

**Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу**

На правах рукопису

Скрип'юк Ростислав Богданович

УДК 681.518.54:621.926.3

**КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ
ВАЛКОВИХ МЛИНІВ**

**Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та
визначення складу речовин**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

**Науковий керівник:
доктор технічних наук,
професор Заміховський Л.М.**



Івано-Франківськ – 2011

d/396

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ.....	12
1.1. Призначення, принцип роботи та конструктивні особливості ВВМ з точки зору контролю технічного стану їх робочих органів.....	12
1.2. Аналіз факторів, що зобумовлюють зміну технічного стану робочих органів ВВМ.....	17
1.3. Аналіз існуючих методів контролю технічного стану робочих органів ВВМ.....	22
1.4. Обґрунтування і вибір напрямку досліджень	34
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВАЛКОВОГО МЛИНА.....	36
2.1. Розроблення узагальненої моделі ВВМ.....	36
2.2. Аналітичні дослідження взаємодії кусків вугілля різної форми з помольною чашею в процесі їх руйнування у ВВМ.....	38
2.3. Аналітичні дослідження процесу початкового завантаження вугілля у помольну чашу та його руйнування	47
2.4. Аналітичні дослідження взаємного руху помольного валка і бігової доріжки та формування сили їх притискання	55
2.4.1 Формування сили притискання помольного ПВ до БД ПЧ.....	64
Висновки до розділу 2	66
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ ПОМОЛУ ВУГІЛЛЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДИЧНОГО, ТЕХНІЧНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	67
3.1. Дослідження інформаційних показників процесу помолу вугілля... 67	67
3.1.1 Статистичні характеристики споживаної потужності приводу помольної чаші та її вібрації	68
3.2. Факторний аналіз параметрів ВВМ і вугілля.....	72

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень.....	78
3.4. Розроблення технічного та програмного забезпечення для проведення експериментальних досліджень технічного стану ВВМ.....	80
3.5. Розробка методики вимірювання величини зносу поверхонь робочих органів ВВМ.....	84
Висновки до розділу 3	89
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВВМ	91
4.1. Характеристика експериментального матеріалу	91
4.2. Розроблення методу контролю технічного стану ВВМ за його вібраційними характеристиками.....	95
4.3. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ за його розгінною характеристикою	101
4.4. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ за уточненою перехідною характеристикою	106
4.5. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ за методом Симою.....	114
4.6. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ з використанням моделі авторегресії	121
4.7. Контроль технічного стану робочих органів ВВМ методом непараметричної ідентифікації.....	124
Висновки до розділу 4	129
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ВВМ.....	127
5.1. Розроблення апаратної частини мікроконтролерної системи діагностування ВВМ.....	131
5.2. Розроблення програмного забезпечення для системи діагностування вугільного млина	134
5.3. Розроблення підсилювача до віброакустичного датчика системи діагностування.....	143
5.4. Оцінка точності результатів вимірювань	146

5.5. Визначення оптимального періоду контролю технічного стану ВВМ	149
5.6 Розрахунок достовірності контролю технічного стану робочих органів ВВМ.....	155
5.7 Результати промислової апробації розроблених методів контролю технічного стану робочих органів ВВМ.	163
Висновки до розділу 5	170
ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТКИ	185

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД	–	асинхронний електродвигун;
АЦП	–	аналогово-цифровий перетворювач;
АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика;
БД	–	бігова доріжка;
ВВМ	–	вертикальний валковий млин;
ДК	–	достовірність контролю;
ДО	–	діагностична ознака;
МД	–	млин дисковий;
ОК	–	об'єкт контролю;
ОП	–	операційний підсилювач;
ПВ	–	помольні валки;
ПЕОМ	–	персональна електронно обчислювальна машина;
ПП	–	перехідний процес;
ПХ	–	перехідна характеристика;
ПЧ	–	помольна чаша;
РМ	–	редуктор млина;
РХ	–	розгінна характеристика;
СД	–	система діагностування;
СПФ	–	смугопроектний фільтр;
ТЗК	–	технічні засоби контролю.

ВСТУП

Актуальність теми. Наявність незначних покладів природного газу, які не забезпечують промисловість України енергоносіями і ставлять її в залежність від Росії, що його постачає, вимагає переходу на енергозберігаючі технології, зокрема використання більш дешевих енергоносіїв, до яких відноситься вугілля низьких сортів. Пилевугільна суміш, яку отримують шляхом переробки вугілля низьких сортів, є заміником природного газу і використовується на найбільш енергоємних підприємствах: в котельних установках енергоблоків теплових електростанцій, на металургійних комбінатах шляхом вдування пилевугільної суміші в доменні печі, в цементній промисловості в технологічному процесі випалювання клінкеру тощо. Слід відмітити, що цементна промисловість України є однією з найбільш енерговитратних, оскільки частка електроенергії і палива (природного газу) складає 65% собівартості цементу. Для приготування пилевугільної суміші використовують вертикальні валкові млини (ВВМ).

Одним з перших в Україні перехід на використання пилевугільної суміші замість природного газу здійснило ВАТ «Івано-Франківськцемент». В технологічному процесі її приготування використовується вертикальний валковий млин типу MPS 180BK фірми PFEIFFER AG.

Від технічного стану робочих органів ВВМ (помольних валків - ПВ та бігової доріжки - БД, помольної чаші - ПЧ) залежить як надійність його роботи, так і ефективність процесу помолу вугілля та якість вихідного продукту. На сьогоднішній день відсутні методи і технічні засоби, які дозволяють отримувати оперативну інформацію про фактичний технічний стан робочих органів ВВМ і проводити наплавку їх зношених поверхонь за потребою, а існуючий метод вимірювання величини зношення поверхонь робочих органів вимагає технологічної зупинки ВВМ і є недосконалим.

