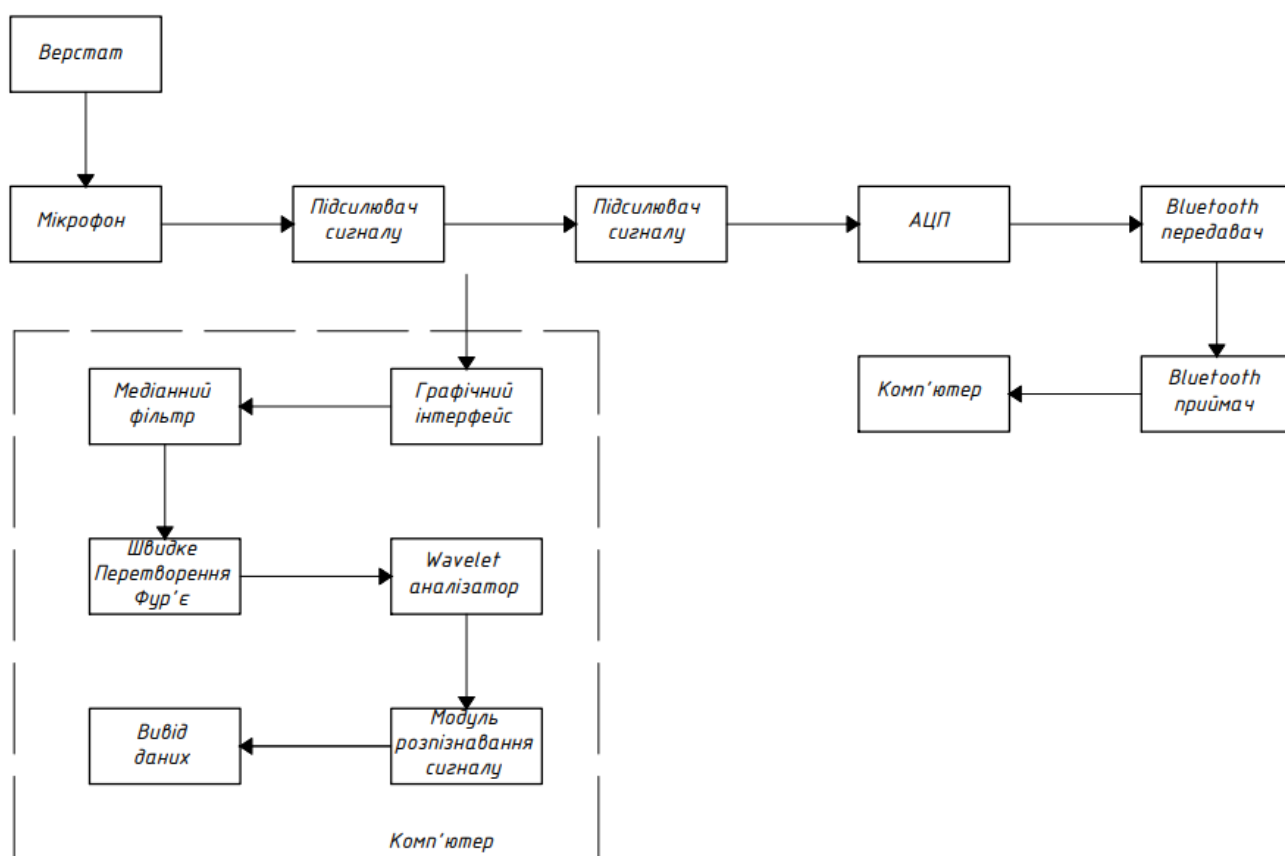


Рисунок 9. Структурна схема системи моніторингу

Опис структурної схеми системи моніторингу:

Зверху схеми показане з'єднання структурних елементів яке має на меті передачу звукового сигналу комп'ютеру на обробку. Деякі з цих елементів можуть бути вбудованим в один пристрій, але вони всі необхідні для передачі сигналу в даному випадку.

Звук роботи верстата зчитується мікрофоном, з метою подальшої обробки підсилюється підсилювачем та надсилається для перетворення в цифрову форму на АЦП. З АЦП сигнал за допомогою Bluetooth передавача/приймача надсилається на комп'ютер для подальшої обробки та аналізу. Передача даних за допомогою Bluetooth передавача обрана з точки зору зручності та безпеки користувача, але не є обов'язково необхідним елементом системи. Пунктирною лінією на схемі оточені структурні елементи, які загально описують роботу програми яка здійснює аналіз сигналу записаного з верстату. Робота програми починається з того, що користувач визначає дію за допомогою графічного інтерфейсу. Потім за допомогою медіанного фільтру фільтруються шуми сигналу з метою збільшення співвідношення шум/сигнал. Потім за допомогою швидкого перетворення Фур'є відбувається розклад сигналу в частотному домені. Після цього модуль розпізнавання сигналу розпізнає стан верстату. За допомогою Wavelet аналізатора відбувається подальший аналіз сигналу. Після цього відбувається демонстрація результатів обробки користувачеві.

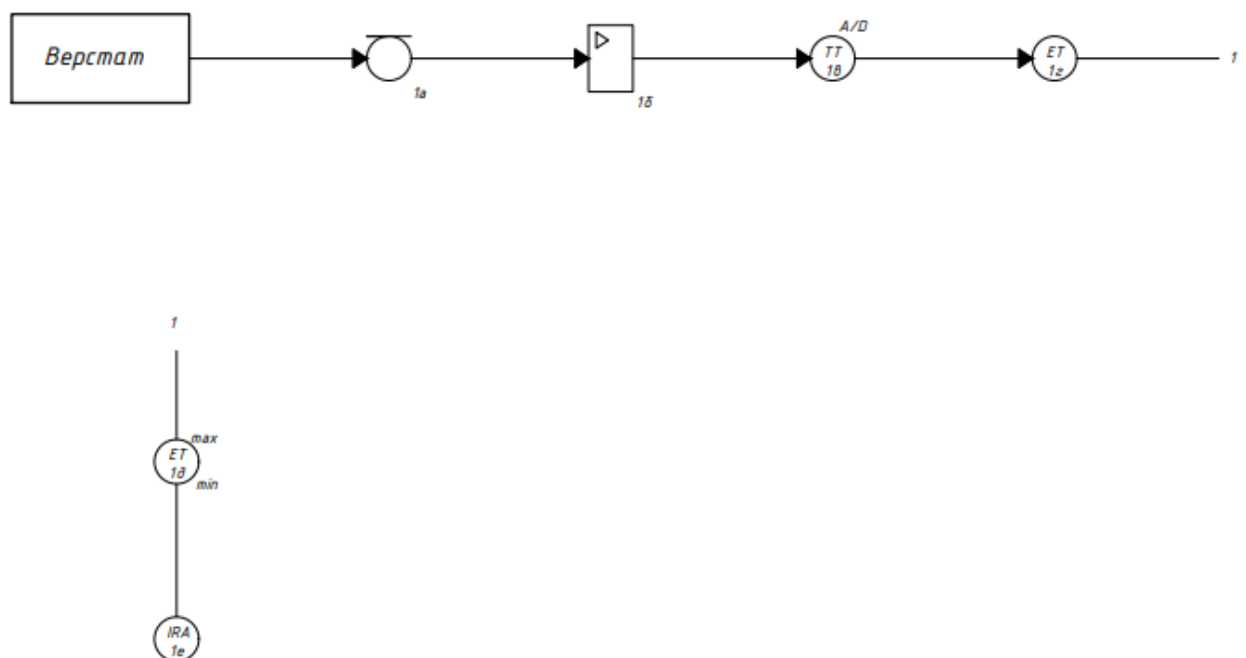


Рисунок 10. Функціональна схема системи моніторингу

Опис функціональної схеми системи моніторингу:

Схема складається з верстата, який генерує звуковий сигнал, мікрофона 1а який зчитує цей сигнал, підсилювача 1б, АЦП 1в, передавача/приймача сигналу 1г та 1д, приладів записуючого, індикуючого, сигналізуючого 1е (в ролі приладу виступає комп'ютер).

Архітектура системи включає кілька компонентів, які взаємодіють між собою для забезпечення функціональності програми. Основні компоненти системи включають:

Користувацький інтерфейс (GUI): Це вікно програми, створюється за допомогою бібліотеки Tkinter (бібліотека для створення графічних інтерфейсів). Користувач може вибирати режими моніторингу, збору даних або завантажити збережену аудіо доріжку для подальшого аналізу.

Модулі аудіо аналізу: Ці модулі відповідають за обробку вхідних аудіо даних та аналіз звуку. Вони включають функції для запису аудіо, попередньої обробки аудіо даних (фільтрації шуму, обчислення спектрограми), аналізу звуку (класифікації стану верстата) та інші операції, пов'язані з аудіо обробкою.

Модуль збору даних: Цей модуль відповідає за збір аудіо даних для навчання моделі. Він включає функції для запису аудіо, введення стану верстата користувачем, збереження зібраних даних.

Модель машинного навчання: Ця модель відповідає за навчання та класифікацію стану верстата на основі зібраних аудіо даних. Вона використовує Random forest classifier. Модель навчається на навчальних даних та використовується для класифікації стану верстата на основі вхідних аудіо даних.

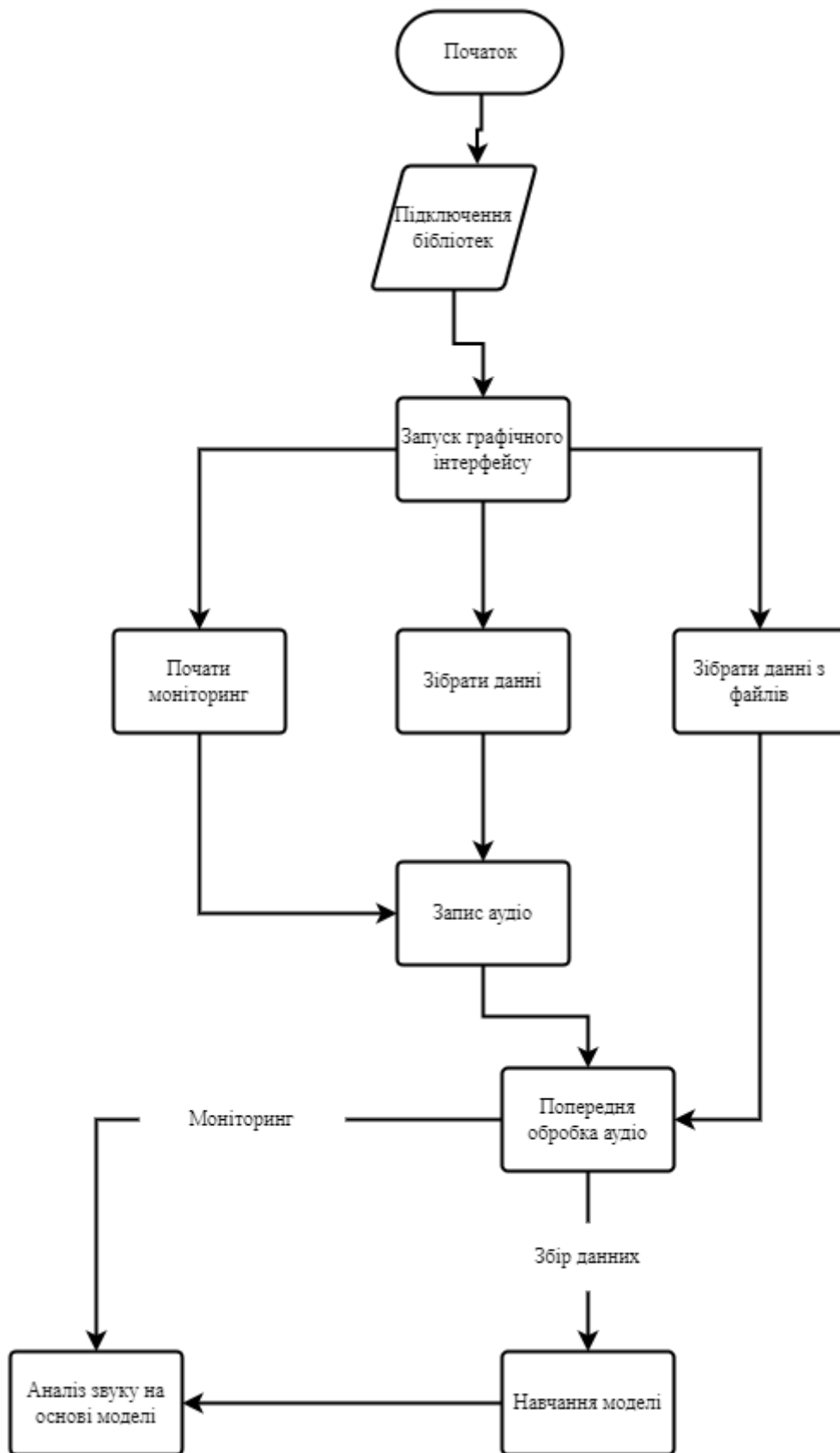


Рисунок 11. Архітектурна схема системи

### 3.3. Опис алгоритмів та методів, використовуваних у програмному забезпеченні

Ця програма реалізує моніторинг та збір даних про стан верстата за допомогою аудіо аналізу.

