

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ**

ДОНЧЕНКО ЄВГЕНІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 621.914.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
ДІАГНОСТИКИ ФРЕЗ**

Спеціальність

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис

Дисертація виконана в Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Сердюк Олександр Олександрович,
доцент кафедри «Автоматизація виробничих процесів» Донбаської державної машинобудівної академії, МОН України, м. Краматорськ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Луців Ігор Володимирович,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин.

кандидат технічних наук, доцент
Юрчишин Оксана Ярославівна,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри конструювання верстатів та машин.

Захист відбудеться 28 вересня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 у Донбаській державній машинобудівній академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, корп. 3, ауд. 3308.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, корп. 1 або за web-адресою:

<http://www.dgma.donetsk.ua/spetsializovana-vchena-rada-d12.105.02.html>

Автореферат розісланий «27» __08__ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



С. Л. Міранцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Практика показала, що промисловість України потребує поглиблення наукових досліджень, спрямованих на створення систем контролю рівня вібрацій та стану інструменту у технологічній системі при торцевому фрезеруванні, придатних не тільки для новітнього обладнання, але й модернізації вже наявного.

Можливість інтенсифікації режимів різання при фрезеруванні обмежується в більшості випадків втратою динамічної стабільності технологічної системи й загальним зниженням надійності різального інструменту. Це пов'язано з виникненням автоколивань великої амплітуди, що обмежують продуктивність, різко знижують стійкість інструмента, термін служби обладнання, точність і якість оброблених поверхонь, а також призводять до аварійних ситуацій внаслідок руйнації елементів технологічної системи

Для підвищення ефективності торцевого фрезерування необхідно розробити комплексну систему оцінок якості процесу торцевого фрезерування, програмно-апаратний модуль оцінки рівня вібрацій і діагностики руйнування різального інструменту шляхом моделювання поведінки динамічної системи верстата. Тому тема дисертації актуальна і являє собою важливу науково-технічну задачу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних тем Донбаської державної машинобудівної академії Д-04-99 «Дослідження й розробка методів ідентифікації параметрів технічного стану об'єктів автоматизації» (№ державної реєстрації 0199U001563), Д-01-02 «Дослідження й розробка засобів адаптивного керування об'єктами машинобудування й металургії» (№ 0103U004445) і Д-03-05 «Удосконалення методів і засобів керування в наукомістких технологічних системах машинобудування» (№ 0105U007247); Д-06-07 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (№0107U001306); Дк-08-04 «Удосконалювання технологічного середовища для автоматизованого виробництва продукції важкого машинобудування» (№0105U002445); Д-06-2007 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (№0107U001306); Д-05-2009 «Розробка інформаційних технологій для систем адаптивного управління процесом механічної обробки деталей на важких верстатах» (№0109U002669); Дк-06-2011 «Підвищення ефективності автоматизації технологічних процесів металургії та машинобудування» (№0111U007640); Дк-03-2016 «Удосконалення енергозберігаючих методів та засобів автоматизації технологічних систем машинобудування та металургії» (№0116U005582); Дк-07-2019 «Підвищення ефективності виробничих процесів машинобудування та металургії шляхом впровадження автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій» (№0119U103179).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу фрезерування шляхом розробки автоматизованої системи діагностування стану інструменту і підвищення надійності збірних фрез при попередньому фрезеруванні.

Основні задачі дослідження:

1. Провести аналіз впливу умов фрезерування на стан різального інструменту та його надійності.

2. Розробити комплексну систему оцінок якості процесу торцевого фрезерування.

3. Розробити математичну модель для визначення зв'язку між параметрами вібрацій при торцевому фрезеруванні та станом різальних пластин.

4. Розробити автоматизовану систему діагностики стану різального інструменту та прогнозування його стану шляхом контролю вібрацій технологічної системи.

5. Розробити математичні моделі прогнозування надійності збірного інструмента та рекомендації з підвищення ефективності торцевого фрезерування.

Об'єкт дослідження – процес попереднього фрезерування торцевими фрезами.

Предмет дослідження – математичний опис і алгоритми діагностики стану інструмента при торцевому фрезеруванні.

Методи дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження, розробка практичних рекомендацій проводилися на основі використання положень теорії різання металів, опору матеріалів, теорії пружності, теорії коливань, математичного моделювання, засобів математичного і комп'ютерного моделювання на ЕОМ.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням сучасної вимірювальної апаратури як в лабораторних умовах, так і на виробництві. Обробка результатів експериментів виконувалась з використанням теорії імовірності і математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблена комплексна система оцінок якості процесу торцевого фрезерування як сукупність вібраційних сигналів, представлених у тривимірній системі координат у прив'язкою до кута повертання фрези.

2. Вперше розроблено математичну модель системи розпізнання образів, яка дає змогу прогнозувати стан різального інструменту при попередньому торцевому фрезеруванні на базі експериментальних даних.

3. Вдосконалено математичну модель процесу фрезерування для визначення зв'язку між амплітудно-частотними характеристиками вібрацій при торцевому фрезеруванні та станом різальних пластин, що дозволило уточнити вплив руйнування різальної пластини на рівень амплітуд вібрацій при попередньому фрезеруванні.

4. Вперше розроблені математичні моделі, які дають змогу визначати імовірність безвідмовної роботи торцевої фрези з довільною кількістю пластин з метою прогнозування рівня надійності фрези при відмові кожного її зуба, а також визначення стратегії її заміни.

Практичне значення одержаних результатів:

1. На базі комплексної системи оцінок якості процесу торцевого фрезерування розроблена інженерна методика діагностики процесу попереднього торцевого фрезерування, яка дозволяє в режимі реального часу оцінити стан різального інструменту в процесі обробки за критерієм відмови інструмента.

2. Розроблена система діагностики попереднього торцевого фрезерування, що дозволяє визначати відмову інструмента, на основі моделювання амплітудно-частотних параметрів вібрацій.

3. Розроблений і впроваджений програмно-апаратний комплекс діагностики різального інструменту для вертикально-фрезерних верстатів VM127M на Дружківському машинобудівному заводі. У результаті впровадження програмно-апаратного комплексу досягнуте підвищення продуктивності до 15 відсотків та скорочення витрати твердосплавного матеріалу до 20 відсотків. Фактичний економічний ефект від впровадження результатів роботи становить 38 670 грн (на період).

4. Розроблений і впроваджений на ТОВ «Промислово-торгівельна компанія Інтріс трейд» програмно-апаратний комплекс діагностики малозубих фрез «Мрія-Міні», що відрізняється модульною конструкцією й можливістю адаптації до застосування на різних типах фрезерних верстатів. Очікується річний економічний ефект від впровадження результатів роботи у розмірі 67943 грн.

5. На науково-виробничому колективному підприємстві «Інтріс» розроблено і впроваджено оптичний датчик для вимірювання вібрацій з робочим діапазоном вимірювальних частот до 500Гц та чутливістю 1мкм. Очікується річний економічний ефект від впровадження датчика у розмірі 15000 грн.

6. Розроблена методика визначення періоду регламентованої заміни фрези для забезпечення раціонального рівня її надійності.

Особистий внесок здобувача.

Постановку задач дослідження та вибір наукових підходів для їх вирішення було виконано спільно з науковим керівником. Підготовку, проведення та обробку результатів теоретичних і експериментальних досліджень, формулювання загальних висновків, розробку системи діагностики процесу фрезерування виконано автором особисто.

У наукових працях, які виконано у співавторстві, дисертантові належить наступне: [1] – виконано збір статистичних матеріалів і розрахунки показників якості; [2] – виконано аналіз методів математичної обробки результатів експериментів; [3] – розроблено математичну модель, основу на пошуку невизначеної інформації, досліджено спосіб пошуку