Тому розроблення методів і засобів оперативного контролю технічного стану робочих органів ВВМ в процесі його експлуатації є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати наукових розробок та експериментальних досліджень, які проводились в 2006-2010-му роках на кафедрі комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Тематика роботи базується на результатах госпдоговірної науково-дослідної роботи № 13-09 «Розроблення методики діагностування технічного стану вертикального валкового млина PFEIFFER-AG – MPS 180 BK», головним виконавцем якої був здобувач. Номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0109U008155.

Мета досліджень: розроблення методів і засобів оперативного контролю технічного стану робочих органів ВВМ, як інструменту для забезпечення надійності їх роботи, підвищення ефективності процесу помолу вугілля та якості вихідного продукту - пилевугільної суміші.

Задачі досліджень:

- проаналізувати конструктивні особливості робочих органів ВВМ як як об'єкта контролю їх технічного стану в процесі експлуатації;
- розробити теоретичні засади методу контролю технічного стану робочих органів ВВМ в процесі його експлуатації;
- провести комплекс цілеспрямованих експериментальних досліджень на діючому ВВМ для виявлення діагностичних ознак (ДО) його технічного стану та розробити для цього їх методичне, технічне та програмне забезпечення;
- розробити алгоритми та методи контролю технічного стану робочих органів млина в процесі його експлуатації;
- розробити технічні та програмні засоби для реалізації методу контролю технічного стану робочих органів ВВМ;
- провести промислову апробацію і впровадження розроблених методів і засобів контролю технічного стану робочих органів ВВМ на ВАТ «Івано-Франківськцемент».

Об'єкт досліджень – процес зношування робочих органів ВВМ – ПВ та БД помольної чаші, викликаний розвитком дефектів, що призводить до зниження ефективності помолу вугілля та якості вихідного продукту.

Предмет досліджень – методи і засоби контролю технічного стану робочих органів ВВМ.

Методи дослідження. При проведенні теоретико-експериментальних досліджень використовувалися: теоретичні положення аналітичної геометрії, методи математичного аналізу, диференціальні рівняння; методи теорії ймовірності і математичної статистики; методи ідентифікації об'єктів; методи моделювання та обробки сигналів, методи спектрального та кореляційного аналізу, а також основні положення технічної діагностики. При розробці технічного забезпечення використовувались методи системо- і схемотехніки.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше:

- розроблена узагальнена модель ВВМ, яка дозволяє проаналізувати фактори (параметри і показники), що обумовлюють як технічний стан його робочих органів, так і якість вихідного продукту – пилевугільної суміші та вибрати серед них найбільш інформативні, що використані як ДО технічного стану робочих органів ВВМ.

- проведені аналітичні дослідження процесу взаємодії кусків вугілля різної форми, розмірів і місця розташування на біговій доріжці помольної чаші з помольними валками в процесі їх руйнування, які покладені в основу методу контролю технічного стану ПВ та БД при експлуатації ВВМ.

- на основі запропонованих теоретичних положень взаємодії кусків вугілля різної форми з робочими органами ВВМ в процесі їх руйнування, розроблено метод контролю технічного стану останніх за вібраційними характеристиками ВВМ, використання якого дозволяє отримати оперативну інформацію про величину зношування робочих органів ВВМ в процесі його експлуатації.

- синтезовано структуру мікропроцесорної системи діагностування робочих органів ВВМ, використання якої дозволяє автоматизувати процес контролю їх технічного стану розробленим методом (за вібраційними характеристиками ВВМ).

2. Дістали подальший розвиток методи параметричної і непараметричної ідентифікації млина за перехідною характеристикою (ПХ), яка, на відміну від традиційної, є усередненою за двома каналами («напруга на вході електроприводу млина-частота обертання його ротора» та «напруга на вході електроприводу млина-частота обертання привідного вала помольної чаші»), що дозволило визначити ДО технічного стану робочих органів ВВМ, які були покладені в основу запропонованих методів контролю їх технічного стану.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні:

- вимірної системи для зняття ПХ ВВМ на основі енкодера фірми Autonics, контролера CPU 313C-2DP фірми Siemens та програми обробки даних, написаної в середовищі Simatic Step 7, використання якої дозволяє отримати ПХ ВВМ, що використовуються для розрахунку ДО технічного стану його робочих органів;

- алгоритму контролю технічного стану робочих органів ВВМ за його вібраційними характеристиками, що дозволяє зупиняти ВВМ і проводити наплавку поверхонь ПВ та БД, виходячи з фактичного технічного стану останніх;

- алгоритмів контролю технічного стану робочих органів млина за його ПХ, що реалізуються пакетом System Identification Toolbox середовища Matlab і дозволяють підвищити точність оцінки їх стану за вібраційними характеристиками ВВМ;

- мікроконтролерної системи діагностування робочих органів ВВМ на базі мікроконтролера ATmega8515 (за допомогою інтерфейсу RS-232C система під'єднується до зовнішнього промислового контролера управління ВВМ типу Simatic S7-400 фірми Siemens), використання якої в комплексі з розробленим програмним забезпеченням дозволяє отримати оперативну і вірогідну інформацію про технічний стан робочих органів ВВМ в реальному часі та на її основі корегувати режим його роботи.

Розроблені методи та мікроконтролерна система діагностування технічного стану ВВМ пройшли промислову апробацію та впроваджені з 2009 року на ВАТ «Івано-Франківськцемент». Результати теоретичних і

експериментальних досліджень використовуються в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін "Основи теорії надійності і технічної діагностики систем", "Методи і засоби діагностування об'єктів нафтогазового комплексу", "Проектування систем діагностування", які читаються для студентів спеціальності 7.091401 – "Системи управління і автоматики".