Порядок виконання програми:

Імпорт необхідних модулів і бібліотек.

Створення класу Application, який успадковує від tk.Tk, що представляє головне вікно програми.

Ініціалізація змінних та елементів інтерфейсу користувача (GUI) в методі create\_widgets(). Зокрема, створюються кнопки для вибору режиму моніторингу або збору даних.

Метод start\_monitoring() викликається при натисканні кнопки "Моніторинг". Він записує аудіо з мікрофону за допомогою функції record\_audio(), піддає записане аудіо попередній обробці за допомогою функції preprocess\_audio(), а потім аналізує звук за допомогою функції analyze\_sound(). Результат аналізу відображається у спливаючому вікні повідомлення.

Метод collect\_data() викликається при натисканні кнопки "Збір даних". Він запитує користувача кількість зразків даних для збору та вибирає папку для збереження даних. Потім він викликає функцію collect\_audio\_samples(), яка записує аудіо та зберігає його у файл, та функцію train\_model(), яка навчає модель на зібраних даних. Після успішного збору даних відображається спливаюче вікно повідомлення.

Метод collect\_data\_from\_files() викликається при натисканні кнопки "Збір даних з файлів". Він запитує користувача кількість файлів для збору та вибирає папку, в якій знаходяться аудіофайли. Потім він викликає функцію collect\_audio\_samples\_from\_files(), яка зчитує аудіо з файлів та зберігає його у змінну, та функцію train\_model(), яка навчає модель на зібраних даних. Після успішного збору даних відображається спливаюче вікно повідомлення.

Методи record\_audio() та preprocess\_audio() відповідають за запис та попередню обробку аудіо даних. Наприклад, метод record\_audio() використовує

бібліотеку `sounddevice` для запису аудіо з мікрофону, а метод `preprocess_audio()` застосовує фільтрацію шуму, обчислює спектрограму мела, нормалізує амплітуду та візуалізує спектрограму.

Метод `analyze_sound()` відповідає за аналіз звуку. У поточній реалізації він використовує приклад алгоритму випадкового лісу для класифікації стану верстата. Ви можете замінити цей алгоритм на будь-який інший алгоритм машинного навчання, що підходить для вашої задачі.

Методи `collect_audio_samples()` та `collect_audio_samples_from_files()` відповідають за збір аудіо даних для навчання моделі. Вони записують аудіо та пропонують користувачеві ввести стан верстата. Зібрані дані зберігаються у змінну та у вигляді аудіофайлів.

Метод `train_model()` розділяє зібрані дані на навчальну та тестову вибірки, ініціалізує та навчає модель (в даному випадку використовується алгоритм випадкового лісу), а потім оцінює точність моделі на тестових даних.

Основний код програми починається зі створення екземпляра класу `Application` та виклику методу `mainloop()`, що запускає головний цикл програми і очікує подій користувача.

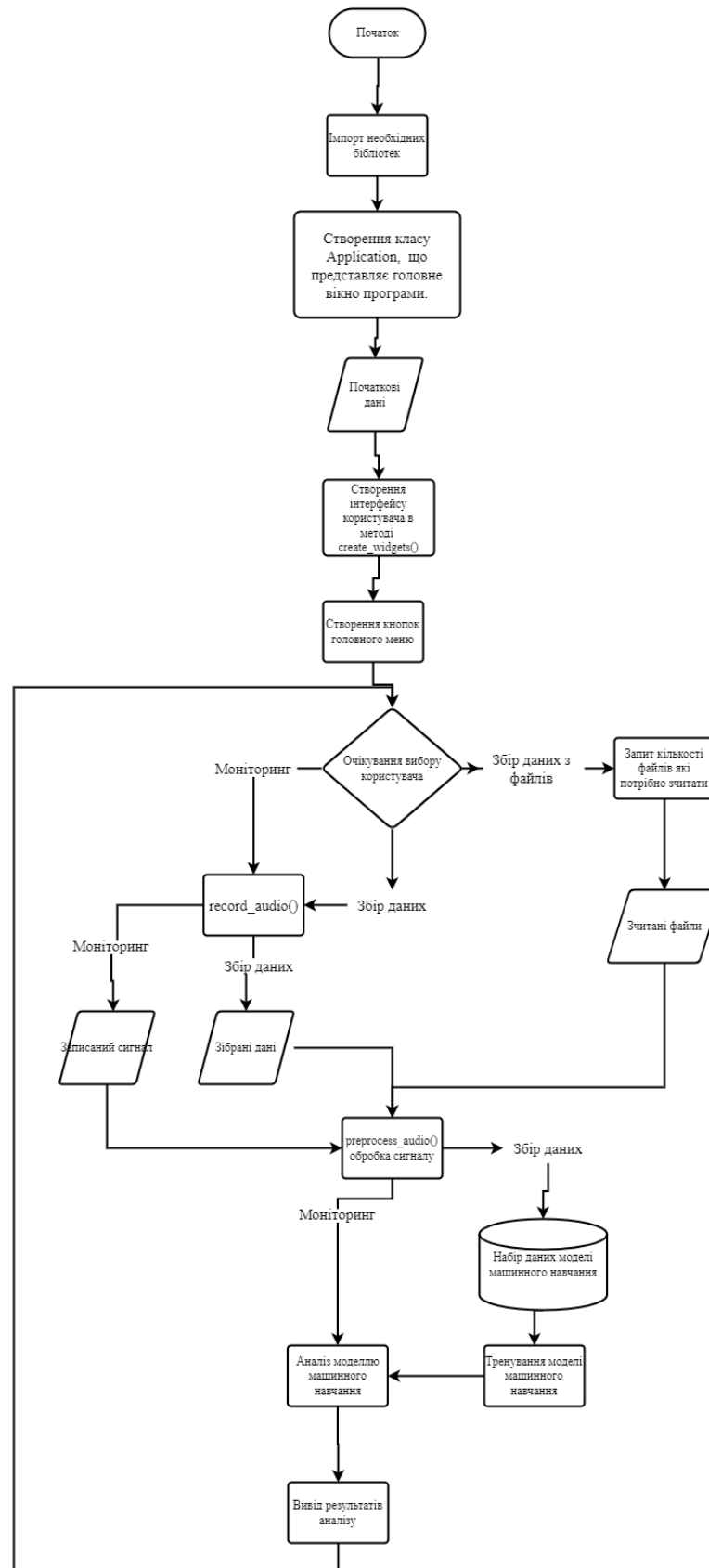
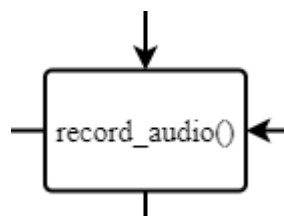


Рисунок 12. Блок-схема системи моніторингу.

Основні алгоритми та методи, які використовуються в розробленій програмі:



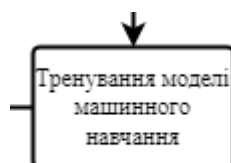
Запис аудіо: Для запису аудіо даних використовується бібліотека `sounddevice`, яка надає можливість записувати аудіо з мікрофону на певний час з заданою частотою дискретизації.



Блок що включає в себе:

Фільтр шуму: Для фільтрації шуму використовується медіанний фільтр з бібліотеки `scipy.signal`. Цей фільтр допомагає зменшити вплив шуму на аудіо дані перед подальшою обробкою.

Нормалізація амплітуди: Для нормалізації амплітуди аудіо даних використовується максимальне значення амплітуди, щоб масштабувати дані до діапазону  $[-1, 1]$ .



Випадковий ліс (Random Forest): Для навчання моделі та класифікації стану верстата використовується алгоритм випадкового лісу з бібліотеки `scikit-learn`. Модель `RandomForestClassifier` навчається на навчальних даних і використовується для прогнозування стану верстата на основі аудіо даних.

Розбиття даних: Для навчання моделі дані розбиваються на навчальну та тестувальну вибірки. Функція `train_test_split` з бібліотеки `scikit-learn` використовується для розбиття даних на дві частини з заданим співвідношенням.

Оцінка точності: Для оцінки точності моделі використовується метрика `accuracy_score` з бібліотеки `scikit-learn`. Вона порівнює прогнозовані значення з фактичними мітками тестової вибірки та обчислює точність моделі.



Інтерфейс користувача: Для створення графічного інтерфейсу користувача використовується бібліотека `tkinter`. Вона дозволяє створювати кнопки, мітки та діалогові вікна для взаємодії з користувачем.

Обчислення спектрограми мела: Для отримання спектрограми мела використовується бібліотека `librosa`. Функція `librosa.feature.melspectrogram` обчислює спектрограму мела з використанням аудіоданих після фільтрації шуму.

Візуалізація спектрограми: Бібліотека `matplotlib` використовується для візуалізації спектрограми мела. Функція `librosa.display.specshow` відображає спектрограму на графіку.

### **3.4. Пояснення інтерфейсу користувача та можливостей взаємодії з системою**

Взаємодія з системою відбувається за допомогою натискання кнопок та введення текстових даних у діалогових вікнах.

При запуску програми відкривається головне вікно, чотири елементи. Користувач може вибрати одну з дій. Вікно містить кнопки "Моніторинг", "Збір даних", "Збір даних з файлів" та "Вихід".

Натискання кнопки викликає відповідну дію.

**Моніторинг:** Користувач може натиснути кнопку "Моніторинг", щоб розпочати запис аудіо і аналізувати звук верстата в реальному часі. Дана Дія буде виконана лише, якщо користувач надасть дані для моделі. Після закінчення аналізу програма повідомляє користувача про стан верстата.

**Збір даних:** Користувач може натиснути кнопку "Збір даних", щоб зібрати аудіо дані та відповідні мітки стану верстата. Після запису кожного зразка аудіо

користувачеві пропонується ввести стан верстата (операцію чи несправність). Після збору даних програма навчає модель на цих даних.

Збір даних з файлів: Користувач може натиснути кнопку "Збір даних з файлів", щоб зібрати аудіо дані та відповідні мітки стану верстата з дерева файлів. Користувачеві пропонується ввести стан верстата для кожного вибраного файлу. Після збору даних програма навчає модель на цих даних.

Вихід: Кнопка "Вихід" дозволяє користувачеві закрити програму.

Після збору даних і навчання моделі, програма може аналізувати звук верстата на основі зібраних даних та надавати прогнозовані стани верстата.

## **4. Результати тестування програмного забезпечення**

### **4.1. Опис методів та процедур тестування системи**

Тестування даної системи відбудеться в такому порядку:

Тестування збору даних:

Виконати збір даних, ввести мітки стану верстата і перевірити, що дані коректно зберігаються.

Перевірити, що кількість зібраних даних відповідає заданому числу зразків.

Запустити програму зі зібраними даними та перевірити, що модель навчена та може правильно класифікувати звук верстата.

Тестування збору даних з файлів:

Переконатися, що програма може коректно зчитувати аудіофайли з заданої папки.

Запустити програму зі зібраними даними та перевірити, що модель навчена та може правильно класифікувати звук верстата з файлів.

Тестування аналізу звуку:

Переконатися, що програма може аналізувати звук верстата в режимі моніторингу та надавати правильний прогнозований стан.

Перевірити, що прогнозований стан верстата відповідає очікуваному стану на підставі звукових ознак.

Тестування точності моделі:

Перевірити, чи після навчання моделі її точність оцінюється коректно за допомогою метрики `assurasy_score`.

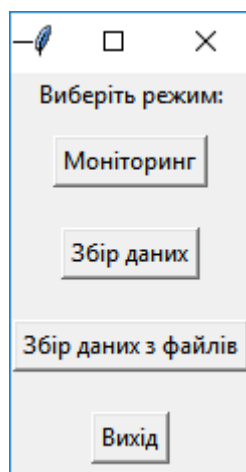
Запустити програму з тестовими даними та перевірити, чи точність моделі відображається правильно.