невизначеної інформації методом усереднення, досліджено розпізнавання і пошук невизначеної інформації на основі лінійної моделі; [4] – розроблено математичну модель та її реалізацію у середовищі Matlab, проведено моделювання; [5] – розроблено методіку проведення експерименту, виконано аналіз експериментальних даних; [6] – виконано розробку та практичну реалізацію вимірювального комплексу; [7] – виконано розробку та реалізацію інформаційно – вимірювального комплексу Мрія; [8] – виконано розробка та реалізація безконтактного датчика інформаційно – вимірювального комплексу; [9] – розроблено та реалізовано елементи моделі процесу фрезерування; [10] – уточнено умови використання явища «різання по сліду» у математичних моделях, реалізованих у середовищі Matlab; [14] – запропоновані новітні засоби побудови програмного забезпечення технологічного обладнання; [17] виконано розробку схем та друкованих плат систем індикації; [18] – виконано проектування та практична реалізація засобів людино-машинного інтерфейсу для промислових застосувань; [19] – запропоновано структуру та реалізовано інформаційно – вимірювальний комплекс.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи отримали позитивну оцінку на: Третій міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (3 червня 2005 року, м. Краматорськ); Четвертій міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (5–8 червня 2006 року, м. Краматорськ); Шостій міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (2–5 червня 2008 року, м. Краматорськ). XV міжнародній науково-технічній конференції “Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку” (30 травня 2017 року, м. Краматорськ); Шостій міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект» , (27–29 листопада 2019 р, м. Харків); Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (21–24 грудня 2020 року, м. Краматорськ); Міжнародній науково-практичній конференції (21–23 вересня 2016 р., м. Запоріжжя); Міжнародній конференції Faculty of Education of the Constantine the Philosopher University in Nitra Drazovska cesta. (2016 р. Nitra, Slovakia).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 19 наукових публікаціях, з них: 9 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у періодичному виданні, включеного до міжнародної наукометричної бази, 8 – у матеріалах конференцій та 1 патент на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи становить: 222 сторінки тексту, 101 рисунок, 8 таблиць, список використаних джерел із 158 найменувань на 17 сторінках, 6 додатків на 19 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі надано загальну характеристику дисертаційної роботи: обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок з науковими програмами; сформульовано мету роботи та задачі дослідження; наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі дисертації було виконано аналіз стану й обґрунтування актуальності розглянутої проблеми, проаналізовані роботи відомих закордонних дослідників Кудінова В. А., Ельясберга М. Е., Жаркова І. Г. та інших.

Різними аспектами підвищення ефективності роботи верстатів та інструментів займалися вітчизняні вчені: Струтинський В. Б., Залога В. О., Грабченко А. І., Антонюк В. О., Луців І. В., Мельничук П. П., Ковальов В. Д., Клименко Г. П., Клименко С. А., Кузнецов Ю. М., Петраков Ю. В., Мироненко Є. В., Гузенко В. С., Васильченко Я. В., Майборода В. С., Воронцов Б. С., Ключко О. О., Равська Н. С., Родін П. Р., Хаєт Г. Л.

Аналіз результатів досліджень дозволив сформулювати наступні не вирішені питання:

-відомі принципи ідентифікації процесів торцевого фрезерування ефективні лише у достатньо вузькому діапазоні параметрів обробки;

-протікання процесу торцевого фрезерування залежить від безлічі факторів, при цьому дослідники розходяться в поглядах на ступінь їх впливу на характеристики динамічної системи процесу торцевого фрезерування;

-незважаючи на те, що більшість дослідників сходяться в значній ролі «фрезерування по сліду» на виникнення й розвиток вібраційних процесів при торцевому фрезерування, дотепер не було запропоновано достатньо повних математичних моделей, які б враховували цей важливий фактор при діагностиці стану процесу торцевого фрезерування.

На підставі теоретичних досліджень і проведеного аналізу сформульовані мета й завдання дослідження.

У другому розділі виконано експериментальний аналіз методики дослідження процесу фрезерування. Були апробовані безконтактні - акустичні, та оптичні датчики, контактні – вібропереміщення, віброприскорення, апробовано застосування тензометричної станції.

Шляхом аналізу систем вимірювання динамічних характеристик процесу торцевого фрезерування, виявлена структура комплексної системи оцінок якості процесу торцевого фрезерування як сукупність вібраційних сигналів, представлених у тривимірній системі координат у прив'язці до кута повертання фрези.

Відповідно до структури комплексної системи оцінок якості процесу торцевого фрезерування розроблено вібровимірювальний комплекс на базі АЦП LCARD E14-440, до якого під'єднано вимірювальний підсилювач з вхідним опором 1.5 ГОм та одиничним коефіцієнтом підсилення. Підсилювач оснащений пасивним фільтром нижніх частот (ФНЧ) другого

порядку із частотою зрізу 15 кГц. Для зниження перешкод і забезпечення автономності вимірювальної системи підсилювач живиться від акумуляторної батареї напругою 12 В.

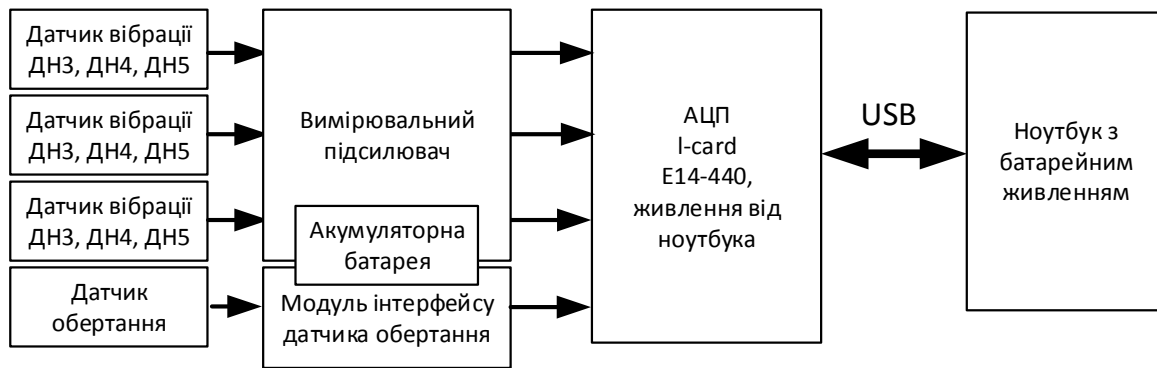


Рисунок 1 – Структурна схема вібровимірювального комплексу

Таким чином, було запропоновано прототип комплексної системи оцінки якості процесу торцевого фрезерування, який включає три канали п'єзоелектричних датчиків віброприскорення та датчик кута обертання шпинделя фрезерного верстата. За допомогою вібровимірювального комплексу було виконано низку експериментальних досліджень на фрезерних верстатах (рис. 2).

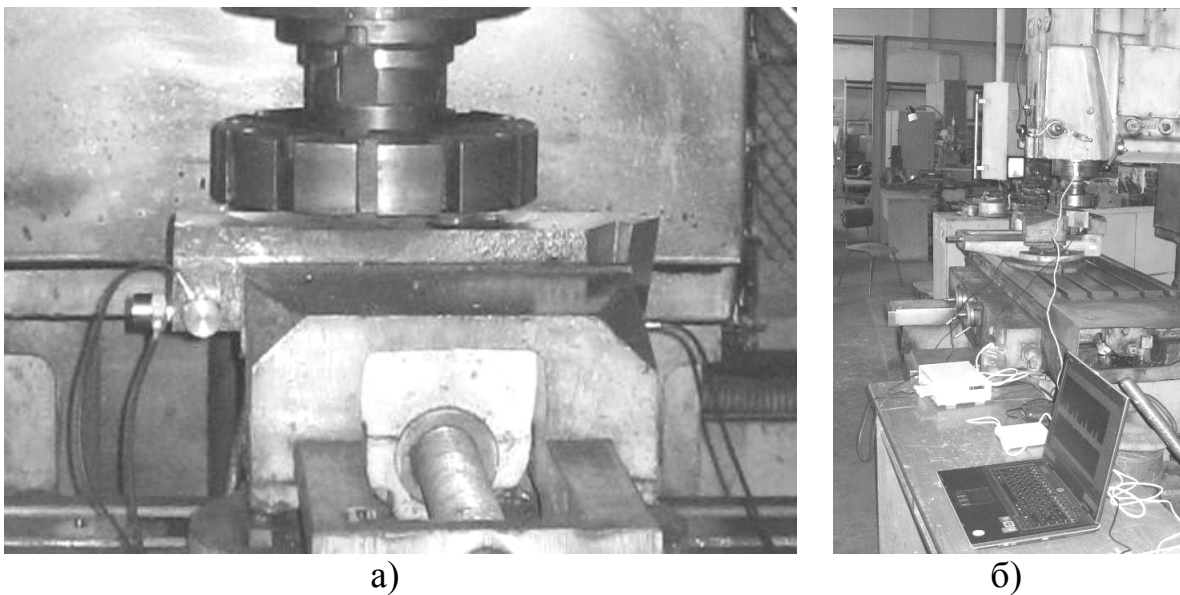
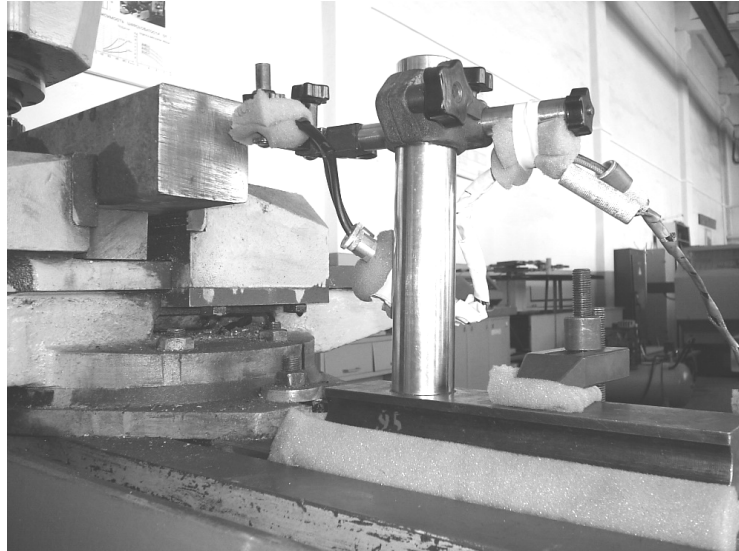


Рисунок 2 – Вимірювальний стенд на фрезерному верстаті ЛГ 26:
а) кріплення датчиків віброприскорення, б) загальний вид

Практика застосування п'єзоелектричних датчиків у експериментальних дослідженнях на фрезерних верстатах показала ряд недоліків: датчики не дозволяють реєструвати низькочастотну складову амплітуди коливань, а також дають значну похибку при реєстрації

вібропереміщень контрольованої поверхні, що ставить значні завади у дослідницькій діяльності.