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно [13,14,15,16,17,18].

В роботах, опублікованих у співавторстві, запропонована методика та розроблені технічні засоби для зняття ПХ ВВМ [1]; проведені дослідження ДО стану ВВМ за його ПХ [3] та уточненою ПХ [2]; обгрунтована можливість розробки методу контролю технічного стану ВВМ на основі використання характеристик його вібраційного стану [4]; проведено моделювання процесу падіння куска вугілля зі шнекового дозатора в помольну чашу ВВМ [5]; запропонована структура мікроконтролерної системи діагностування технічного стану робочих органів ВВМ [6]; запропоновано використання методу непараметричної ідентифікації для діагностування технічного стану робочих органів ВВМ [7]; проведені аналітичні дослідження взаємодії куска вугілля різної форми та розмірів з поверхнею БД і ПВ в процесі їх руйнування для двох випадків розташування куска вугілля на БД [8]; методики визначення інформаційних показників процесу помолу вугілля [12] та масового зносу робочих органів ВВМ [9]; досліджені статистичні показники, які характеризують тонкість та якість помолу вугілля [10,11].

Апробація результатів досліджень. Результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XXIV (I) і XXVI(II) Міжнародній міжвузівській школі-семінарі «Методи і засоби діагностики в техніці і соціумі (МіЗДТС-2007)» (м. Івано-Франківськ, 2007, 2009 роки.); XXV міжнародній міжвузівській школі-семінарі "Методи і засоби технічної діагностики" (м. Йошкар-Ола, Росія, 2008 р.); 4-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій РТ-2008" (м. Севастополь, 2008 р.); V Міжнародній науково-технічній конференції. «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної

діагностики машинобудівного і нафтопромислового обладнання» (м.Івано-Франківськ, 2008р); наукових семінарах кафедри комп'ютерних технологій в системах управління і автоматики (2006 - 2010 рр.).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 18 робіт, з яких 11- у виданнях, включених до фахових видань ВАК України, а 6 робіт є одноосібними.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Об'єм дисертації – 226 сторінок, в т.ч. 8 додатків на 42 сторінках. Дисертація містить 98 рисунків, 17 таблиць та посилань до 124 літературних джерел на 12сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ

Надійність – властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення його експлуатаційних показників у заданих межах, які відповідають заданим режимам і умовам застосування, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування [1].

Надійність є однією із властивостей ВВМ, яка проявляє себе в процесі експлуатації. Надійність є комплексною властивістю, яка в залежності від конструктивних особливостей ВВМ і умов їх експлуатації може містити в собі: безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збереження.

Довговічність ВВМ – це властивість зберігати працездатність до настання граничного стану при установленій системі технічного обслуговування і ремонту. При цьому під граничним технічним станом ВВМ будемо розуміти відсутність можливості його подальшої експлуатації, що обумовлюється зниженням якості вихідного продукту – пилевугільної суміші [2].

Оскільки однією із основних причин зниження ефективності роботи ВВМ є значне зношування їх робочих органів – ПВ та БД помольної чаші [3], у розділі розглядаються їх конструктивні особливості, аналізуються фактори впливу на процес зношування робочих органів та методи і засоби контролю їх технічного стану.

1.1. Призначення, принцип роботи та конструктивні особливості ВВМ з точки зору контролю технічного стану їх робочих органів

Процес руйнування шматків твердого матеріалу при критичній внутрішній напрузі, що створюється в результаті якого-небудь навантаження і перевищує відповідну межу міцності, називають подрібненням [1,2]. Напруження в матеріалі може створюватися механічним навантаженням, температурними діями, ультразвуковими коливаннями і ін. Найбільше застосування в сучасному виробництві мають механічні способи подрібнення.

Подрібнення ділять на дроблення і помол, а машини, що призначені для цих цілей, називаються дробарками і млинами. Ступінь подрібнення відображає технологію і визначає параметри подрібнень.

Сьогодні для помолу цементної сировини, вугілля, клінкеру, гранульованого доменного шлаку і інших продуктів широко використовуються вертикальні валкові млини, виготовленням яких займається ряд провідних фірм світу [3,4,5,6,7,8,9,10,11 і інші]. ВВМ забезпечують високу якість продукції, характеризуються значно меншим споживанням енергії і витратами на технічне обслуговування, чим кульові млини, надійні в експлуатації і технічному обслуговуванні. На рис.1.1 наведено розподіл (питома вага) різних типів млинів в системах приготування пиловугільної суміші по країнах Західної Європи та порівняльна характеристика ВВМ і кульових барабанних млинів, що вказує на безсумнівну перевагу ВВМ [3] перед кульовими, наприклад типу EM фірми Claudius Peters [9].