Ці методи та процедури допоможуть встановити правильність роботи системи, переконатися, що дані збираються та обробляються вірно, а модель навчена та працює з нею. Також допоможуть перевірити точність моделі та її здатність правильно класифікувати звук верстата.

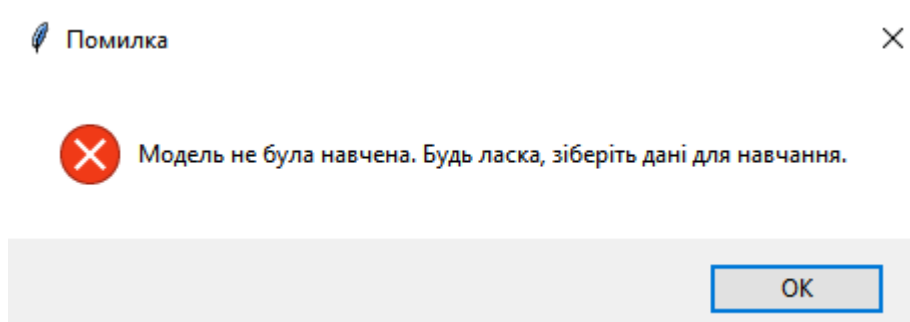
Для навчання моделі та тестування були використані аудіо записи вилучені з відео на youtube.

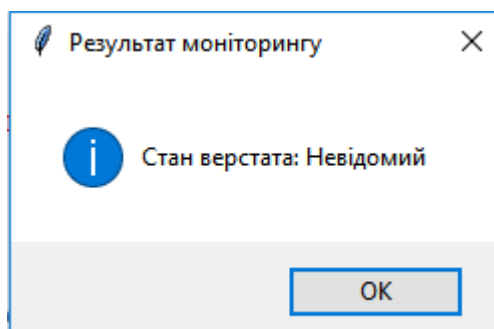
## 4.2. Проведення експериментів та аналіз результатів

Запуск програми:

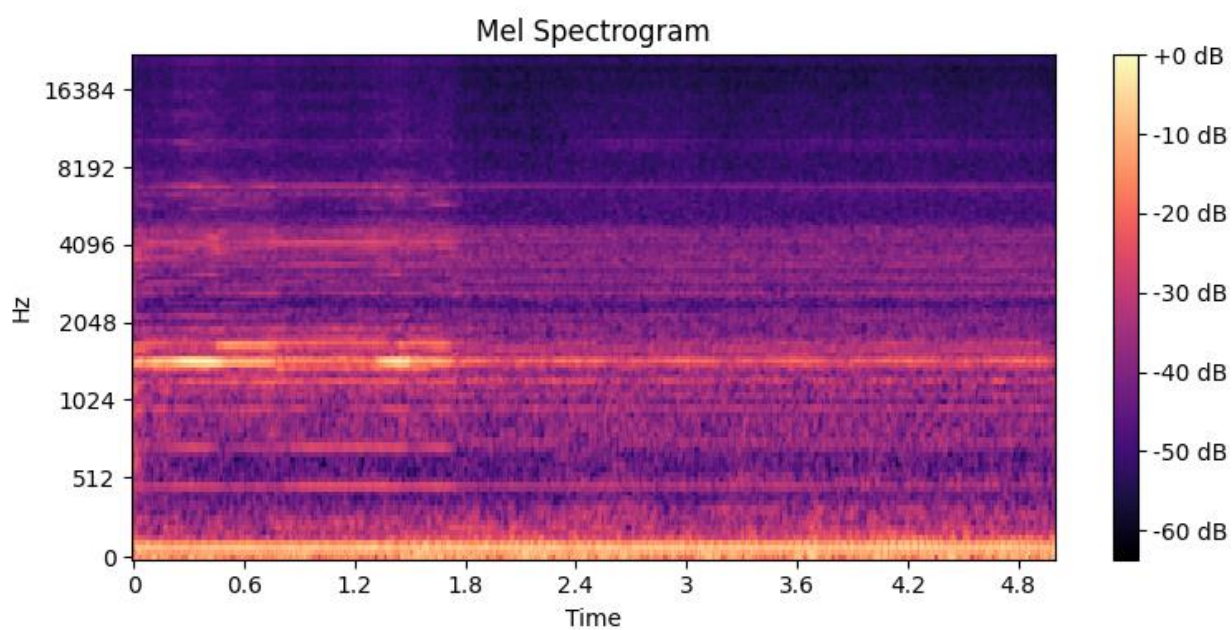
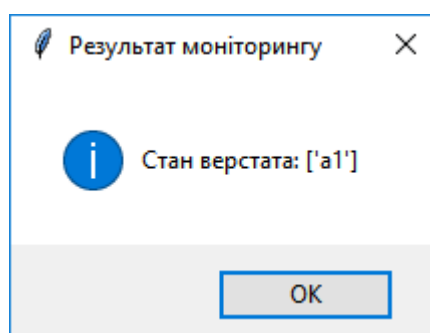
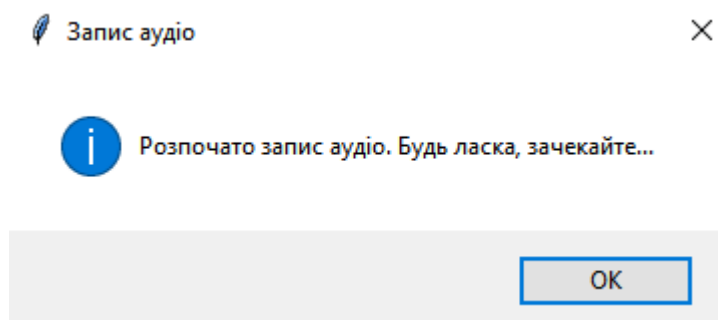


Натиснувши на кнопку моніторинг отримаємо результат:

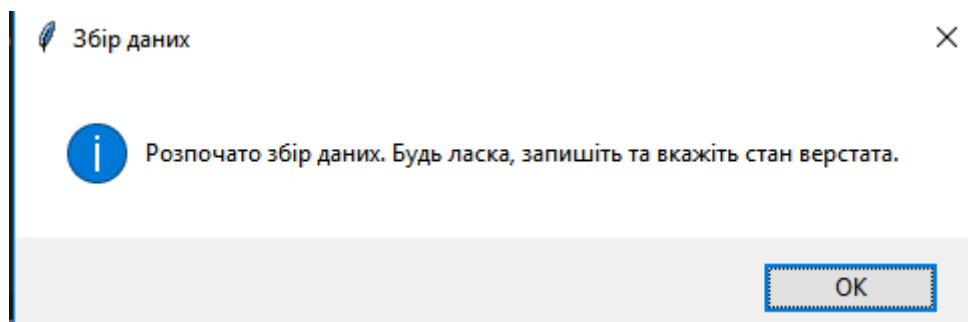
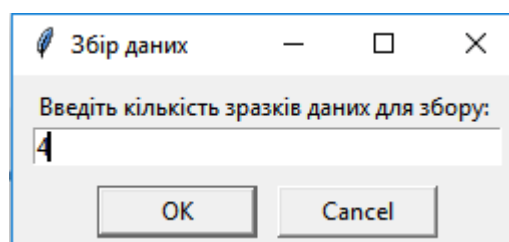
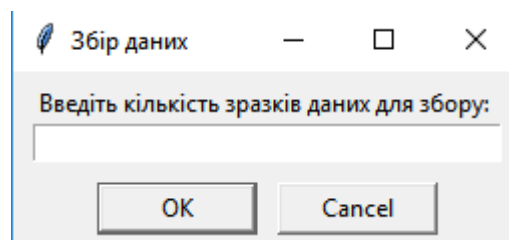
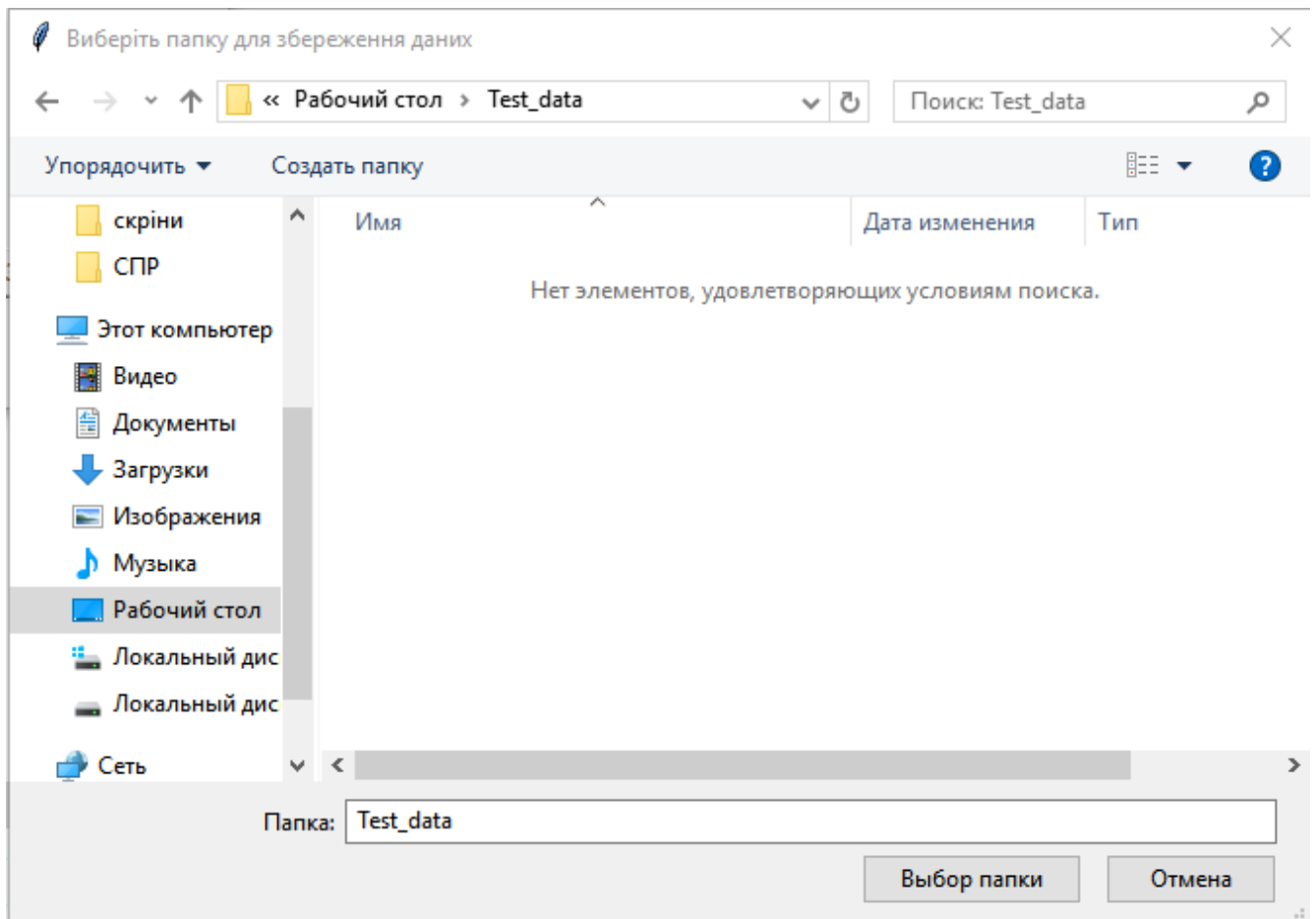




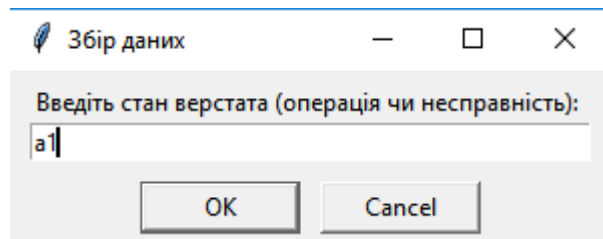
Після створення моделі знову запусимо процес моніторингу:



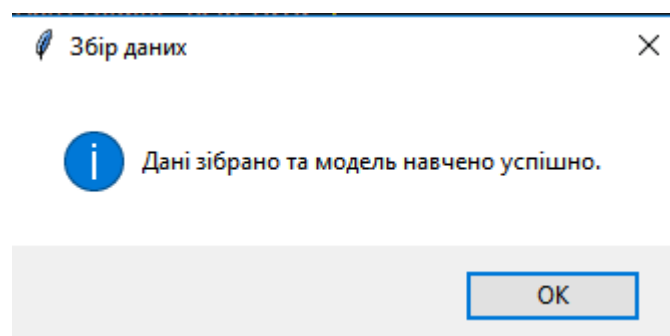
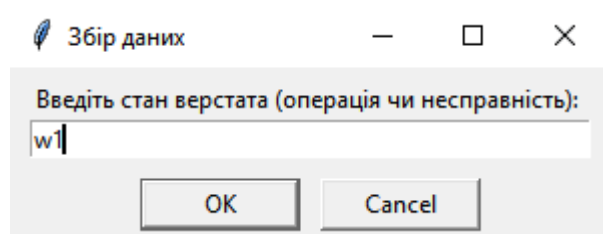
Натиснувши на кнопку збір даних отримаємо результат:



Так як даними слугували записи фрезерування алюмінієвої заготовки дамо відповідну назву.