Для покращення якості вимірювання динамічних характеристик процесу фрезерування використані оптичні датчики (на рис. 3 показано вимірювальний стенд на їх основі). Датчики мають смугу пропускання, яка сягає від нуля герц до десятків кілогерц, та лінійну передаточну характеристику у смугі робочих частот.



а)



б)

Рисунок 3 – Схема закріплення а) та підключення б) світловолоконного датчика мікропереміщень

По результатам експериментальних досліджень за допомогою оптичних датчиків мікропереміщень були визначені амплітудно-частотні характеристики процесу торцевого фрезерування при різних режимах обробки та стану інструменту, що в подальшому стало основою для

налаштування параметрів математичної моделі процесу торцевого фрезерування. Так, були отримані графіки залежності частотних діаграм від подачі (рис. 4, а) та глибини (рис. 4, б) фрезерування. Аналіз показав, що зв'язок частоти гармонік з величиною подачі й глибиною фрезерування практично відсутній, змінюється лише амплітуда.

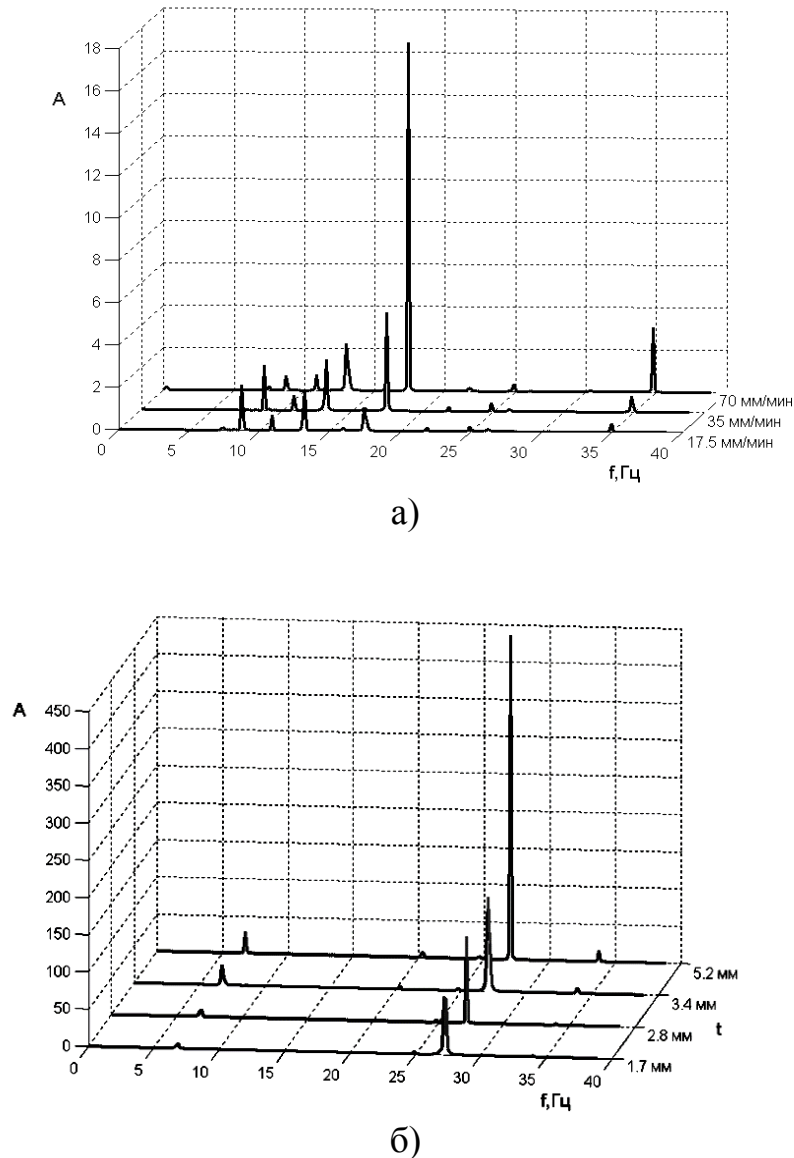
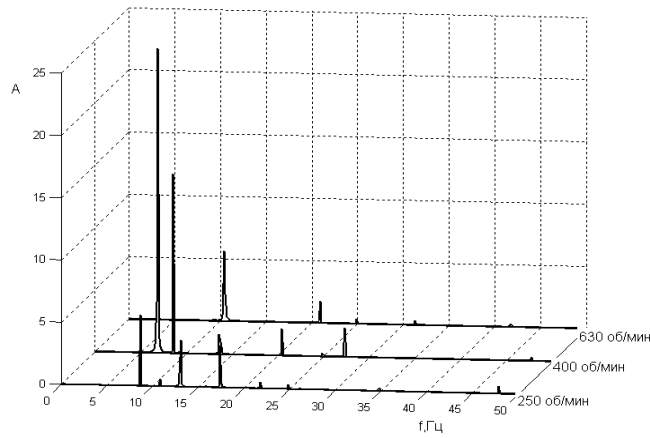
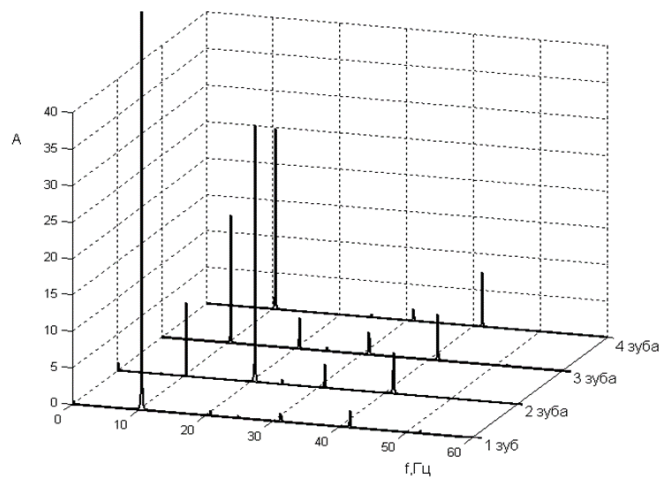


Рисунок 4 – Графіки залежності частотних діаграм від подачі а) та глибини б) фрезерування

Були проведені дослідження частотних діаграм при зміні частоти обертання фрези (рис. 5, а), виявлена залежність частотних діаграм від частоти обертання фрези, що демонструє наявність складових коливань обумовлених динамікою несучої системи, завдяки чому стало можливим експериментально визначити динамічні параметри несучої системи верстата.



а)



б)

Рисунок 5 – Графіки залежності частотних діаграм від частоти обертання фрези для $Z=4$ а) та при зміні кількості зубів б)

Аналіз експериментальних даних при зміні кількості зубів (рис. 5, б), який виникає, наприклад, в наслідок руйнування, показав значний вплив явища руйнування на характер розподілу амплітуд гармонік, що було визнано важливим критерієм для оцінки стану зубів фрези в процесі різання.

Для узагальнення отриманих експериментальних даних пропонується математична модель розпізнавання на основі інтерполяції наявних даних.

З метою визначення стану різального інструменту при попередньому торцевому фрезеруванні розроблено математичну модель системи розпізнавання образів, яка дає змогу на базі експериментальних даних отримати нормалізовану матрицю параметрів обробки $\{P\}$ з визначеною достовірністю $\{D\}$, необхідну для формування впливів на процес фрезерування.

Для обчислення ступеню руйнування пластини фрези запропонована формула

$$P_{xy} = \frac{\sum_i^K (O_{xiy} \cdot L_i)}{\sum_i^K L_i},$$

де L_i – урахує ступінь впливу i -го параметра (наприклад, сили різання) на параметр з індексом x , тобто на ступені викришування пластини x (у найпростішому випадку $L_i=0$ якщо впливу немає й $L_i=1$, якщо вплив є).