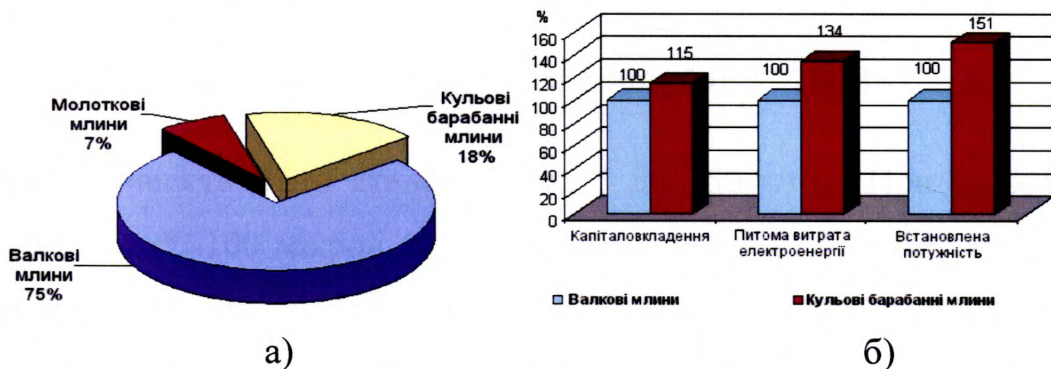


Рис. 1.1 Розподіл різних типів млинів в системах приготування пиловугільної суміші по країнах Західної Європи (а) та порівняльна характеристика ВВМ і кульових барабанних млинів (б)

Не розглядаючи конструкції різних типів ВВМ, що не входить в поставлені задачі досліджень, зупинимося на аналізі конструктивних особливостей валково-тарілчатого млина типу MPS BK фірми PFEIFFRAG. Сьогодні в світі використовується більше 1000 млинів типу MPS для обробки різного типу вугілля, від лігніту до палива, отриманого перегонкою з мазуту, включаючи і антрацит. Один з таких ВВМ типу MPS-180 BK є найбільш важливою складовою процесу приготування пиловугільної суміші на ВАТ “Івано-Франківськцемент”. Конструкція млина MPS 180BK [12] приведена на рис.1.2.

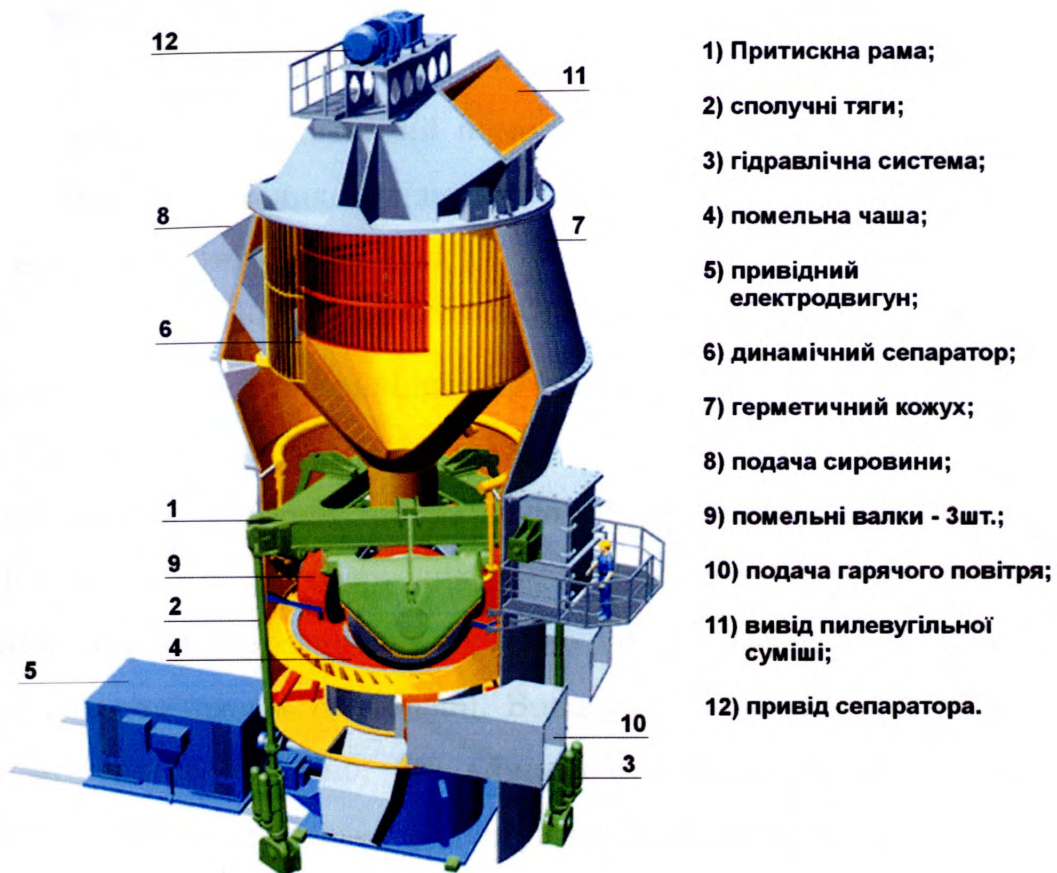


Рис. 1.2 Конструкція ВВМ типу MPS - 180ВК

Продуктивність ВВМ становить від 5 до 150 т/год. При цьому тонина помелу складає 60-100 мікрон, а залишкова вологість-1,0%. Перемелювання з паралельним сушінням вугілля вологістю більше 20% відбувається в одному агрегаті. Величина частинок вугілля складає до 100мм, завдяки чому відпадає необхідність в попередньому подрібненні.

Характерним для всіх видів застосування цього ВВМ є використання певної статичної тривалкової системи (рис.1.2), яка складається з притискної рами 1, розташованих зовні сполучних тяг 2 і гідравлічної системи 3. Гідравлічна система притискання валків має ряд переваг: можливість установки і регулювання зусилля притискання ПВ як в ручному, так і в автоматичному режимах; можливість підняття ПВ над БД; виключення можливості ударів ПВ об БД; забезпечення однакового притискання ПВ при будь-яких режимах роботи.

Розглянута статично визначена система забезпечує рівномірний розподіл навантаження на осьовий сегментний опорний підшипник у коробці передач

ВВМ, а також на ПВ. Оскільки кожен ПВ має горизонтальну і вертикальну рухливість, його рухи не передаються іншим ПВ.