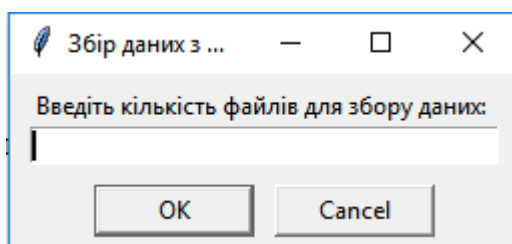
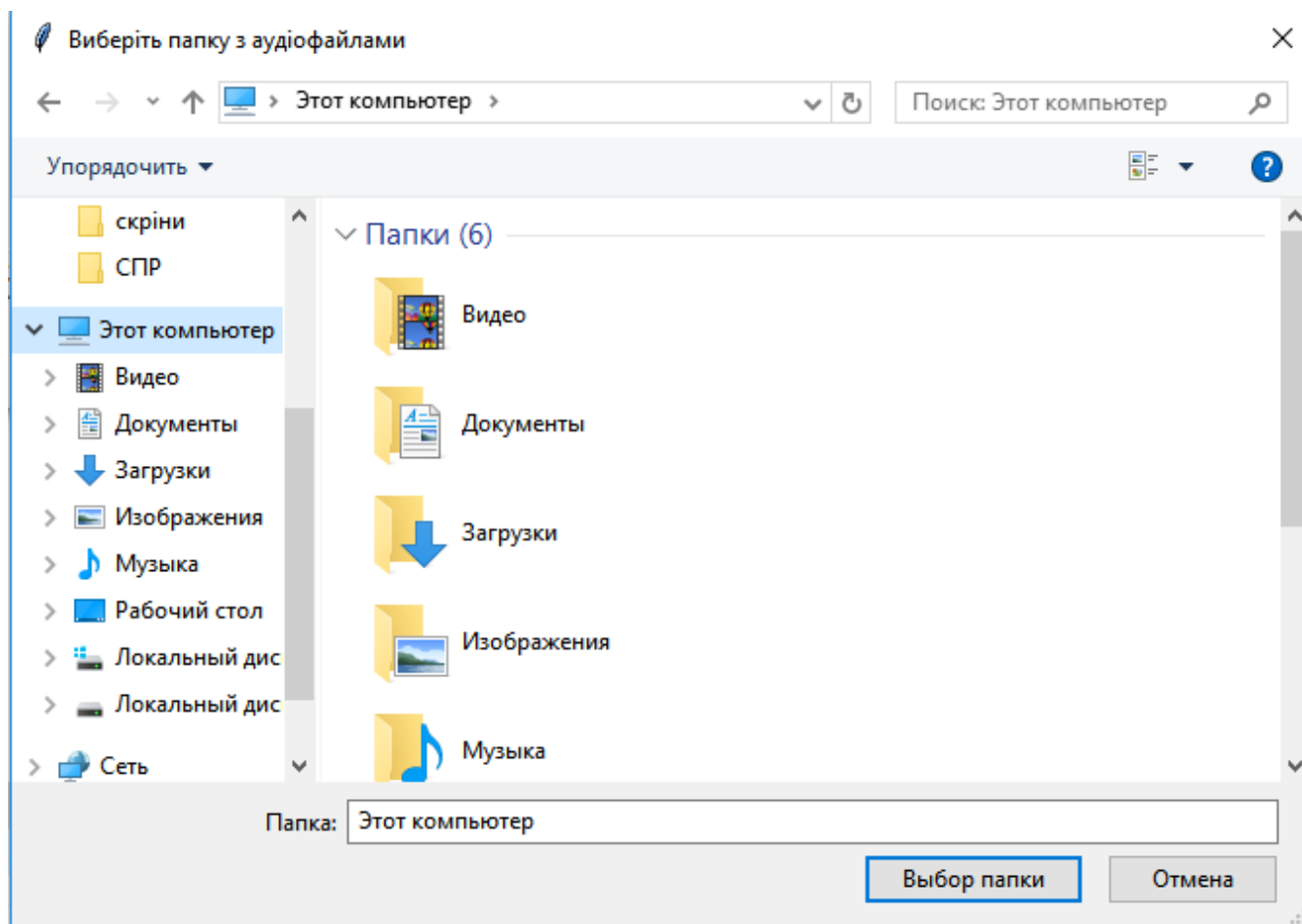
Другим набором даних слугував звук фрезерування при зточеній фрезі.



В результаті отримано 4 Пари запис-мітка

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
data1.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ
data2.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ
data3.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ
data4.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ
labels1.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ
labels2.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ
labels3.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ
labels4.npy	05.06.2023 7:36	Файл "NPY"	1 КБ

Натиснувши на кнопку збір даних отримаємо результат:



В результаті тестування було виявлено, що програма починає правильно розпізнавати сигнал мінімум в 45% ситуацій після навчання на 20 п'яти секундних аудіо записах (кількість проведених тестів – 20).

Результати тестування відображені в *Табл. А-1, Табл. А-2 та Табл. А-3 Додаток А.*

В результаті збільшення бази даних внесених сигналів до 40 за аналогічної кількості тестових запусків моніторингова система правильно розпізнає сигнал у 55% відсотках випадків.

Після збільшення кількості записів у базі даних до 60 програма правильно розпізнавала стан фрезерного верстата у 60% ситуацій.

Нами також у кожному випадку додатково оцінювалося окремо два показники: «Частка правильних оцінок про справність, %» та «Частка правильних

оцінок про несправність, %». Підтвердити факт, що моніторингова система краще розпізнає звукові сигнали про справність обладнання чи про несправність обладнання, виявити не вдалося.

На завершення тестування варто відзначити, що результати тестування не є оптимальними. Для покращення результатів рекомендується покращити набір даних, збільшити кількість еталонних аудіо-зразків та повторити експеримент на основі більшій кількості тестових запусків.

### **4.3. Виявлення переваг та недоліків розробленої системи**

Розуміння базису застосованого методу діагностики, специфіки діагностичного алгоритму та виявлених в процесі розробки проблем, можемо виділити наступні переваги та недоліки розробленої системи.

#### *Переваги:*

1. Простота використання: Інтерфейс користувача системи простий та зрозумілий, що робить її легкою у використанні навіть для непрофесійних користувачів.
2. Автоматизація процесу: Система забезпечує автоматичний аналіз і класифікацію аудіо даних, що дозволяє значно зекономити час та зусилля, порівняно з ручним аналізом.
3. Порівняно низька вимога до даних: Завдяки використанню машинного навчання та класифікаційних алгоритмів, система може досягати помірно високої точності за порівняно низькою кількості даних при класифікації звукових сигналів.

#### *Недоліки:*

1. Залежність від якості даних: Точність прогнозів системи може залежати від якості та репрезентативності набору аудіо даних, на якому вона була навчена. Недостатньо репрезентативні або зашумлені дані можуть призводити до погіршення точності.

2. **Обмеженість в розпізнаванні нових зразків:** Система може виявляти обмежену кількість зразків, на яких була навчена. Якщо зустрічаються нові аудіо зразки, які відрізняються від тих, на яких навчалася система, її точність може знизитися.

3. **Вимоги до обчислювальних ресурсів:** Використання системи для обробки великих обсягів аудіо даних може вимагати значних обчислювальних ресурсів, таких як потужний процесор та достатня кількість оперативної пам'яті.

4. **Недостатня гнучкість в розширенні:** Хоча система може бути налаштована та розширена, вона має обмежені можливості для додавання нових функцій або інтеграції з іншими системами.

Для запуску програми **необхідна** наявність наступних технічних і програмних засобів:

A. Python: Встановлений інтерпретатор Python версії 3.x.

Б. Бібліотеки: Встановлені наступні бібліотеки:

- tkinter: для створення графічного інтерфейсу користувача.
- sounddevice: для запису та програвання аудіо.
- numpy: для роботи з числовими масивами та обчислень.
- librosa: для аудіообробки та аналізу звуку.
- sklearn: для машинного навчання та класифікації.
- matplotlib: для візуалізації даних.

В. Обладнання:

- доступ до мікрофону для запису аудіо.
- наявність вільної пам'яті для обробки та аналізу звукових даних.

Збільшення набору аналізованих даних призведе до збільшення вимог до обчислювальних ресурсів та пам'яті. Більший набір даних вимагатиме більше простору для зберігання та більшої кількості обчислень при навчанні моделі.

**Зростання точності прогнозів зі зростанням набору даних** зумовлена наступними чинниками:

1. *Кількість даних.* Зі збільшенням кількості даних для навчання моделі, точність прогнозів може покращуватися. Більший набір даних надає моделі

більше інформації для виявлення закономірностей та роботи з більш репрезентативними зразками.

2. *Різноманітність даних.* Використання різноманітних даних може покращити точність прогнозів, оскільки модель отримує більше інформації про різні стани верстата та може краще розпізнавати їх.

3. *Якість даних.* Якість даних, така як чистота, рівень шуму та репрезентативність зразків, також впливає на точність прогнозів. Використання якісних та репрезентативних даних може покращити точність моделі.

Зростання точності зі зростанням набору даних може бути неоднозначним і залежати від багатьох факторів, таких як якість даних, розподіл класів у наборі даних, складність проблеми класифікації та використовуваний алгоритм машинного навчання. Оптимальну кількість даних та досягну точність можна визначити експериментально, збільшуючи набір даних та оцінюючи результати.

## **ВИСНОВКИ ТА ПОДАЛЬШІ МОЖЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ПРОЕКТУ**

### **5.1. Підсумок проведених досліджень та розробки**

В ході створення дипломного проекту мною були досліджені фрезерні верстати, типові причини поломки фрезерних верстатів, їх причини та наслідки. Було проведене дослідження систем моніторингу верстатів загалом і фрезерних зокрема, проведена порівняння ефективності різних підходів здійснення моніторингу над станом фрезерного верстату. Було проведено дослідження систем моніторингу що базуються на аналізі акустичних даних, отриманих в результаті роботи фрезерного верстату.

Було розроблено систему, що використовуючи машинне навчання може з певною успішністю визначити, чи є відхилення в стані фрези під час фрезерування.

### **5.2. Загальна оцінка ефективності системи моніторингу**

Загалом на даний момент в зв'язку з недостатньою кількістю якісних вхідних даних розроблена мною система здатна правильно розрізнити пошкодження в приблизно 38 % випадків, що недостатньо для практичного застосування. Для рішення цієї проблеми в структуру програми було включено блок для поповнення набору даних.