O_{xiy} – наближення значення P_{xy} , обчислене на основі зв'язку параметрів відповідних i - ой і x - ой рядкам матриці $\{P\}$.

При пошуку невідомого значення за методом усереднення з'являються серйозні завади, особливо на важких верстатах, де часом кожна деталь унікальна і тому відсутня можливість спиратися на отримані раніш емпіричні дані. Математична модель діагностики різального інструменту для таких умов повинна не тільки інтерполювати, а найчастіше екстраполювати наявні експериментальні дані. В розробленій моделі прийнята залежність значення невідомого параметра від положення відносно прямої, що проходить через довільно взяту пару точок 1-2 (рис. 6).

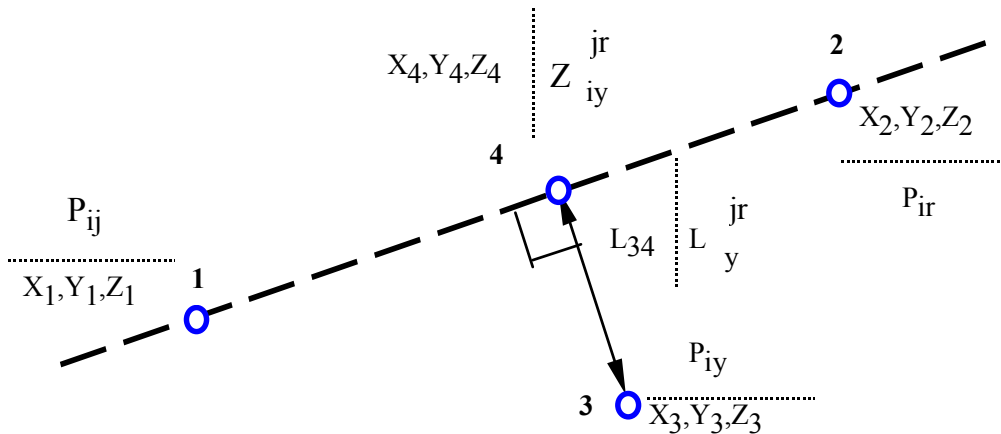


Рисунок 6 – Лінійна модель пошуку діагностичної інформації

Для обчислення в системі діагностики невизначеного параметра P_{xy} запропонована формула

$$P_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} \left(\sum_{r=j}^N (P_{xy}^{jr} \cdot E_y^{jr}) \right)}{\sum_{j=1}^{N-1} \left(\sum_{r=j}^N (E_y^{jr}) \right)},$$

де E_y^{jr} ступінь впливу прямої, що проходить через пару точок j -г на невідому точку y (рис. 6):

$$E_y^{jr} = 1 - \left(L_y^{\max} - L_y^{\max} \right) / L_y^{jr},$$

В просторі параметрів $\{P\}$ відстань L_y^{jr} від точки у до прямої, що проходить крізь точки j-r:

$$L_y^{jr} = \sqrt{\sum_{i=1}^K \left(L_{jr} \left(Z_{iy}^j \cdot P_{iy} \right)^2 \right)} / \sum_{i=1}^K L_{jr}.$$

Координати точки Z_{iy}^{jr} :

$$Z_{iy}^{jr} = t_{jr}^{j,r} (P_{ir} - P_{ij}) + P_{ij}$$

знайдено через коефіцієнт пропорційності:

$$t_{jr} = \frac{\sum_{i=1}^K \left(L_{jr} \cdot (P_{ir} - P_{ij}) \cdot (P_{iy} - P_{ij}) \right)}{\sum_{i=1}^K \left(L_{jr} \cdot (P_{ir} - P_{ij})^2 \right)},$$

де $i \in [1..K]$ – номер координати точки, $j \in [1..N]$ – номер першої точки прямої, $r \in [j..N]$ – номер другої точки прямої, $y \in [1..N]$ – номер невідомої точки.

У третьому розділі узагальнений досвід дослідників, що займаються проблемою вивчення динаміки процесів торцевого фрезерування. Запропоновані ними приватні математичні моделі процесу фрезерування були об'єднані в узагальнену математичну модель із розширеним діапазоном припустимих режимів фрезерування, показану на рисунку 5.

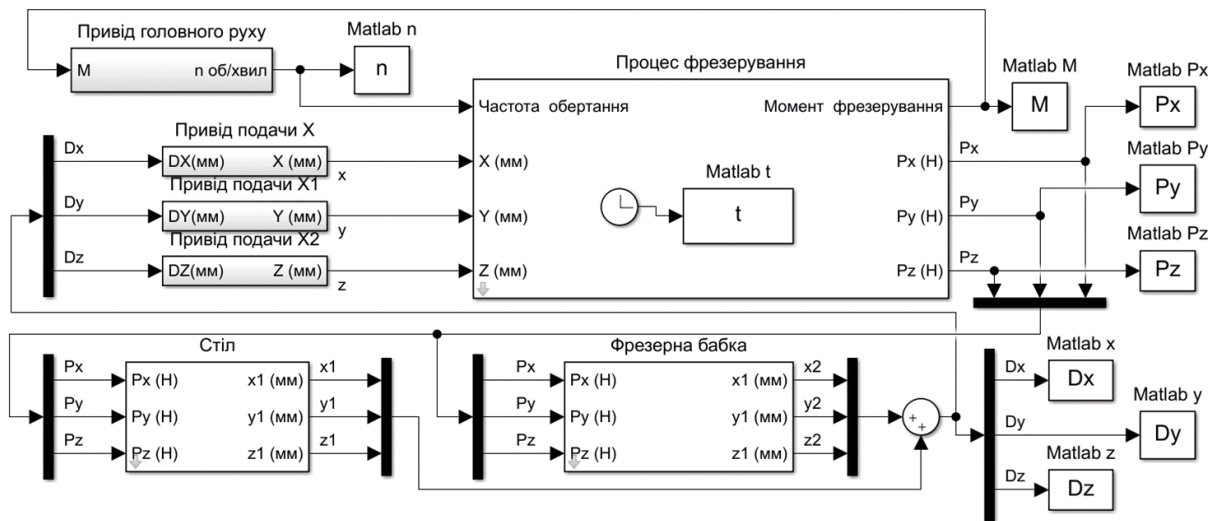


Рисунок 5 – Структура математичної моделі верстатної системи в процесі фрезерування

Особливістю моделі є облік явища «різання по сліду», яке описується сукупністю траєкторій руху зубів фрези щодо оброблюваної деталі. Таким чином, у кожний наступний момент часу виконується розрахунки перетину матеріалу, що видаляється, і, як наслідок, сил, що впливають на зуб при різанні.

Розробка динамічної моделі несучої системи фрезерного верстата була виконана на основі спрощеного уявлення столу та фрезерної бабки як пружної одномасової системи. На рисунку 6 показано приклад однієї ланки.

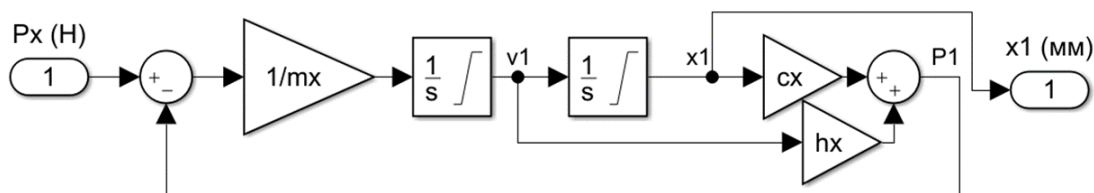


Рисунок 6 – Структурна схема моделі ланки несучої системи фрезерного верстату по координаті X

Завдяки такому уявленню стало можливим виконати налаштування параметрів моделі несучої системи спираючись на дані експериментальних досліджень: параметри самостійних коливань кожної ланки були окремо налагоджені по виміряній резонансній частоті та відомій масі ланки.

Для визначення силових навантажень на зуби фрези була розроблена математична модель силової частини процесу торцевого фрезерування, при цьому для визначенням сили різання були застосовані різні підходи, в тому числі по способу Ю. А. Розенберга (рис. 7).