ВВМ формує високоякісний помольний шар. Відносно мала швидкість обертання ПЧ разом з великим діаметром ПВ забезпечує хороший забір вугілля і нечутливість до великих його кусків.

ПЧ 4 приводиться в дію за допомогою привідного електродвигуна 5 і планетарного редуктора 6 із вихідною швидкістю 38 об/хв.

Електродвигун типу IBN5-355У4 – трифазний асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором потужністю $P=250$ кВт, напругою живлення $U_{ж}=6000$ В та частотою обертання $n=1488$ об/хв, з'єднаний з редуктором еластичною муфтою, що виконує функцію захисту вузлів механічних передач від ударних навантажень та вібрації. Вона динамічно зрівноважена і передає крутний момент симетрично, без виникнення зовнішніх сил, що діють на електродвигун. Привідний електродвигун оснащений 5 давачами температури, з яких 2 давачі встановлені на передньому та задньому підшипниках, 3 – на кожній з обмоток статора. Він встановлений на окремому фундаменті і не є джерелом вібрації. При неперервній експлуатації має бути забезпечений постійний обмін повітря охолодження в об'ємі $0,55$ м³/с на кожні 100 кВт потужності.

При запуску і технічному обслуговуванні ПВ піднімаються за допомогою циліндрів натягу.

Принцип роботи ВВМ полягає в наступному - три стаціонарних ПВ, що котяться по БД помольної чаші, яка повільно обертається, є основними робочими органами ВВМ. Куски вугілля попадають між ПВ та БД ПЧ і перемелюються під дією тиску і тертя. Сила притискання, необхідна для подрібнення вугілля, створюється розглянутою вище гідравлічною системою натягу.

ВВМ характеризується рівномірною роботою, що визначається малою швидкістю обертання ПЧ. Рівень допустимої вібрації для ВВМ складає $20,0-25,0$ мм/с. Основні технічні характеристики ВВМ типу MPS - 180BK наведені в додатку А.

Оскільки об'єктом подальших досліджень вибрано ВВМ типу MPS - 180ВК, розглянемо конструктивні особливості робочих органів – ПВ та БД ПЧ з точки зору об'єкту контролю їх технічного стану. Останній вимагає наявності відповідних параметрів і показників процесу експлуатації ВВМ за допомогою яких опосередковано, використовуючи методи параметричної і віброакустичної діагностики, можна оцінити технічний стан його робочих органів. На рис. 1.3 приведена блок-схема системи контролю параметрів і показників процесу експлуатації ВВМ.

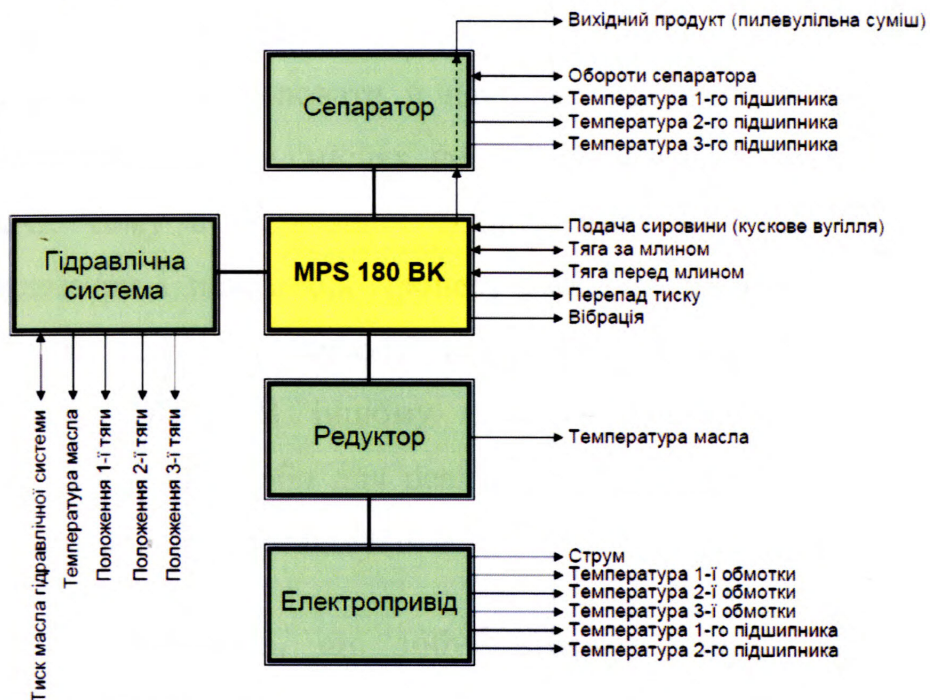


Рис. 1.3 Блок-схема системи контролю параметрів і показників процесу експлуатації ВВМ

Для контролю вібростану ВВМ використовується система Vibrocontrol 1000 і давач вібрації Schenck VS-069 [16], що призначені для одноканального моніторингу абсолютних вібрацій і дозволяють вимірювати лише вертикальну складову віброшвидкості коливань помольного валка.

В гідравлічній системі використовуються наступні давачі:

- тиску масла гідравлічної системи (PIAS-HL, Hydac, EDS 1691, 0...45 МПа);
- положення тяг (ультразвуковий, PPEPRL-FU, 0...50 мм);

– температури масла (TIAS-H, Pt 100 m. n., Sitrans TF - 7NG3132-0AB11 Siemens, 0...150 °C).

Температура масла редуктора контролюється за допомогою давача Sitrans TF - 7NG3132-0AB11 Siemens (TIAS-H, Pt 100 m. n., 0...150 °C).