### **5.3. Рекомендації щодо подальшого розвитку**

Для покращення ефективності роботи системи моніторингу роботи фрезерного верстату необхідно збільшити кількість даних. Для цього варто розглянути можливість адаптації системи як безкоштовного веб-додатку на час збору відповідних даних. Також варто розглянути оптимізацію алгоритму машинного навчання та процесу обробки даних перед аналізом. Для комерційного успіху потрібно переглянути взаємодію користувача з системою, та покращити графічний інтерфейс.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виробнича практика. Організація, проходження та захист звіту [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М. О. Безуглий, Н. І. Бурау, Ю. В. Киричук, М. В. Філіппова. – Електронні текстові дані (1 файл: 704 Кбайта). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 40 с.
2. Дипломний проєкт бакалавра: виконання, оформлення та захист : навч. посіб. / Уклад. : С. П. Вислоух, М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 64 с.
3. Доля В.М. Технологія обробки типових деталей: Конспект лекцій для студентів спеціальності 7.090.202 „Технологія машинобудування” усіх форм навчання. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2003. – 64 с.
4. Дослідження впливу технологічних режимів фрезерування на рівень вібрації шпиндельного вузла обробного центру / А. О. Скоркін [та ін.] // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Techniques in a machine industry : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2020. – № 1. – С. 59-64
5. Прогресивні технології виготовлення деталей насосного обладнання : навчальний посібник / І. М. Дегтярьов, А. О. Нешта, В. О. Колесник. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 256 с.
6. Технологія верстатних робіт: навч.пос. для проф.-техн. навч. закладів / М. А. Вайнтрауб, В. Й. Засельський, Д. В. Пополов, за наук. ред. М. А. Вайнтрауба. – К. : 2015. – 199с.
7. Фрезерна група верстатів // [Електронний ресурс] -

- [https://uk.wikipedia.org/wiki/Фрезерна\\_група\\_верстатів](https://uk.wikipedia.org/wiki/Фрезерна_група_верстатів)
8. Фрезерний верстат // Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. – Львів, 2010. – С. 204. – ISBN 978-966-7407-83-4.
  9. Ahmad, M.I., Saif, Y. & Yusof, Y., A Case Study: Monitoring and Inspection Based on IoT for Milling Process. Int J Adv Manuf Technol 118, pp. 1305-1315, 2022. DOI: 10.1007/s00170-021-07970-y
  10. Azmi, F. N., Saptaji, K. & Fikri, M. R., Construction of Vibration Monitoring System Based on Wireless Sensor Network (WSN) for Machining Process, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1098(6), 062094, 2021. DOI: 10.1088/1757-899x/1098/6/062094
  11. CNC Milling - <https://cst.princeton.edu/studiolab/equipment/cnc-milling>
  12. Condition Monitoring Systems - <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/catalog/products/10075099>
  13. Equipment Monitoring System Features, Platforms, and Benefits Read more - <https://www.scnsoft.com/manufacturing/equipment-monitoring>
  14. HaasConnect: Remote monitoring - <https://www.haascnc.com/productivity/control/haas-connect.html>
  15. IoT New Function: FIELD system PMA-Monitor - [https://www.fanuc.co.jp/en/product/new\\_product/2021/202107\\_pmamonitor.html](https://www.fanuc.co.jp/en/product/new_product/2021/202107_pmamonitor.html)
  16. Ma, L., Howard, I., Pang, M., Wang, Z. & Jianxiu, S., Experimental Investigation of Cutting Vibration during Micro-End-Milling of the Straight Groove, Micromachines, 11, 494, May 2020.
  17. Machine Monitoring. <https://tulip.co/ebooks/machine-monitoring/>
  18. Mark Smith. Uncovering the Top Malfunctions of Milling Machine Control Systems. -<https://mechanicsnews.com/main-failures-of-the-milling-machine-control-system/>
  19. Milling Machine: Definition, Parts, Operation, Working Principle, Application, Advantages [Notes & PDF] - <https://themechanicalengineering.com/milling->

- machine/
20. Moehring, H.C, Werkle, K. & Maier, W., Process Monitoring with a Cyber-Physical Cutting Tool, *Procedia CIRP*, 93, pp.1466–1471, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.034
  21. Okuma Monitoring and Control System - <https://www.myokuma.com/okuma-monitoring-and-control-system>
  22. Pejryd, L. & Eynian, M., Minimization of Chatter in Machining by the Use of Mobile Platform Technologies, *Proc. 5th Int. Swedish Prod. Symp. SPS12*, pp. 179-189, Jan. 2012.
  23. Process Monitoring And Real Time Algorithmic For Hot Stamping Lines. Robert Vollmer et al. / *Procedia Manufacturing* 29 (2019) 256–263 - <https://www.vorne.com/solutions/applications/machine-monitoring/>
  24. Production monitoring system development and modification // Snatkin A - January 2015, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* 64(4S):567 - [https://www.researchgate.net/publication/284762269\\_Production\\_monitoring\\_system\\_development\\_and\\_modification](https://www.researchgate.net/publication/284762269_Production_monitoring_system_development_and_modification)
  25. Shahriar, S., Rahaman, I., Karim, A.B., Hasan, M.M., Chowdhury, F., & Sarker, M., Bridging Internet of Things and Wireless Sensor Networks: Applications and Challenges, *Indonesian Journal of Computing, Engineering and Design (IJoCED)*, 2(1), 13, 2020. DOI: 10.35806/ijoced.v2i1.99
  26. Smart Maintenance - Monitoring and Analysis - [https://www.ipk.fraunhofer.de/en/expertise-and-technologies/production-processes-and-facilities/monitoring-and-analysis.html?trk=organization\\_guest\\_main-feed-card\\_feed-article-content](https://www.ipk.fraunhofer.de/en/expertise-and-technologies/production-processes-and-facilities/monitoring-and-analysis.html?trk=organization_guest_main-feed-card_feed-article-content)
  27. Solving of the milling problems - <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/troubleshooting-milling>
  28. Sonawane H., Badhe A. Sensitivity Analysis of Stability Lobe Diagram (SLD) in a High-Speed Milling - <https://www.euspen.eu/knowledge-base/LAM19133.pdf>
  29. System architecture of the machine monitoring system - <https://www.researchgate.net/figure/System-architecture-of-the-machine->

- monitoring-system\_fig2\_332215002
30. Tool wear monitoring and prediction based on sound signal/ The International Journal of Advanced Manufacturing Technology . volume 103, pages3361–3373 (2019) - <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-03686-2>
  31. Utilization monitoring and analysis - [https://english.mazak.jp/smooth-technology/monit\\_analysis/](https://english.mazak.jp/smooth-technology/monit_analysis/)
  32. What is CNC Milling?- <https://get-it-made.co.uk/resources/what-is-cnc-milling#what-is-a-cnc-milling-machine>
  33. Wireless Vibration Monitoring System for Milling Process and Analysis of the Influence of Processing Parameters. Muhamad Rausyan Fikri, Kushendarsyah Saptaji & Fijai Naja Azmi - April 2022. - Journal of ICT Research and Applications 16(1):38-55 - [https://www.researchgate.net/publication/360300318\\_Wireless\\_Vibration\\_Monitoring\\_System\\_for\\_Milling\\_Process](https://www.researchgate.net/publication/360300318_Wireless_Vibration_Monitoring_System_for_Milling_Process)
  34. Yue, C., Gao, H., Liu, X., Liang, S. Y. & Wang, L., A Review of Chatter Vibration Research in Milling, Chinese J. Aeronaut., 32(2), pp. 215-242, 2019

## **ДОДАТКИ**

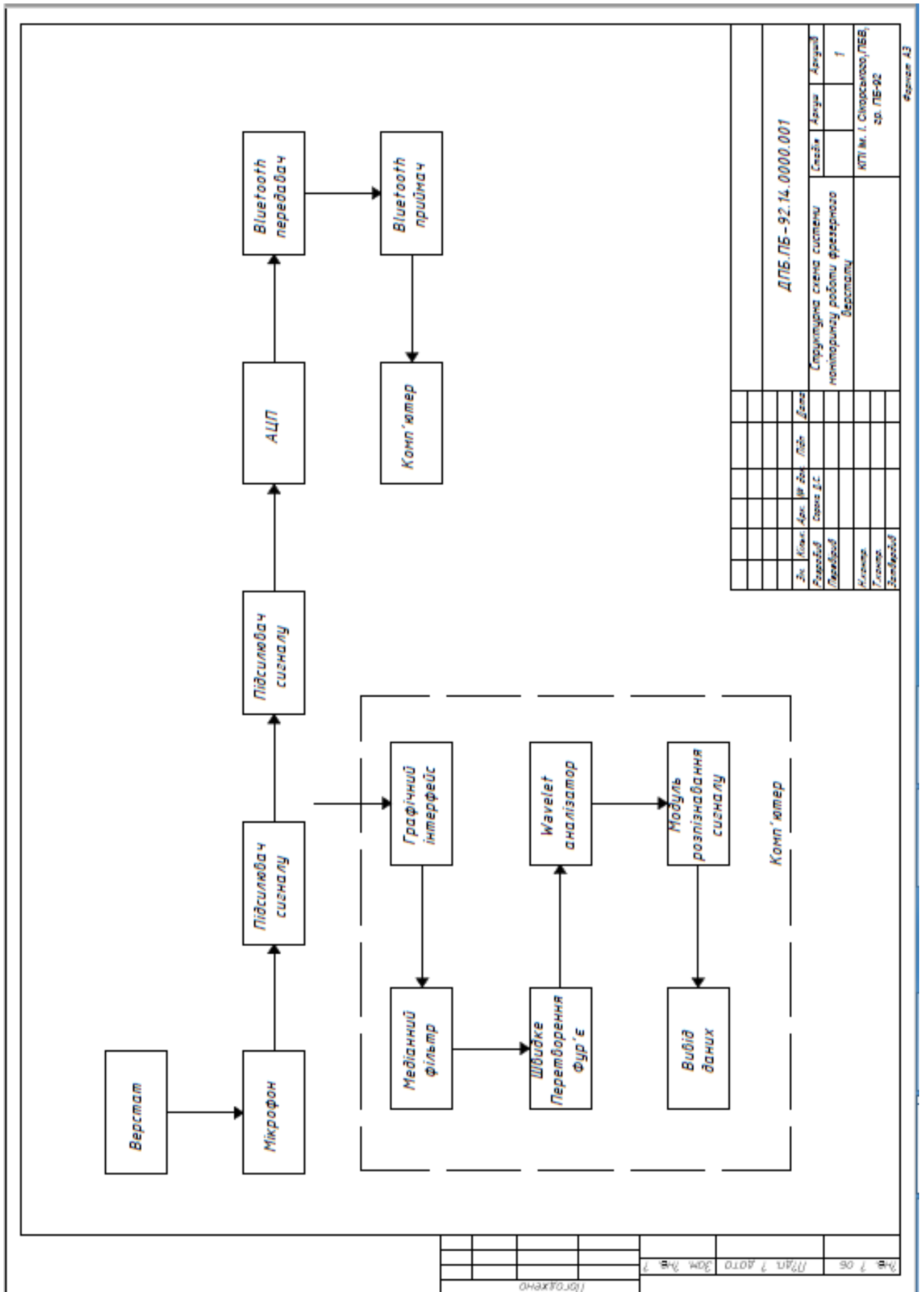
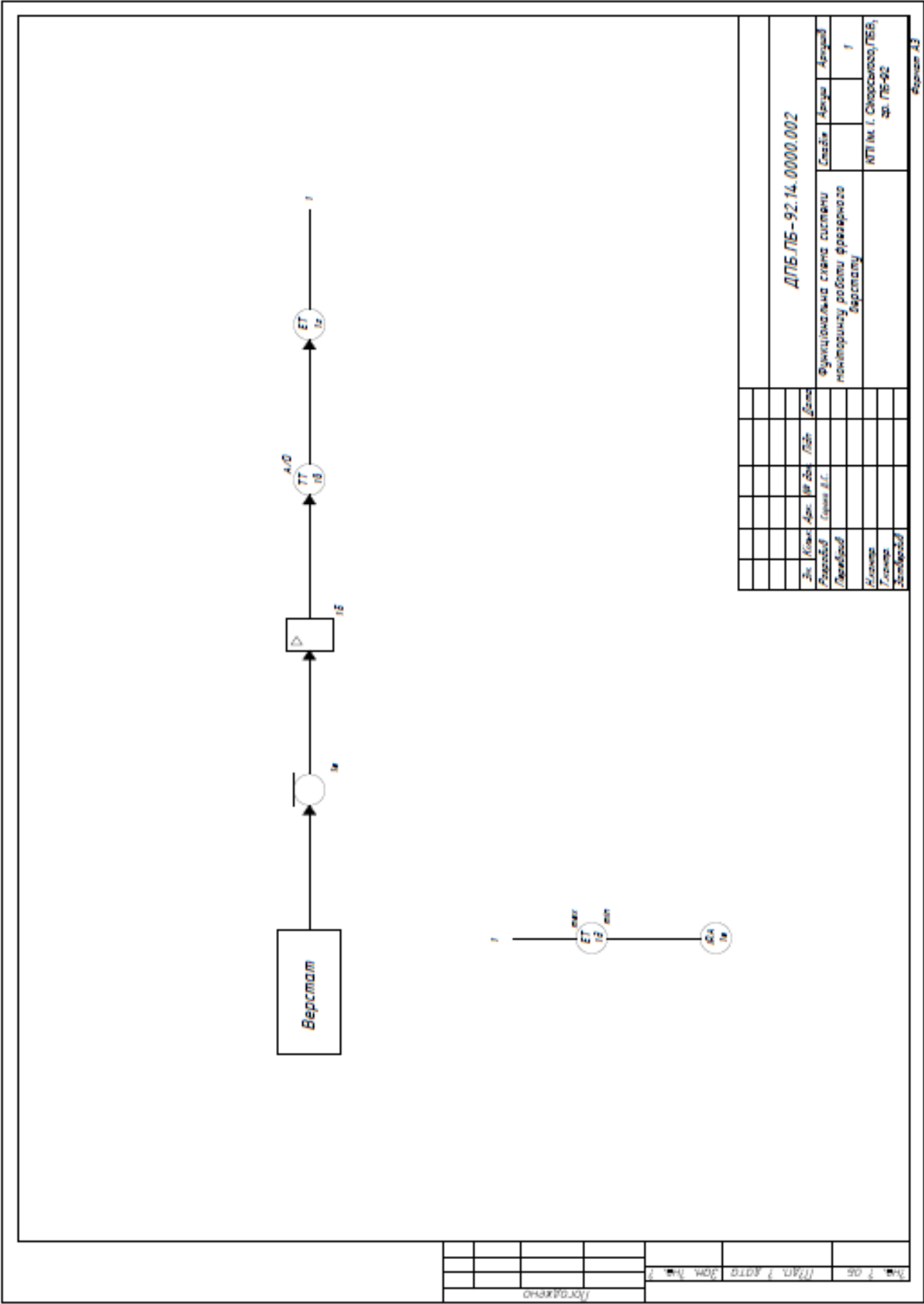