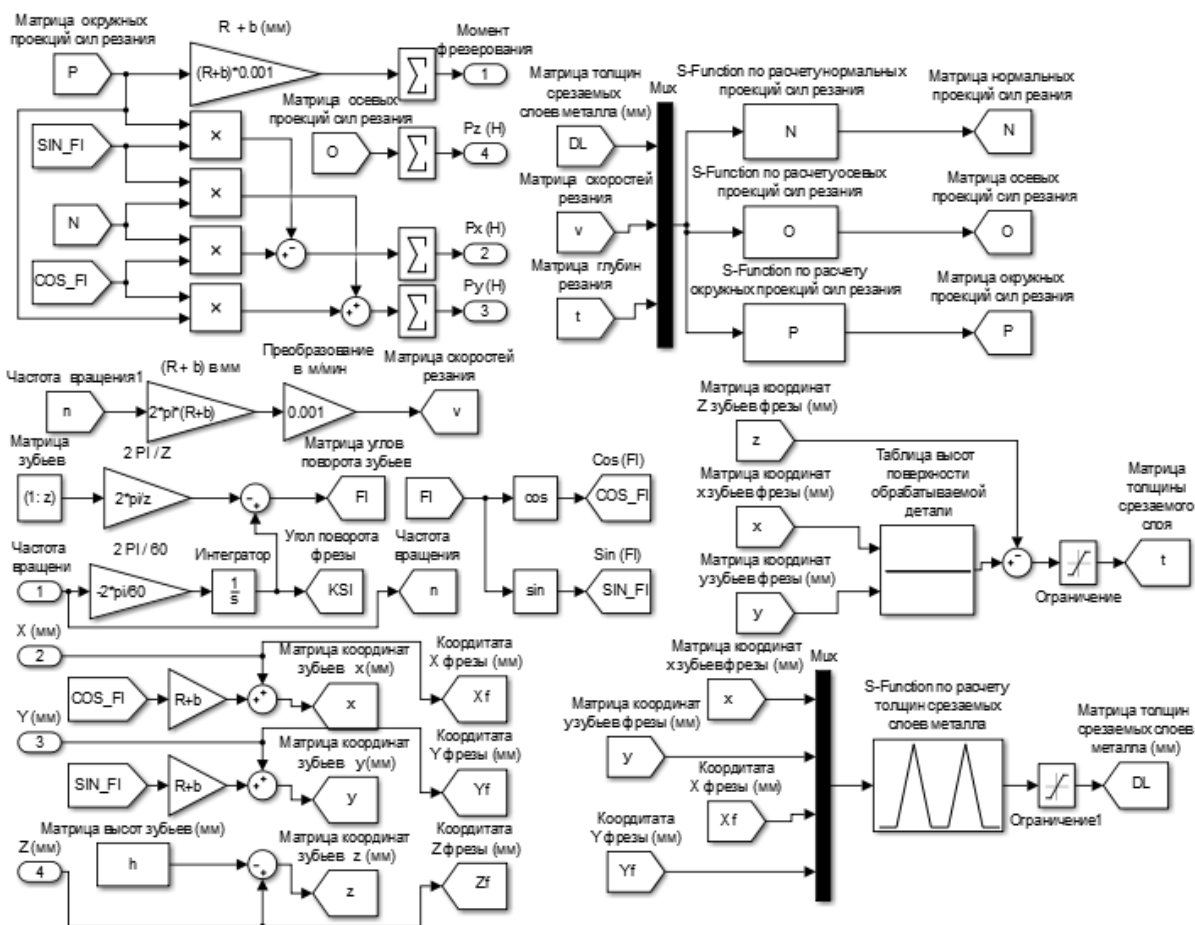
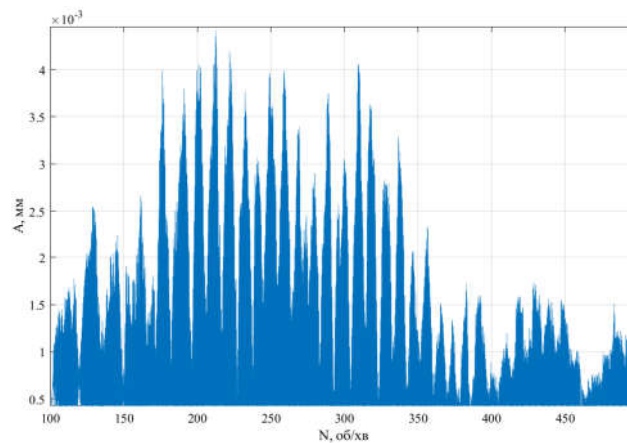


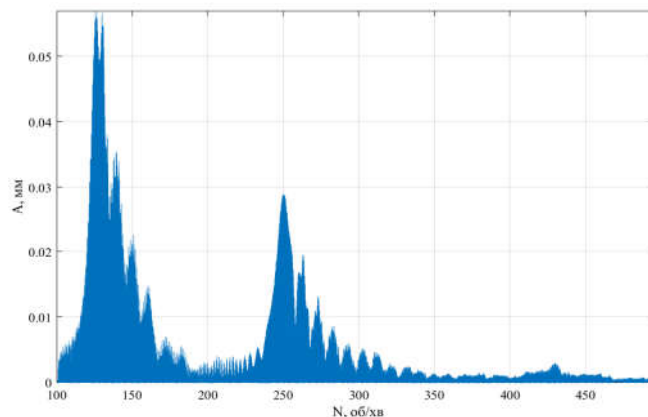
Рисунок 7 – Структурна схема моделі фрезерування торцевими фрезами

З метою перевірки адекватності побудованої моделі проведено імітаційне моделювання процесу торцевого фрезерування з параметрами обробки, як при експериментальних дослідженнях. Перевірка показала достатню адекватність моделі.

Для перевірки впливу явища регенерації було проведено моделювання при змінній частоті обертання фрези та різній кількості пластин, що відповідає їх виходу з ладу. Встановлено (рис. 8), що амплітуда коливань у технологічній системі значно змінюється навіть при поломці одного зуба (що обумовлено обмеженою кількістю зубів при попередньому фрезеруванні). При цьому можна відмітити появу зон швидкостей обертання, на яких амплітуда коливань змінюється майже на порядок. Здається доцільним проводити попереднє моделювання при розробці технологічного процесу, маючи на увазі недопущення роботи в зоні великих коливань у разі поломки окремих пластин фрези при малозубому фрезеруванні. При цьому завдяки моделі досягнута можливість визначити бажані частоти обертання фрези, при котрих збільшення амплітуди коливань не виникає.



а)



б)

Рисунок 8 – Графіки залежності амплітуди вібрацій від частоти обертання при $Z=4$ а) та при поломці одного зуба б)

У четвертому розділі розроблена та реалізована система візуального моніторингу стану різальних пластин фрези на базі низки мікроконтролерів (на рис. 9 показано структурну схему системи діагностики).

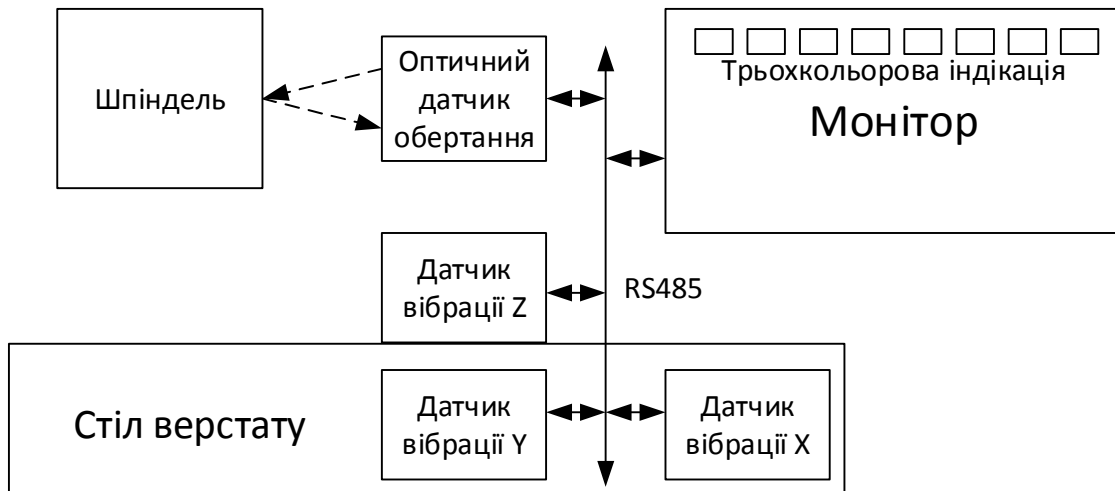
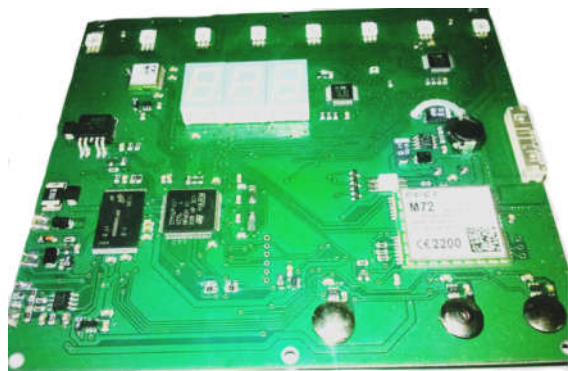


Рисунок 9 – Структурна схема системи діагностики

За допомогою світлодіодних індикаторів на екрані монітора (рис. 10) стан пластини визначається кольором: зеленим при повній працездатності, синім, при частковому зносі, та червоним, при неприпустимому зносі. При руйнуванні пластини мигає відповідний червоний світлодіод, а при аварійному режимі роботи система подає звуковий сигнал.