В електроприводі використовуються наступні давачі:

- обертів електродвигуна (MS22-Ri/24V DV в RM, 0...100%);
- температури підшипників (TIAS-H, Pt 100 m. n., Sitrans, -50...200 °C).

Виходячи з аналізу конструктивних особливостей ВВМ (рис.1.3) відмітимо, що конструкція ПЧ з робочими органами є неконтролепридатною, тобто не дозволяє встановлювати в найбільш інформативних, з точки зору контролю технічного стану, місцях необхідні давачі, а використовувати лише штатні давачі. Тому в подальших дослідженнях необхідно проаналізувати наведені параметри і показники процесу експлуатації ВВМ з точки зору їх інформативності, тобто можливості використання як ДО технічного стану робочих органів ВВМ. В іншому випадку необхідно буде розробляти спеціалізовані технічні засоби для реалізації встановлених і досліджених ДО технічного стану робочих органів ВВМ.

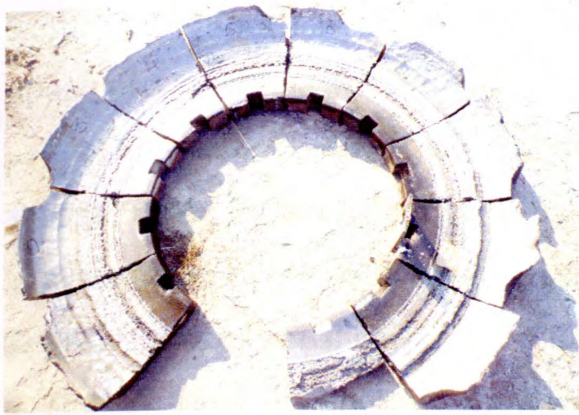
1.2. Аналіз факторів, що зобумовлюють зміну технічного стану робочих органів ВВМ



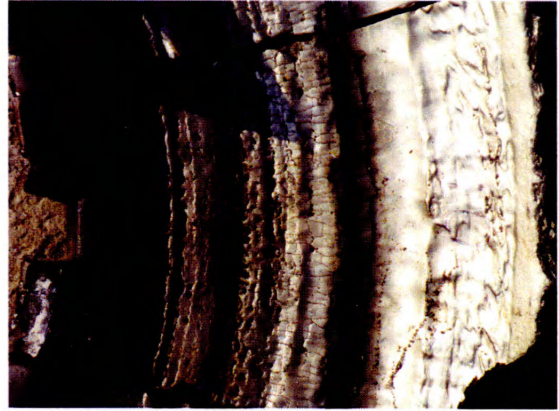
В [3,17] відмічено, що основним недоліком в роботі ВВМ є значне зношування поверхонь робочих органів. Наявність розглянутої в розд.1.2 статично визначеної системи, яка забезпечує рівномірний розподіл навантаження на ПВ, не забезпечує рівномірне зношування ПВ та БД ПЧ, у зв'язку з чим має місце різне їх зношування як за величиною, так і формою зношеної поверхні [17]. Зовнішній вигляд зношених поверхонь робочих органів показано на рис. 1.4.

Вирішення проблеми визначення технічного стану робочих органів ВВМ в процесі експлуатації, що забезпечує підвищення їх експлуатаційної надійності та якості вихідного продукту, неперервно пов'язане з проблемою їх технічної діагностики, вирішення якої має важливе народногосподарське значення.

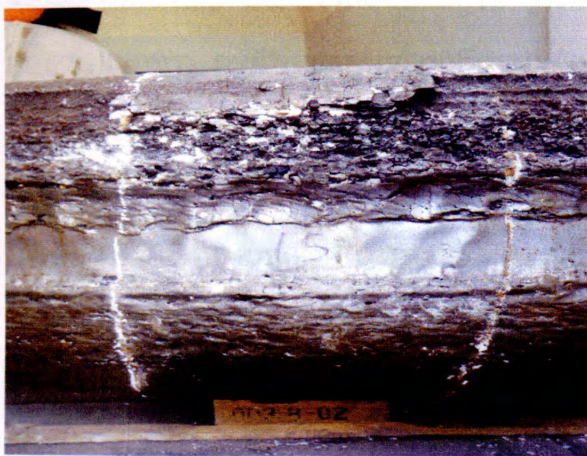
На жаль роботи в напрямку вирішення цієї проблеми, як в теоретичному так і практичному плані на даний час, за виключенням [18,19,20] не проводилися. Їх відсутність можна пояснити як унікальністю самого об'єкту діагностики, який не має подібних аналогів, так і відсутністю досвіду роботи з об'єктами подібного класу.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.4 Загальний вигляд зношених: а) –бігової доріжки помольної чаші; б) – сегмента бігової доріжки; в, г) – секцій двох помольних валків

В літературних джерелах, присвячених розгляду конструктивних особливостей ВВМ різного призначення, особливостей їх експлуатації, питанням надійності тощо, відсутня інформація про причини і фактори, що призводять до зношування поверхні робочих органів ВВМ. У зв'язку з цим зупинимося на розгляді і аналізі статистичних даних по відмовах, які були зафіксовані по ВВМ MPS - 180ВК, що експлуатується на ВАТ «Івано-Франківськцемент» з 2002 року. Як було відмічено вище, основними дефектами робочих органів ВВМ є зношування та викришування поверхонь ПВ та БД ПЧ,

що, в середньому, раз на три місяці вимагає проведення їх наплавки. Враховуючи, що матеріалом ПВ та БД є високохромистий чавун (хромкус), то наплавка проводиться одночасно дротом марки 4604 та 4601 діаметром 2,8мм, який виготовляє фірма Castolin Eutectic [21] та наплавочним дротом, який розроблено в ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. У випадку, коли наплавка зношених поверхонь уже є недоцільною (після однієї-двох наплавок), проводиться заміна робочих органів.