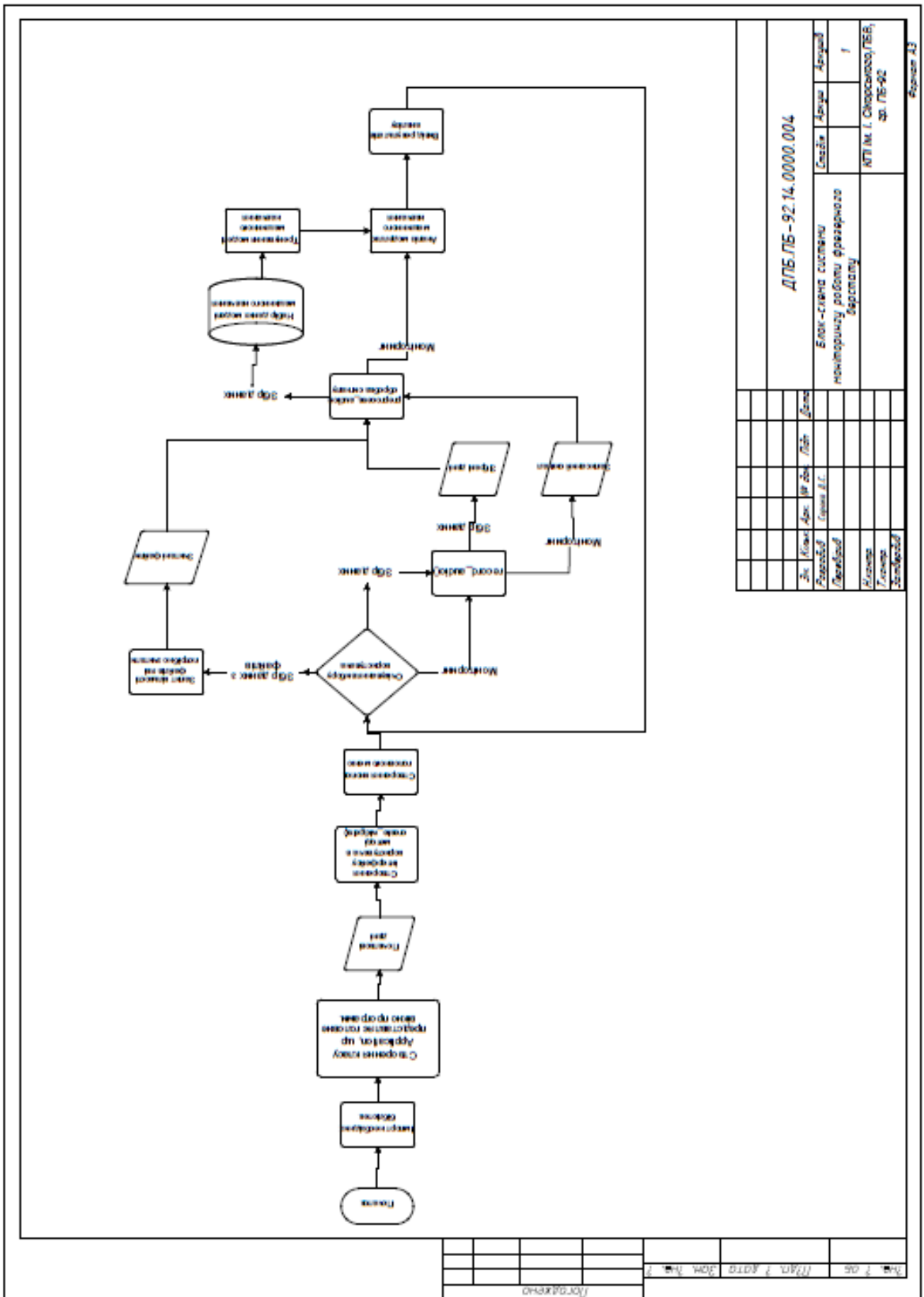
Рисунок А-1. Структурна схема системи



ДПБ/ПБ - 92.14.0000.002									
Функціональна схема системи моніторингу роботи фрезерного верстату									
№	Конт.	Апр.	№	дн.	Лист	Діагр.	Склад	Архив	Архив
Розробл.	Скочил	Скочил							1
Лектор									
Голова									
Заступ.									
КПІ (м. І. Скорикова) / ПББ, зр. ПБ-92									

Формат А3

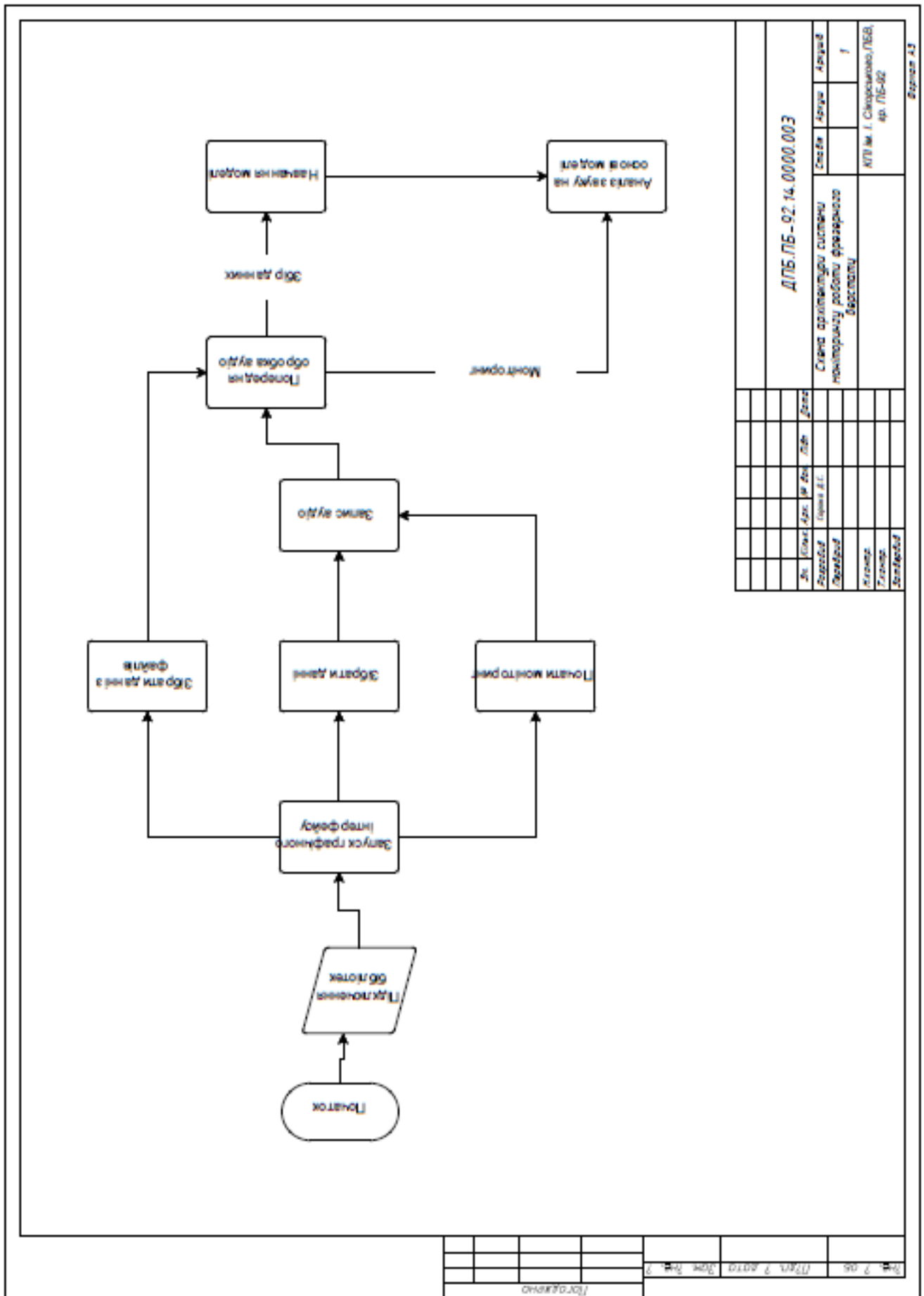
Рисунок А-2. Функціональна схема системи



ДПБ.ПБ - 92.14.0000.004		Склад	Архів	Архів
Блок-схема системи		моніторингу роботи фрезерного верстата		
№	Клас	Арх.	№ док.	Лист
Розробл.	Склад	Арх.	№ док.	Лист
Перевірл.	Склад	Арх.	№ док.	Лист
Автори	МТІ ім. І. Сидоренка (ПББ)			
Генерл.	ар. ПБ-92			
Затвердл.				

Рис. А-3

Рисунок А-3. Блок-схема програми



ДПБ.ПБ - 02.14.0000.003		Сторінка	Аудит
Система архітектури системи		Сторінка	Аудит
національну роботу фінансового		1	
розробку			
№	Сторінка	№	Диф.
Розробка	Сторінка	№	Диф.
Автори	Тематика	Тематика	Тематика
Тематика	Тематика	Тематика	Тематика
Тематика	Тематика	Тематика	Тематика

Рисунок А-4. Схема архітектури програмного забезпечення



Таблиця А-1. Результати тестування за 20 вхідних сигналів

**Варіант тестування #1**

20	Розмір набору вхідних даних, записів
----	--------------------------------------

**Результати тестування:**

11	кількість поданих сигналів про справність верстату
5	кількість правильних відгуків про справність верстату
<b>45%</b>	<b>Частка правильних оцінок про справність, %</b>
9	кількість поданих сигналів про несправність верстату
4	кількість правильних відгуків про справність верстату
<b>44%</b>	<b>Частка правильних оцінок про несправність, %</b>
<b>45%</b>	<b>Ефективність тестованої системи, %</b>

**Статистичні дані спостережень:**

Номер сигналу	Стан верстату	Відгук програми	Результат тестування	Якість відгуку
1	справний	справний	Ок!	1
2	несправний	справний	ERROR	FALSH
3	справний	несправний	ERROR	FALSH
4	несправний	справний	ERROR	FALSH
5	несправний	несправний	Ок!	0
6	несправний	справний	ERROR	FALSH
7	справний	справний	Ок!	1
8	справний	справний	Ок!	1
9	справний	справний	Ок!	1
10	справний	несправний	ERROR	FALSH
11	справний	несправний	ERROR	FALSH
12	несправний	справний	ERROR	FALSH
13	справний	справний	Ок!	1
14	несправний	несправний	Ок!	0
15	несправний	несправний	Ок!	0
16	несправний	несправний	Ок!	0
17	справний	несправний	ERROR	FALSH
18	справний	несправний	ERROR	FALSH
19	несправний	справний	ERROR	FALSH
20	справний	несправний	ERROR	FALSH

Таблиця А-2. Результати тестування за 40 вхідних сигналів (фрагмент)

**Варіант тестування #2**

40	Розмір набору вхідних даних, записів
----	--------------------------------------

**Результати тестування:**

10	кількість поданих сигналів про справність верстату
5	кількість правильних відгуків про справність верстату
<b>50%</b>	<b>Частка правильних оцінок про справність, %</b>
10	кількість поданих сигналів про несправність верстату
6	кількість правильних відгуків про справність верстату
<b>60%</b>	<b>Частка правильних оцінок про несправність, %</b>
<b>55%</b>	<b>Ефективність тестованої системи, %</b>