Плата монітору

Загальний вигляд монітору



Рисунок 10 – Зовнішній вид монітора системи діагностики

Розроблено та реалізовано модуль оптичного датчика, якій дозволяє виконувати неінвазійні вимірювання коливань для системи візуального моніторингу (рис. 11).

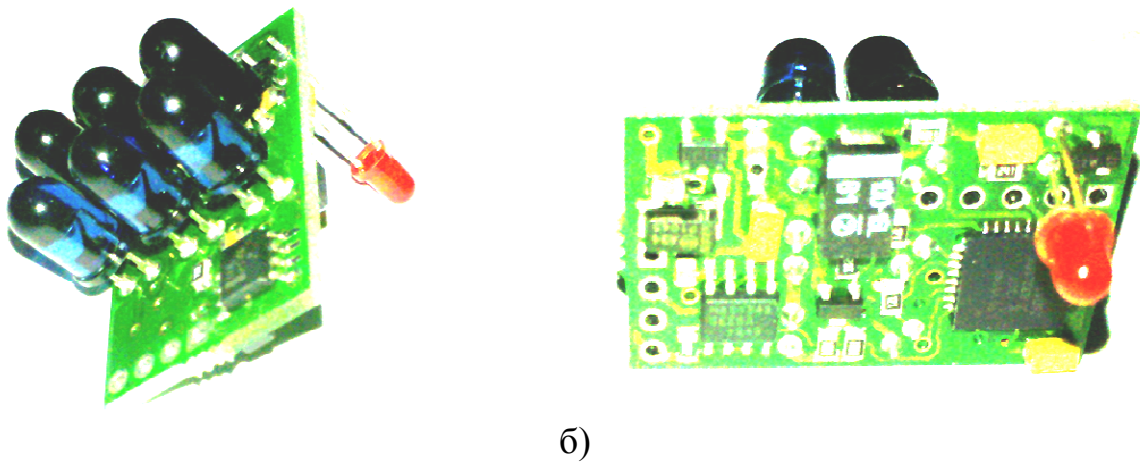
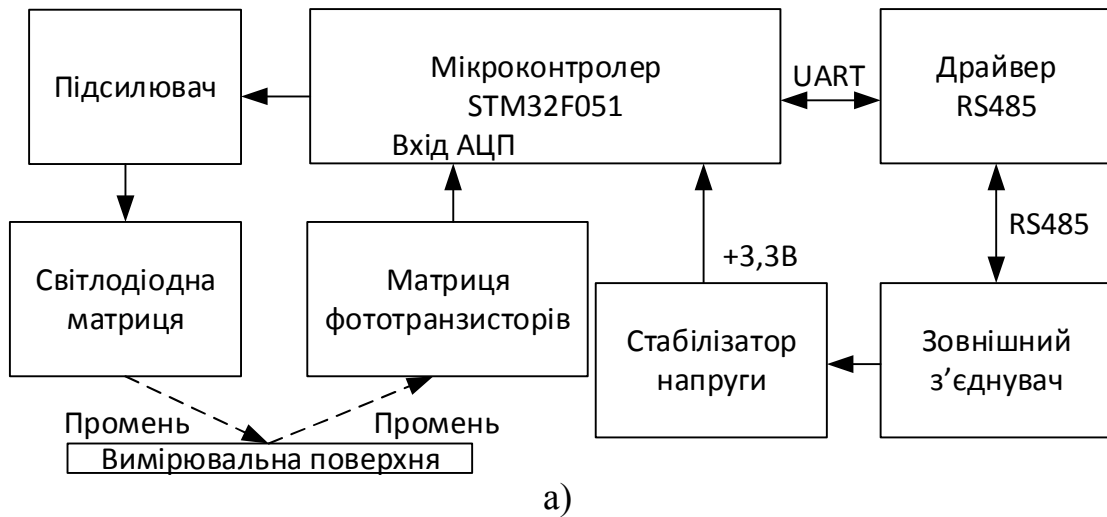


Рисунок 11 – Структурна схема а) та зовнішній вигляд б) оптичного датчика вібрацій на основі мікроконтролера

Програмне забезпечення системи контролю створене за допомогою спеціально розробленого програмного комплексу із застосуванням концепції автоматного програмування, у рамках якої програма керування реалізується як система формальних автоматів, описаних методом графів. Стани програми локалізуються усередині вершин, а переходи між станами перебувають на орієнтованих ребрах. Завдяки використанню методу графів, пропонується проектувати програму керування у графічному виді за допомогою графічного середовища Microsoft Visio, як показано на рисунку 12. Це значно полегшує як саму розробку, так і подальшу модернізацію програми. Немаловажним є те, що розроблена за допомогою методу графів програма є у значній мірі самодокументована, що зменшує зусилля розробника при подальшому написанні технічної документації на програмний код та підвищує надійність розробленої системи діагностики або керування верстатом.

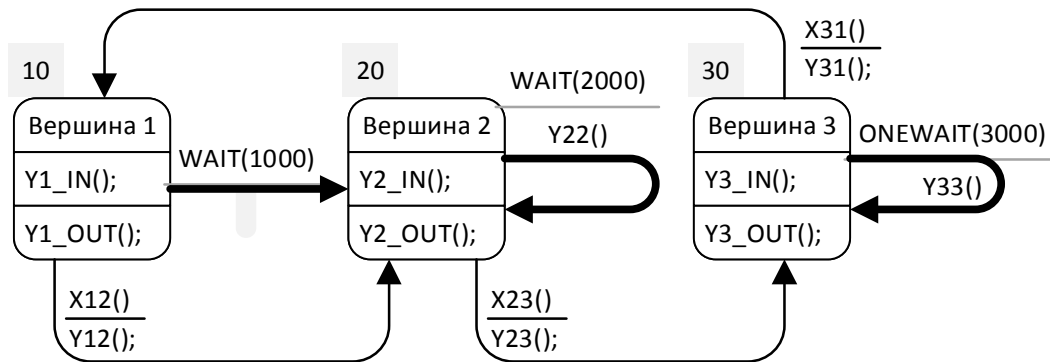


Рисунок 12 – Приклад реалізації простої програми керування

Можливості мікроконтролера STM32F437, застосованого у моніторі системи діагностики, дозволили застосувати нейронну мережу на базі пакета X-CUBE-AI, що розширює функціональні можливості середовища STM32Cube, яке європейська фірма STMicroelectronics вільно надає усім користувачам своїх мікроконтролерів.

Для реалізації навчання моделі нейронної мережі було використано Keras - відкриту нейромережеву бібліотеку, написану мовою Python. Результати підстановки зображень тестового набору з першого й другого набору сигналів у модель нейронної мережі дали показники ідентифікації 93 % і 85 % відповідно для даних навчання та тестових даних.

У п'ятому розділі виконано дослідження зносостійкості й надійності збірних фрез. Були проведені виробничі й лабораторні випробування торцевих фрез, оснащених різними твердими сплавами в умовах ПАТ Дружківський машзавод. Аналіз статистичних даних про роботу 16 фрез збірної конструкції в умовах ПАТ Дружківський машзавод показав, що при відмові одного із зубів фрези інструмент ніколи не знімається з верстата, а найчастіше (92 % випадків обробки) фреза знімається з верстата при виході з ладу всіх 4х зубів. Така експлуатація фрез приводить до підвищеної витрати інструментальних матеріалів.

При аналізі збірної фрези як системи ріжучих елементів, у якій відмова одного з них не приводить до повної відмови фрези, з погляду надійності фреза являє собою паралельну систему з пасивним резервом. У цьому випадку, при відмові першої ріжучої пластини її навантаження при різанні сприймає наступна за нею ріжуча пластинка. При цьому надійність фрези в цілому знижується, тобто зменшується ймовірність безвідмовної роботи.

В дослідженні було поширено можливості розрахунку надійності торцевих фрез при роботі з довільним числом ріжучих пластин. Враховуючи, що ймовірність $P_i(t)$ безвідмовної роботи зуба і протягом часу t для кожної зуба з однієї партії однакова, виведена формула ймовірності безвідмовної роботи фрези:

$$P_{\text{фр}} = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} C P^k (-1)^{k+1},$$

де ${}^nC_p = \frac{n!}{p!(n-p)!}$ – біноміальний коефіцієнт

n – кількість зубів; p – кількість можливих комбінацій, $1..n$.

Також виведена формула по розрахунку часу безвідмовної роботи:

$$T_{ст} = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^n {}^nC_k \frac{(-1)^{k+1}}{k}$$

де λ – інтенсивність відмови пластин фрези.