Причиною зношування та викришування поверхні ПВ та БД, на думку автора, може бути вібрація, що виникає в результаті силової і кінематичної їх взаємодії, а також обумовлюється сукупністю впливових факторів, які не завжди можна визначити, і здійснює переважаючий вплив на розвиток дефектів. Так, вібраційні напруження є типовим прикладом експлуатаційних навантажень, що викликають втомні напруження і можуть призвести до подальшого руйнування робочих органів ВВМ при наявності уже існуючого зносу їх робочих поверхонь. Враховуючи наявність викришування поверхонь ПВ та БД, особливо після наплавки зношених поверхонь, можна говорити про міцнісні відмови. Розглянемо основні фактори і процеси, які викликають міцнісні відмови і їх зв'язок з вібраційними процесами. До основних факторів можна віднести навантаженість робочих елементів, втому, знос, відмови, обумовлені конструкторсько-технологічними причинами, а також динамічні процеси.

Навантаження бувають статичні, динамічні (змінні і ударні) та циклічні [22]. Статичні навантаження можуть впливати на вібрацію машин головним чином, коли викликає зміна геометричних форм деталей, наприклад кінематичних пар. Крім того, під дією статичних навантажень підвищуються частоти власних коливань деталей. При тривалій дії статичних навантажень повзучість матеріалу призводить до зміни геометричної форми деталей і появи тріщин.

Циклічні навантаження не викликають вібрацію, однак призводять до втоми металу, що в свою чергу може вплинути на вібраційні процеси, які мають місце.

Динамічні навантаження – основна причина вібрації робочих органів ВВМ, появи динамічних напружень і втомних руйнувань.

При втомних процесах існує тривалий інкубаційний період накопичення пошкоджень з постійною швидкістю, після якого проходить різке збільшення швидкості накопичення пошкоджень. Такому закону повинна підпорядковуватися і зміна інтенсивності вібрації, пов'язана з втомними процесами. Однак при цьому слід враховувати можливі зміни частот і форм коливань віброуючих деталей і вузлів в результаті зміни резонансних умов різкої зміни інтенсивності вібрації.

На стадії швидкого руйнування швидкість зміни вібрації зростає і збільшується частота випадкових змін її інтенсивності. Так, тріщини в металі валків, які виникають при вібрації, мають втомний характер і пов'язані як із збільшенням динамічних навантажень, так і наявністю підрізів і інших концентраторів напружень, які викликають змінні навантаження. Нерівномірне зношення поверхні ПВ призводить до зміни їх динамічної взаємодії з БД, яка в окремих випадках має ударний характер. Значний знос призводить до зміни вібраційних процесів і, як наслідок, до зміни частот і форм коливань.

Таким чином, у ВВМ протікають різноманітні динамічні процеси, пов'язані з його функціонуванням. Більшість цих процесів здійснює динамічний вплив на робочі органи ВВМ і викликає їх вібрацію. В діагностичному плані динамічні процеси можуть як збуджувати вібрацію робочих органів, так і змінювати їх параметри, тобто можуть бути джерелом діагностичної інформації стосовно технічного стану ПВ та БД ПЧ.

Тому це питання вимагає подальшого дослідження.

Ще однією з причин зношування та викришування поверхні ПВ та БД ПЧ можуть бути і параметри та показники якості вугілля, що використовується для помолу, його твердість, вміст домішок тощо, а також попадання в підшипники ПВ вугілля, що може призвести до заклинювання ПВ, яке мало місце.

На особливості експлуатації ВВМ впливають такі фактори, як: якість вугілля (вміст домішок, твердість вугілля); якість обслуговування млина – вчасна заміна мастил в приводі млина, наплавка чи заміна робочих елементів

млина (ролів, помольної чаші) тощо; вібрація та її залежність від розвитку дефектів.

На початкових стадіях експлуатації ВВМ використовували суміш Львівсько-Волинського і Донецького вугілля у співвідношенні 50 + 50 %. У вказаних марках вугілля був наступний вміст летючих речовин: Львівсько-Волинське вугілля марки «Г» (газовий) - близько 36 - 39 %, Донецьке вугілля марки «Х» (худий) - близько 13 %. Фракція вугілля: 0-35 мм (макс. 5 % до 50 мм). Аналіз вказаних марок вугілля наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Аналіз типів вугілля

Аналіз вугілля	Вугілля №1	Вугілля №2
	Х-худий	Г-газовий
Вміст летючих речовин	серед. 10,7 %	серед. 36,7 %
Зольність	серед. 33,2 %	серед. 27,3 %
Розмолоздатність HGI	31-33°	36-50°
Розмолоздатність суміші HGI	37°	
Вологість	макс. 5,4 %	макс. 7,4 %
Вологість суміші	макс. 7,5 %	

Проведені випробування на індукційний період самозагорання показали, що суміш вугілля даних марок у вигляді порошку є практично не придатною навіть до короткочасного зберігання.

В подальшому використовувалося вугілля-антрацит марки АС і АШ компанії «Краснолучуглепоставка» (Луганська область) (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Параметри обраних марок вугілля

Тип	АС	АШ
Фракція	6-13 мм	0-6 мм
Зольність	9,7 -11 %	19 - 24
Вологість	5,5 - 6,5 %	6,5 - 7,8 %
Вміст летючих речовин	3 %	4,1 %
Теплотворність	6750 Ккал/кг	6300 Ккал/кг

В останні роки на ВАТ «Івано-Франківськцемент» використовується вугілля марки СССШ компанії «Krutrade A.G.» ВАТ «Оф. Юг - Сиб» (Хутор «Светлый», Каменського району, Ростовської обл., Росія) та марки ССМШ

компанії «Saintmarine Ltd.» ВАТ «Разрез Октябрьский» (м. Кісельовськ, Кемеровської обл. Росія).