**Статистичні дані спостережень:**

Номер сигналу	Код сигналу	Стан верстату	Відгук програми	Результат тестування	Якість відгуку
1	1	справний	несправний	ERROR	FALSH
2	1	справний	справний	Ок!	1
3	1	справний	справний	Ок!	1
...	...	...	...	...	...
40	1	справний	несправний	ERROR	FALSH

Таблиця А-3. Результати тестування за 60 вхідних сигналів (фрагмент)

**Варіант тестування #3**

60	Розмір набору вхідних даних, записів
----	--------------------------------------

**Результати тестування:**

12	кількість поданих сигналів про справність верстату
7	кількість правильних відгуків про справність верстату
<b>58%</b>	<b>Частка правильних оцінок про справність, %</b>
8	кількість поданих сигналів про несправність верстату
5	кількість правильних відгуків про справність верстату
<b>65%</b>	<b>Частка правильних оцінок про несправність, %</b>
<b>60%</b>	<b>Ефективність тестованої системи, %</b>

**Статистичні дані спостережень:**

Номер сигналу	Код сигналу	Стан верстату	Відгук програми	Результат тестування	Якість відгуку
1	0	несправний	несправний	Ок!	0
2	1	справний	справний	Ок!	1
3	0	несправний	несправний	Ок!	0
...	...	...	...	...	...
60	0	несправний	несправний	Ок!	0

*Код програми*

```
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox, simpledialog, filedialog
import sounddevice as sd
import numpy as np
import librosa
import os
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import accuracy_score
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import signal
import pywt

class Application(tk.Tk):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.title("Моніторинг верстата")

        self.sample_rate = 44100 # Частота дискретизації звуку
        self.duration = 5 # Тривалість запису в секундах
        self.model = None
        self.data_directory = None

        self.create_widgets()

    def create_widgets(self):
        # Вибір режиму моніторингу або збору даних
        mode_label = tk.Label(self, text="Виберіть режим:")
        mode_label.pack()

        monitoring_button = tk.Button(self, text="Моніторинг",
command=self.start_monitoring)
        monitoring_button.pack(pady=10)

        data_collection_button = tk.Button(self, text="Збір даних",
command=self.collect_data)
        data_collection_button.pack(pady=10)

        file_collection_button = tk.Button(self, text="Збір даних з файлів",
command=self.collect_data_from_files)
        file_collection_button.pack(pady=10)

        exit_button = tk.Button(self, text="Вихід", command=self.quit)
        exit_button.pack(pady=10)

    def start_monitoring(self):
        audio_data = self.record_audio(self.duration, self.sample_rate)
        preprocessed_audio = self.preprocess_audio(audio_data)
        predicted_state = self.analyze_sound(preprocessed_audio)
```

```

    messagebox.showinfo("Результат моніторингу", f"Стан верстата:
{predicted_state}")

    def collect_data(self):
        self.data_directory = filedialog.askdirectory(title="Виберіть папку для
збереження даних")
        if self.data_directory:
            num_samples = simpledialog.askinteger("Збір даних", "Введіть кількість
зразків даних для збору: ")
            if num_samples is not None:
                data, labels = self.collect_audio_samples(num_samples)
                self.train_model(data, labels)
                messagebox.showinfo("Збір даних", "Дані зібрано та модель навчено
успішно.")

    def collect_data_from_files(self):
        self.data_directory = filedialog.askdirectory(title="Виберіть папку з
аудіофайлами")
        if self.data_directory:
            num_files = simpledialog.askinteger("Збір даних з файлів", "Введіть
кількість файлів для збору даних: ")
            if num_files is not None:
                data, labels = self.collect_audio_samples_from_files(num_files)
                self.train_model(data, labels)
                messagebox.showinfo("Збір даних з файлів", "Дані зібрано та модель
навчено успішно.")

    def record_audio(self, duration, sample_rate):
        messagebox.showinfo("Запис аудіо", "Розпочато запис аудіо. Будь ласка,
зачекайте...")
        audio = sd.rec(int(duration * sample_rate), samplerate=sample_rate,
channels=1)
        sd.wait()
        return audio.flatten()

    def preprocess_audio(self, audio_data):
        # Медіанний фільтр шуму
        denoised_audio = signal.medfilt(audio_data, kernel_size=5)

        # Обчислення спектрограми мела
        mel_spec = librosa.feature.melspectrogram(y=denoised_audio,
sr=self.sample_rate)
        mel_spec_db = librosa.power_to_db(mel_spec, ref=np.max)

        # Візуалізація спектрограми мела
        plt.figure(figsize=(8, 4))
        librosa.display.specshow(mel_spec_db, sr=self.sample_rate, x_axis='time',
y_axis='mel')
        plt.colorbar(format='%+2.0f dB')
        plt.title('Mel Spectrogram')
        plt.tight_layout()

```

```
plt.savefig('mel_spectrogram.png')

# Нормалізація амплітуди
normalized_audio = audio_data / np.max(np.abs(audio_data))

return normalized_audio

def analyze_sound(self, audio_data):
    if self.model is None:
        messagebox.showerror("Помилка", "Модель не була навчена. Будь ласка, зберіть дані для навчання.")
        return "Невідомий"

    predicted_state = self.model.predict([audio_data])

    # Повернення результатів аналізу
    return predicted_state

def collect_audio_samples(self, num_samples):
    messagebox.showinfo("Збір даних", "Розпочато збір даних. Будь ласка, запишіть та вкажіть стан верстата.")
    data = []
    labels = []
    for i in range(num_samples):
        audio_data = self.record_audio(self.duration, self.sample_rate)
        label = simpledialog.askstring("Збір даних", "Введіть стан верстата (операція чи несправність): ")
        if label is not None:
            data.append(audio_data)
            labels.append(label)
            filename = os.path.join(self.data_directory, f"data_{i}.wav")
            librosa.output.write_wav(filename, audio_data, self.sample_rate)

    # Повернення зібраних даних
    return data, labels

def collect_audio_samples_from_files(self, num_files):
    messagebox.showinfo("Збір даних з файлів", "Розпочато збір даних з файлів.")
    data = []
    labels = []
    filenames = os.listdir(self.data_directory)
    filenames = [f for f in filenames if f.endswith(".wav")]
    selected_filenames = filenames[:num_files]
    for filename in selected_filenames:
        file_path = os.path.join(self.data_directory, filename)
        audio_data, _ = librosa.load(file_path, sr=self.sample_rate)
        label = simpledialog.askstring("Збір даних з файлів", "Введіть стан верстата (операція чи несправність): ")
        if label is not None:
            data.append(audio_data)
            labels.append(label)
```

```
# Повернення зібраних даних
return data, labels

def train_model(self, data, labels):
    # Розбиття даних на навчальну та тестувальну вибірки
    X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(data, labels,
test_size=0.2, random_state=42)

    # Ініціалізація та навчання моделі (використовуйте відповідний алгоритм
машинного навчання)
    self.model = RandomForestClassifier()
    self.model.fit(X_train, y_train)

    # Прогнозування на тестових даних та оцінка точності моделі
    y_pred = self.model.predict(X_test)
    accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
    messagebox.showinfo("Точність моделі", "Точність моделі:
{:.2f}%".format(accuracy * 100))

if __name__ == "__main__":
    app = Application()
    app.mainloop()
```

Таблиця Б-1. Типові проблеми при експлуатації фрезерувальних апаратів та способи їх вирішення [27]

Проблема	Причина	Рішення
Вібрація	Нежорстке закріплення	<p>Оцініть напрямок дії сил різання та забезпечте компенсацію їх впливу або покращіть жорсткість закріплення</p> <p>Зменшіть сили різання за рахунок збільшення глибини різання <math>a_p</math></p> <p>Виберіть фрезу з великим та нерівномірним кроком зубів для більш стабільної обробки</p> <p>Виберіть геометрію з малим кутом при вершині та вузькою зачистною фаскою</p> <p>Використовуйте пластину з дрібнозернистого сплаву без покриття або тонким покриттям.</p> <p>Уникайте обробки ділянок заготівлі без достатньої компенсації дії сил різання</p>
	Нежорстке закріплення заготівлі в осьовому напрямку	<p>Використовуйте фрезу для обробки прямокутних уступів (з головним кутом у плані 90 градусів) з позитивною геометрією</p> <p>Використовуйте пластину з геометрією L</p> <p>Зменшіть осьові сили різання за рахунок зменшення глибини різання та вибору пластин з меншими радіусом при вершині та зачистній фаски</p> <p>Виберіть фрезу з великим та нерівномірним кроком зубів</p> <p>Перевірте знос інструменту</p> <p>Перевірте биття утримувача інструменту</p> <p>Підвищіть жорсткість закріплення інструменту</p>
	Занадто великий виліт інструменту	<p>Зменшіть виліт до мінімально можливого</p> <p>Використовуйте фрезу з великим та нерівномірним кроком зубів</p> <p>Забезпечте баланс радіальних та осьових сил різання за рахунок головного кута в плані 45 градусів, великого радіусу при вершині та використання круглих пластин</p> <p>Збільште подачу на зуб</p> <p>Використовуйте геометрію для ненавантаженого різання</p> <p>Зменшіть осьову глибину різання <math>a_f</math></p> <p>Використовуйте зустрічне фрезерування під час чистової обробки</p>

		<p>Використовуйте фрези збільшеного розміру та адаптери Coromant Capto®</p> <p>При використанні цілісних твердосплавних кінцевих фрез та фрез зі змінними головками оберіть інструмент із меншою кількістю зубів та/або більшим кутом підйому гвинтової канавки.</p>
	Фрезерування прямокутних уступів з нежорстким шпинделем	<p>Виберіть фрезу мінімально можливого діаметру</p> <p>Виберіть фрезу та пластину з позитивною геометрією для ненавантаженого різання</p> <p>Спробуйте зустрічне фрезерування</p> <p>Перевірте відтискання шпинделя, щоб переконатися, що воно допустиме для даного верстата</p>
	Некоректне хвилинне подання	<p>Спробуйте зустрічне фрезерування</p> <p>На верстатах із ЧПУ: відрегулюйте гвинт механізму подачі</p> <p>На звичайних верстатах: відрегулюйте стопорний гвинт або замініть кулькову гвинтову пару</p>
	Режими різання	<p>Зменшіть швидкість різання <math>v_c</math></p> <p>Збільште подачу <math>f_z</math></p> <p>Змініть глибину різання <math>a_p</math></p>
	Низька стабільність	<p>Зменшіть виліт</p> <p>Підвищіть стабільність</p>
	Вібрація при обробці у кутах	Запрограмуйте великий радіус при вершині разом із зменшеною подачею
Пакетування стружки Звичайна проблема при фрезеруванні в повний паз – особливо при обробці матеріалів, що дають зливну стружку	Пошкодження вершин пластини Вифарбовування та пошкодження ріжучої кромки Повторне різання стружки	<p>Поліпшіть евакуацію стружки за рахунок рясного та орієнтованого підведення СОЖ або стисненого повітря</p> <p>Зменшіть подачу <math>f_z</math></p> <p>При великій глибині різання виконуйте обробку кількома проходами</p> <p>При нарізанні глибоких пазів спробуйте зустрічне фрезерування</p> <p>Використовуйте фрези з великим кроком зубів</p> <p>Використовуйте цільні твердосплавні кінцеві фрези або фрези зі змінними головками з двома або максимум трьома різальними кромками та/або великим кутом підйому гвинтової канавки</p>
Повторне різання стружки	Уламки ріжучої кромки	