Розроблена методика визначення стратегії заміни інструменту для забезпечення заданого рівня його надійності. Визначена стратегія регламентованої заміни фрези для забезпечення раціонального рівня надійності, наприклад для фрези $Z=4$, заміна виконується при відмові двох зубів. Рекомендовані міри по підвищенню надійності торцевих фрез при попередньому фрезеруванні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації представлено вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності фрезерування на основі розробки та дослідження автоматизованої системи діагностики фрез. А саме:

1. Виконано аналіз впливу умов фрезерування торцевими фрезами на стан різального інструменту та його надійності, в результаті чого встановлено що діагностування потрібно проводити за допомогою аналізу вібраційних сигналів.

2. Розроблена методика дослідження динаміки процесу торцевого фрезерування за допомогою п'єзоелектричних та оптичних датчиків вібрації. Запропоновано комплексну систему оцінки якості процесу торцевого фрезерування як сукупність вібраційних сигналів, представлених у тривимірній системі координат з прив'язкою до кута повертання фрези. Створено прототип комплексної система оцінки якості процесу торцевого фрезерування, якій включає три канали п'єзоелектричних датчиків віброприскорення та датчик куту обертання шпинделя фрезерного верстата.

3. Вперше розроблено математичну модель системи розпізнання образів, яка дає змогу прогнозувати стан різального інструменту при попередньому торцевому фрезеруванні на базі експериментальних даних.

4. Розроблено математичну модель процесу фрезерування для визначення зв'язку між параметрами вібрацій при торцевому фрезеруванні та станом різальних пластин, що дозволило уточнити вплив руйнування різальної пластини на рівень амплітуд вібрацій при попередньому фрезеруванні. Для використання у автоматизованій системі діагностики фрез розроблено комплексну систему оцінки якості процесу торцевого фрезерування як сукупність вібраційних сигналів, представлених у тривимірній системі координат з прив'язкою до кута повертання фрези.

5. Розроблена та досліджена автоматизована система діагностики стану різального інструменту та прогнозування його стану шляхом контролю вібрацій технологічної системи, яка дозволяє підвищити

продуктивність на 15 відсотків та зменшити потребу у пластинах на 20 відсотків. Сконструйовані нові оптичні датчики вібрацій на основі мікроконтролерів, які застосовуються для первинної обробки вібраційного сигналу. При розробці датчиків та автоматизованої системи діагностики використано методи автоматного програмування, розроблено програмний комплекс для створення надійного програмного забезпечення, який знайшов застосування при розробці систем діагностики та керування верстатами. Розроблена програмна система визначення стану інструменту на основі нейронної мережі.

6. Розглядаючи торцеву фрезу як систему, надійність (імовірність безвідмовної роботи) якої є похідною від надійності її окремих зубів, та використовуючи методи теорії надійності, отримані математичні моделі для прогнозування надійності збірного інструмента при послідовному руйнуванні кожного зубу для торцевої фрези з обмеженою кількістю пластин. Вперше визначені математичні моделі прогнозування надійності збірного інструмента для торцевої фрези з довільною кількістю пластин.

7 Математичні моделі визначення надійності торцевої фрези були застосовані для прогнозування раціонального рівня надійності інструмента та надання рекомендацій з її регламентованої заміни. Визначена стратегія регламентованої заміни фрези для забезпечення раціонального рівня надійності, наприклад для фрези $Z=4$, заміна виконується при відмові двох зубів. Рекомендовані міри по підвищенню надійності торцевих фрез при попередньому фрезеруванні

8. Результати роботи знайшли практичне використання:

- при створенні технічних рішень та методики визначення періоду регламентованої заміни інструменту для забезпечення заданого рівня його надійності;

- на ПАТ Дружківський машинобудівний завод впроваджена система діагностики торцевих фрез при попередньому фрезеруванні, у результаті досягнуте підвищення продуктивності до 15 відсотків та скорочення витрати твердосплавного матеріалу до 20 відсотків. Фактичний річний економічний ефект від впровадження результатів роботи - 38 670 грн.

- на ТОВ «Промислово-торгівельна компанія Інтріс трейд» розроблено і впроваджено програмно-апаратний комплекс діагностики малозубих фрез «Мрія-Міні», що відрізняється модульною конструкцією й можливістю адаптації до застосування на різних типах фрезерних верстатів. Очікується річний економічний ефект від впровадження результатів роботи – 67 943 грн.;

- на науково-виробничому колективному підприємстві «Інтріс» розроблено і впроваджено оптичний датчик для вимірювання вібрацій з робочим діапазоном частот до 500Гц та чутливістю 1мкм. Очікується річний економічний ефект від впровадження датчика – 15 000 грн.;

- в навчальному процесі Донбаської державної машинобудівної академії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз

1. Galyna Klymenko, Yana Vasylychenko, Yevheniy Donchenko. Quality management of cutting tools on heavy machines. No. 94 (2021): Cutting and Tools in Technological Systems, Published: 2021-06-15. P135-141. ISSN 2078-7405 DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.15> (Здобувачем виконано збір статистичних матеріалів і розрахунки показників якості.)

Публікації, що входять до переліку фахових видань

2. Кутепов Н.Л., Сердюк А.А., **Донченко Е.И.**, Зателепина С.Г. Анализ спектрального распределения амплитуд вибраций в зоне резания и разработка системы вибростабилизации. Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. статей. В 2х томах. Т1. / Под редакцией Г.Л.Хаега. - Краматорск: ДГМА, 1997 - 262с. с106-109. ISBN 5-7763-8563-6. (Здобувачем виконано аналіз методів математичної обробки результатів експериментів)

3. Сердюк А.А., Коткин Г.Г., **Донченко Е.И.** Алгоритмы распознавания образов в диагностике процесса резания. Системный анализ: оптимизация и принятие решений в механообработке. / Г. Г. Коткин, В. С. Гузенко, А. С. Еськов и др. Под общей редакцией В. С. Гузенко. – Краматорск: ДГМА, 1998 - 224с. С179-209. ISBN 5-7763-8566-0. (Здобувачем розроблено математичну модель, основу на пошуку невизначеної інформації, досліджено спосіб пошуку невизначеної інформації методом усереднення, досліджено розпізнавання і пошук невизначеної інформації на основі лінійної моделі)

4. **Донченко Е.И.**, Сердюк А.А., Гузенко В.С. Моделирование динамики процесса резания торцевыми фрезами. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. - Краматорськ: ДДМА, вип. №11, 2001 - 168с. С60-67. ISBN 966-7851-04-4 (Здобувачем розроблено математичну модель та її реалізацію у середовищі Matlab, проведено моделювання)

5. **Донченко Е.И.**, Сердюк А.А., Гузенко В.С. Позняк Г.Г. Разработка методики проведения экспериментального исследования динамики торцевого фрезерования. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. - Краматорськ: ДДМА, вип. №18, 2005 - 248с. С31-38. ISBN 966-379-048-2 (Здобувачем розроблено методику проведення експерименту, виконано аналіз експериментальних даних)

6. Мироненко Е.В., **Донченко Е.И.**, Марчук Е.В. Переносной измерительный комплекс для исследования вибраций технологических систем механической обработки. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ - Київ, вип. №20, 2006. - 236 с. С63-68. ISBN 978-966-379-146-3 (Здобувачем виконано розробку та практичну реалізацію вимірювального комплексу)

7. **Донченко Е.И.**, Донченко А.И. Практическое использование способа повышения эффективности анализа нестационарных последовательностей в вибрационном сигнале при торцевом фрезеровании. / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №30, 2012. – 388 с. С298-301. ISSN 2222-9000 (Здобувачем виконано розробку та реалізацію інформаційно – вимірювального комплексу Мрія)

8. **Донченко Е.И.**, Шишкин А.В., Пантелеев А.Е. Исследование системы контроля количества малоразмерных неметаллических объектов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №32, 2013. – 424 с. С305-311. ISSN 2222-9000 (Здобувачем виконано розробку та реалізацію безконтактного датчика інформаційно – вимірювального комплексу)

9. Сорокин Т.И., **Донченко Е.И.** Моделирование процесса фрезерования с расчётом сил резания по методу Розенберга. Науковий Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (20Е), 250с. С81-89. ISSN 2219-7869 (Здобувачем розроблено та реалізовано елементи моделі процесу фрезерування)

10. Федотова Е.П., **Донченко Е.И.**, Лебедь В.Т. Импульсный метод подавления вибрации при точении деталей «по следу». Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2019. – № 1 (45). – 250 с. С158-163. ISSN 1993-8322 (Здобувачем уточнено умови використання явища «різання по сліду» у математичних моделях, реалізованих у середовищі Matlab)

Публікації апробаційного характеру

11. **Донченко Е.И.** Способ снижения вибраций при торцевом фрезеровании и устройство для его осуществления. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції 31 травня - 3 червня 2005 року / Під загальною редакцією Ковальова В.Д. - Краматорськ: ДДМА 2005. - 116с. С27. ISBN 966-379-001-6

12. **Донченко Е.И.** Рекомендации по проектированию измерительного канала для исследований динамики торцевого фрезерования. Проблеми та перспективи розвитку. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали четвертої Міжнародної науково-технічної конференції 5-8 червня 2006 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2006. — 108 с. С31. ISBN 966-379-076-8

13. **Донченко Е.И.** Ультразвуковое фрезерование. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали шостої Міжнародної науково-технічної конференції 2-5 червня 2008 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 144 с, С35. ISBN 978-966-379-251-4

14. **Донченко Е.И.**, Решетняк С.Р. Система контроля и управления доступом к станочному оборудованию. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 30 травня — 1 червня 2017 року / Під заг.ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2017. — 108 с., С28. ISBN 978-966-379-796-0 (*Здобувачем запропоновані новітні засоби побудови програмного забезпечення технологічного обладнання*)

15. **Донченко Е.И.** Автоматное программирование при разработке встраиваемых систем. Информатика, управління та штучний інтелект. Тези шостої міжнародної науково-технічної конференції. — Харків: НТУ "ХП", 2019. — 140 с., українською, російською, англійською мовами. С31. ISSN 2524-0293

16. **Донченко Е.И.** Новый подход к разработке систем управления оборудованием на базе микроконтроллеров. Важке машинобудування. проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 21 – 24 грудня 2020 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2020. — С.26 ISBN 978-966-379-959-9

17. Субботин О.В., **Донченко Е.И.** Управление индикацией на информационно-указательном табло. Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції (21–23 вересня 2016 р., м. Запоріжжя). — Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. — 344 с., С. 188–189. ISBN 978-617-529-152-8 (*Здобувачем виконано розробка схем та друкованих плат систем індикації*)

18. Oleg Subotin, **Evgeniy Donchenko**. Optoelectronic display system data based on matrix display. Embedded System and Trend in Teaching Engineering. Published: Faculty of Education of the Constantine the Philosopher University in Nitra Drazovska cesta 4, 949 74 Nitra, Slovakia 2016. P.120-125. ISBN 978-80-558-1040-9 (*Здобувачем виконано проектування та практична реалізація засобів людино-машинного інтерфейсу для промислових застосувань*)

Патенти

19. Патент України на корисну модель № 25084, МПК (2006) G01L 1/00. Спосіб діагностування динамічної крутильної жорсткості / Мироненко Євгеній Васильович, Сердюк Олександр Олександрович, Бабін Олег Фавієвич, Марчук Євген Вячеславович, **Донченко Євгеній Іванович** – № u200702984. — Заявл. 21.03.2007. Опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11, 2007 р. (*Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано структуру та реалізовано інформаційно – вимірювальний комплекс*)

АНОТАЦІЯ

Донченко Є. І. Підвищення ефективності фрезерування на основі розробки та дослідження автоматизованої системи діагностики фрез. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності попереднього торцевого фрезерування з використанням малозубих фрез шляхом створення та дослідження автоматизованої системи діагностики, що дозволило підвищити надійність торцевих фрез, продуктивність фрезерування та зменшити потребу у інструментальному матеріалі.

При виконанні експериментальних досліджень створено прототип комплексної системи оцінки якості процесу торцевого фрезерування, якій включає три канали п'єзоелектричних датчиків віброприскорення та датчик куту обертання шпинделю фрезерного верстата.

Вперше розроблено математичну модель системи розпізнання образів, яка дає змогу прогнозувати стан різального інструменту при попередньому торцевому фрезеруванні на базі експериментальних даних.

В роботі розроблено розрахунково-математичну модель процесу фрезерування для визначення зв'язку між параметрами вібрацій при торцевому фрезеруванні та станом різальних пластин, отримані математичні моделі для прогнозування надійності збірного інструмента при послідовному руйнуванні кожного зубу для торцевої фрези з довільною кількістю пластин.

Результати роботи знайшли практичне використання при створенні технічних рішень та методики визначення періоду регламентованої заміни інструменту для забезпечення заданого рівня його надійності.

Завдяки фактичному впровадженню системи діагностики торцевих фрез при попередньому фрезеруванні на ПАТ Дружківський машинобудівний завод отримано економічний ефект 38 670 грн (на період).

Завдяки впровадженню програмно-апаратного комплексу діагностики малозубих фрез «Мрія-Міні» на ТОВ «Промислово-торгівельна компанія Інтріс трейд» планується отримати річний економічний ефект, що дорівнює 67 943 грн.

Завдяки впровадженню оптичного датчика з поліпшеними метрологічними характеристиками на науково-виробничому колективному підприємстві «Інтріс» планується отримати річний економічний ефект, що дорівнює 15 000 грн.

Ключові слова: торцеве фрезерування, механічна вібрація, діагностика фрезерування, руйнування інструменту, система діагностики.

АННОТАЦИЯ

Донченко Е. И. Повышение эффективности фрезерования на основе разработки и исследования автоматизированной системы диагностики фрез. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук (доктора философии) за специальностью 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы повышения эффективности чернового торцевого фрезерования с использованием малозубых фрез путем создания и исследования автоматизированной системы диагностики, которая позволила повысить надежность торцевых фрез, производительность фрезерования и уменьшить потребность в инструментальном материале.

При выполнении экспериментальных исследований создан прототип комплексной системы оценки качества процесса торцевого фрезерования, который включает три канала пьезоэлектрических датчиков виброускорения и датчик угла поворота шпинделя фрезерного станка.

Впервые разработана математическая модель системы распознавания образов, которая дает возможность определять состояние пластин при черновом торцевом фрезеровании на базе экспериментальных данных.

В работе разработана расчетно-математическая модель процесса фрезерования для определения связи между параметрами вибраций при торцевом фрезеровании и состоянием режущих пластин, получены математические модели для прогнозирования надежности сборного инструмента при последовательном разрушении каждого зуба для торцевой фрезы с произвольным количеством пластин.

Результаты работы нашли практическое использование при создании технических решений и методики определения периода регламентированной замены инструмента для обеспечения заданного уровня его надежности.

Благодаря внедрению системы диагностики торцевых фрез при черновом фрезеровании на ПАО Дружковский машиностроительный завод получен фактический экономический эффект 38 670 грн (за период).

Благодаря внедрению программно-аппаратного комплекса диагностики мелкозубых фрез «Мрия-Мини» на ТОВ «Производственно-торговая компания Интрис трейд» ожидается получить годовой экономический эффект 67943 грн.

Благодаря внедрению оптического датчика с улучшенными метрологическими характеристиками на научно-производственном коллективном предприятии «Интрис» ожидается получить годовой экономический эффект в размере 15 000 гривен.

Ключевые слова: торцевое фрезерование, механическая вибрация, диагностика фрезерования, разрушение инструмента, система диагностики

ABSTRACT

Donchenko E. I. Improving the efficiency of milling based on the development and research of an automated diagnostic system for cutters. Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) for specialty 05.03.01 – machining processes, machines and tools. – Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk, 2021.

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and technical problem of increasing the efficiency of rough face milling using small-tooth cutters by creating and researching an automated diagnostic system, which made it possible to increase the reliability of end mills, milling productivity and reduce the need for tool material.

When performing experimental studies, a prototype of an integrated system for assessing the quality of the face milling process was created, which includes three channels of piezoelectric vibration acceleration sensors and a sensor for the angle of rotation of the spindle of a milling machine.

For the first time, a mathematical model of the pattern recognition system has been developed, which makes it possible to predict the state of the cutting tool during rough face milling on the basis of experimental data.

In this work, a computational and mathematical model of the milling process has been developed to determine the relationship between the vibration parameters during face milling and the state of the cutting inserts.

The obtained mathematical models for predicting the reliability of the assembled tool with sequential destruction of each tooth for an end mill with an arbitrary number of inserts.

The results of the work have found practical use in creating technical solutions and methods for determining the period of regulated tool replacement to ensure a given level of its reliability.

Thanks to the introduction of a diagnostic system for end mills during rough milling at PJSC Druzhkovsky Machine-Building Plant, an economic effect of UAH 38,670 was obtained (for the period).

The managers of the hardware-software complex for diagnostics of small-toothed milling cutters "Mriya-Mini" at the TOV "Industrial-trading company Intris trade" planned economic effect 67943 UAH.

The staff of the optical sensor with advanced metrological characteristics at the scientific- manufacturing collective enterprise "Intris" is scheduled to have an economic effect of 15000 UAH.

Key words: face milling, mechanical vibration, milling diagnostics, tool failure, diagnostics system

Підписано до друку 25.08.2021 р.
Формат 60×90/16. Папір офсетний.
Друк цифровий / різнографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Наклад 100 пр. Зам. № 56

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1633 від 24.12.2003