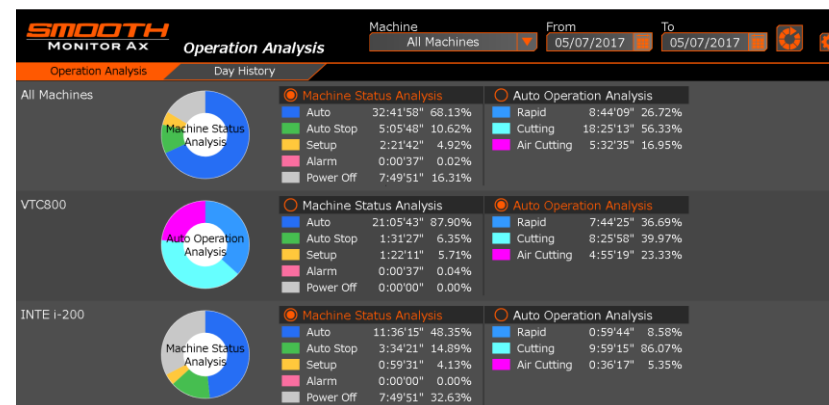
<p>Характерно для фрезерування в повний паз та обробки кишень – особливо при обробці титану. Також є звичайною проблемою при фрезеруванні глибоких отворів та кишень на вертикальних верстатах.</p>	<p>Негативний вплив на стійкість інструменту та безпеку процесу</p> <p>Пакування стружки</p>	
<p>Незадовільна якість поверхні</p>	<p>Занадто висока подача на оборот</p> <p>Вібрація</p>	<p>Забезпечте ефективну евакуацію стружки за допомогою великої кількості СОЖ або стиснутого повітря, краще з внутрішнім підведенням</p> <p>Змініть положення фрези та стратегію обробки</p> <p>Зменшіть подачу <math>f_z</math></p> <p>При великій глибині різання виконуйте обробку кількома проходами</p>
	<p>Наростоутворення на ріжучій кромці</p>	<p>Налаштуйте положення фрези в осьовій площині або виберіть інші пластини. Перевірте висоту за допомогою індикатора</p> <p>Перевірте биття шпинделя та посадкові поверхні фрези</p> <p>Зменшіть подачу на оборот до 70% від ширини фаски</p> <p>По можливості використовуйте пластини Wiper (для операцій чистової обробки)</p>
	<p>Різання на зворотному ходу</p>	<p>Перевірте люфт шпинделя (допустиме значення 0,10 мм/1000 мм)</p> <p>Під час чистової обробки осьове биття шпинделя (TIR) не повинно перевищувати 7 мкм.</p> <p>Зменшіть радіальні сили різання за рахунок зменшення глибини різання <math>a_p</math></p> <p>Виберіть фрезу меншого діаметра</p> <p>Перевірте положення зачисних фасок та пластини Wiper (не повинні спиратися на одну точку)</p> <p>Переконайтеся у відсутності биття фрези щодо</p>

		посадкових поверхонь
	Вифарбовування на заготівлі	<p>Зменшіть подачу <math>f_z</math></p> <p>Виберіть фрезу з нормальним або дрібним кроком зубів</p> <p>Змініть положення фрези для більш тонкої стружки на виході</p> <p>Виберіть фрезу з більш відповідним головним кутом у плані (45 градусів) та геометрію для менш навантаженого різання</p> <p>Виберіть пластину з гострими краями</p> <p>Контролюйте знос по задній поверхні для запобігання надмірному зносу</p>
Освіта задинок	<p>На конкретних матеріалах: нержавіюча сталь/жароміцні сплави</p> <p>Основний механізм утворення проточин</p>	<p>Використовуйте пластину з великим радіусом при вершині для зменшення кута в плані</p> <p>Підтримуйте глибину різання менше радіусу при вершині</p> <p><math>a_p = 0,5 \times \text{радіус}</math></p>
<p>Потужність верстата</p> <p>Слідкуйте за кривою потужності: при надто низькій частоті обертання шпинделя ефективність обробки знижується</p>	<p>Вимоги до потужності верстата фрезерування можуть відрізнятися залежно від наступних параметрів:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Об'єм матеріалу, що знімається</li> <li>• Середня товщина стружки</li> <li>• Геометрія фрези</li> <li>• Швидкість фрези</li> </ul>	<p>Замініть фрезу з дрібним кроком на фрезу з великим, тобто з меншою кількістю зубів</p> <p>Фреза з позитивною геометрією витрачає меншу потужність, ніж фреза з негативною геометрією</p> <p>Зменшіть спочатку швидкість різання, а потім, за потреби, подачу</p> <p>Використовуйте фрезу меншого розміру та збільште кількість проходів</p> <p>Зменшіть глибину різання <math>a_p</math></p>



Machine operation results over the past 24 hours. Production results of multiple machines over a designated time period.

Accumulated time in automatic operation. Graph showing accumulated production results compared to production target.



Tool Name	Tool Part	Nominal Diameter	Suffix	Tool Group No.	Time
FCE MILL		100	A		300:56:15"
GENERAL	OUT	3 .1	B		262:26:22"
GENERAL	OUT	3 .3	B		202:57:23"
END MILL		10	S		180:09:15"
GENERAL	IN	26 .4	B		152:20:45"
GENERAL	IN	26	R		131:42:16"
DRILL		12	A		110:42:10"
TAP	M 8		A		105:20:12"
END MILL		100	A		100:00:15"
FCE MILL		20	A		90:46:33"
				1000	70:32:15"
END MILL		100	A		50:00:32"

Machine	Class	Maintenance	Last History	2017/04/16 Sun	2017/04/17 Mon	2017/04/18 Tue	2017/04/19 Wed	2017/04/20 Thu	2017/04/21 Fri	2017/04/22 Sat
INTE I-200	Maintenance Check	Fill Lube-oil Tank	3 days ago							
INTE I-200	Daily	Daily Check	4 days ago							
		Grease Turn Headstock and Hyd. Chuck	Today							
		Check Hydraulic Unit Oil Level	Today							
		Check No Flaws on Window Glasses.	Today							
INTE I-200	Maintenance Check	Grease Chuck	6 days ago							
INTE I-200	Exhaustion	MILL SPINDLE ROT JOINT/CHK VALVE	7 days ago							
INTE I-200	Maintenance Check	Check Coolant Level	10 days ago							
INTE I-200	Maintenance Check	Clean/Replace Cooling System Filter	11 days ago							

Рисунок В-1. Моніторингова система Mazak [31]

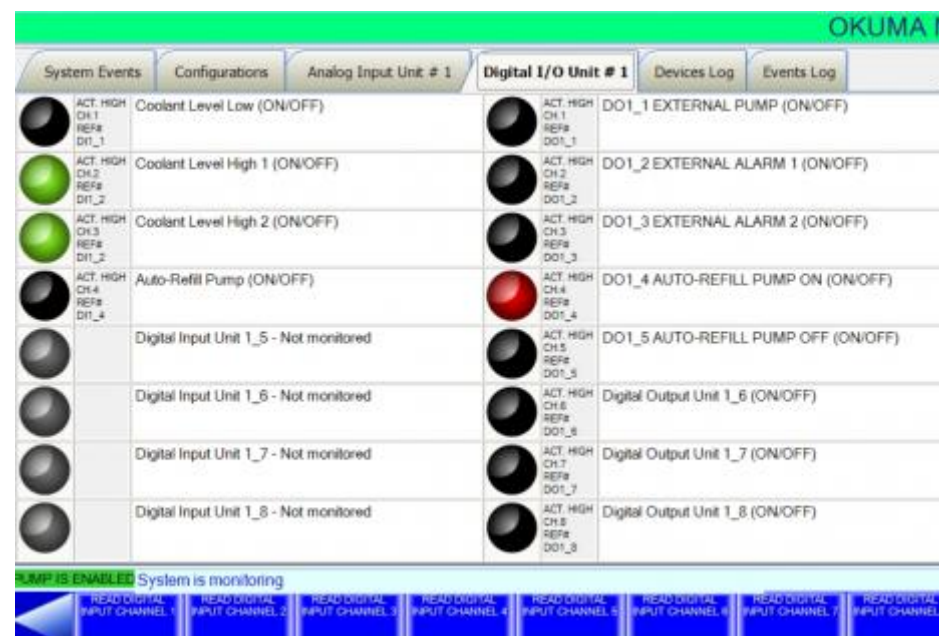
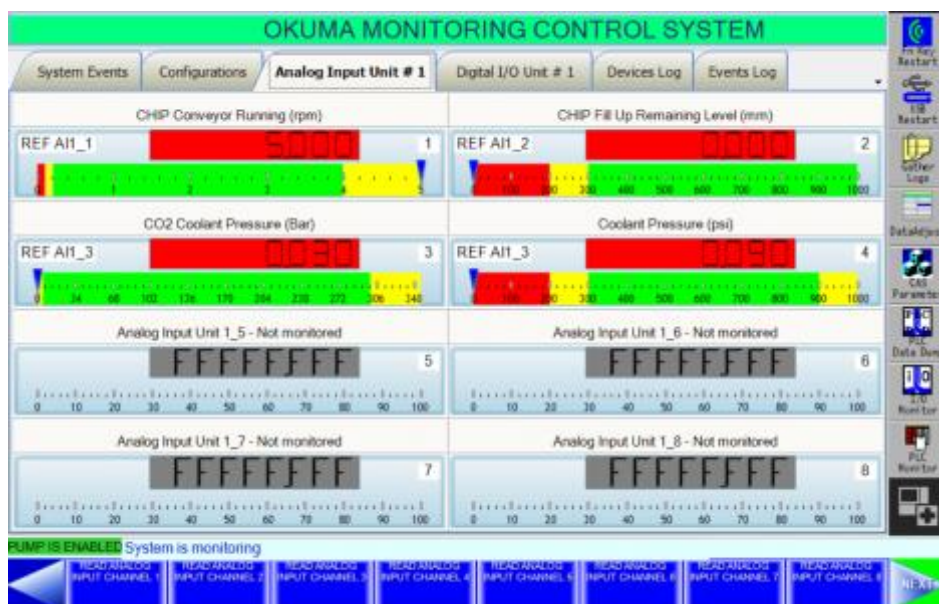
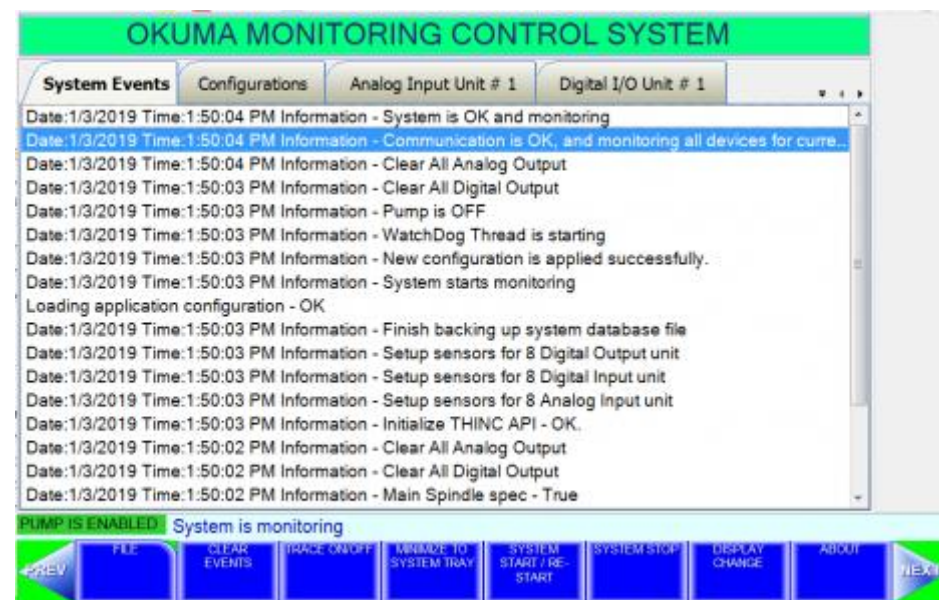
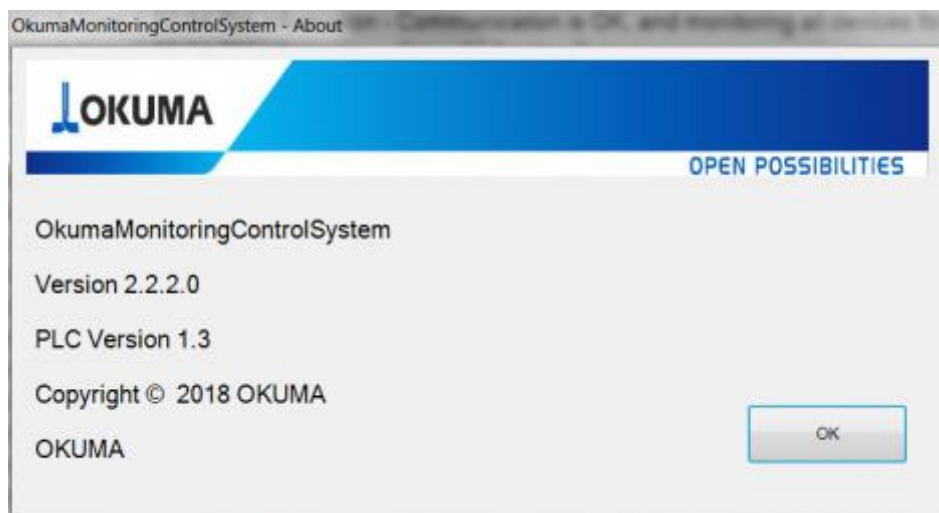


Рисунок В-1. Моніторингова система Okuma Monitoring and Control System [21]