До відмов інших вузлів ВВМ можна віднести забивання двовального шнека, відмова сепаратора чи його двигуна; поломка чи відмова гідросистеми, масляної станції, повітряної системи, системи розрідження повітря.

Електромагнітна вібрація виникає внаслідок періодичної зміни магнітних зусиль в зазорі між статором і ротором, ексцентриситету, який виникає при збиранні електродвигуна, відхилення форм поверхонь статора і ротора. Параметри збурюючих сил залежать від параметрів магнітної системи, частоти обертання, технологічних дефектів виготовлення і збирання магнітної системи. Джерелом підвищеної вібрації двигуна є опорні підшипники ковзання, складова вібрація яких в загальному віброеспектрі найбільш значима в порівнянні зі складовими інших конструктивних вузлів.

Крім цього, до основних факторів, що призводять до відмови привідного електродвигуна, можна віднести його температуру, яка також може бути діагностичним параметром його стану.

1.3. Аналіз існуючих методів контролю технічного стану робочих органів ВВМ

Відповідно до технічних умов експлуатація помольних валків і бігової доріжки допускається при величині їх лінійного зносу, яка не повинна перевищувати 25мм і 20мм відповідно. Перевірка стану робочих органів проводиться раз на два тижні шляхом зупинки ВВМ і проведення вимірювання величини їх зносу. Сама процедури вимірювання передбачає прикладання до робочих поверхонь валка і бігової доріжки спеціальних шаблонів з нанесеними на їх робочу поверхню мітками через рівні проміжки загальна кількість яких - 11, навпроти яких проводиться вимірювання величини зношеної поверхні тіла за допомогою штангенциркуля. На рис. 1.5 приведена схема вимірювання величини зношення валків, а на рис. 1.6 – бігової доріжки помольної чаші. Як видно з рис. 1.5 шаблон А встановлюється на кожух валка В до упора 1, а далі проводиться вимірювання величини зношення С вздовж промаркованих ліній 2.

Аналогічно проводиться вимірювання величини зношення С бігової доріжки В (рис. 1.6). Після проведення її очистки шаблон А встановлюється на місце 1 до упора 2 і проводиться вимірювання 3 зносу за допомогою штангенциркуля по маркованим лініям від 1 до 11. Результати вимірювання заносяться в таблиці.

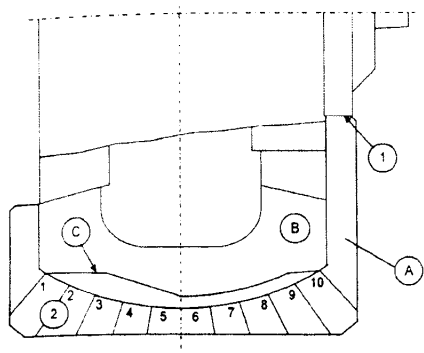


Рис. 1.5 Схема вимірювання величини зносу валків за допомогою шаблону

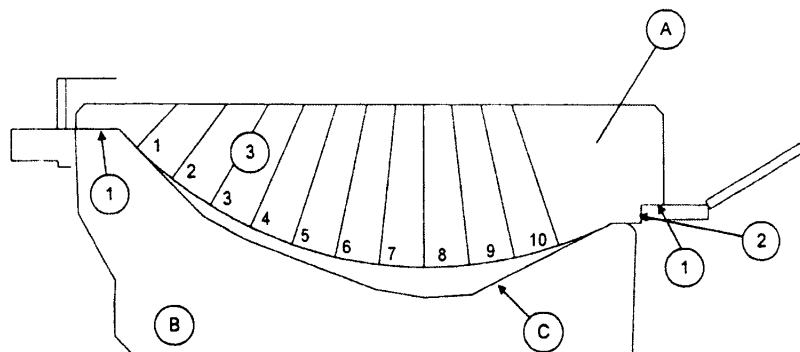


Рис. 1.6 Схема вимірювання величини зносу бігової доріжки помольної чаші за допомогою шаблону

Розглянутий метод відноситься до прямих методів вимірювання зносу і не може бути використаний для контролю стану робочих органів в процесі експлуатації ВВМ, оскільки вимагає зупинки ВВМ і проведення процедури вимірювання, яка займає тривалий час. Крім того, як було досліджено в [14], виміряні величини зносу не відповідають реальним, а є заниженими по валкам і біговій доріжці в середньому на 35,0-65,0 %, так як не враховується форма зносу поверхонь робочих органів.

Стосовно побічних (непрямих) методів вимірювання величини зносу робочих органів ВВМ, відмітимо, що огляд літературних джерел не дозволив знайти жодного розробленого методу контролю їх технічного стану в процесі експлуатації.

Виходячи з конструктивних особливостей ВВМ та факторів, що призводять до зміни технічного стану його робочих органів, розглянутих в розділах 1.1, 1.2 розглянемо можливість використання існуючих методів контролю і діагностування технічного стану млинів різних моделей стосовно ВВМ.

Сьогодні найбільшого розповсюдження знайшли два напрямки методів діагностування технічного стану об'єктів в різних галузях промисловості, що не виключають, а взаємно доповнюють один одного і можуть бути використані

при розробці методів контролю технічного стану ВВМ. До них відноситься параметрична діагностика та методи віброакустичної діагностики [28].

Методи параметричної діагностики передбачають визначення технічного стану об'єкта за параметрами та показниками, які супроводжують його роботу. Стосовно ВВМ такими параметрами, виходячи з рис.1.4, можуть бути:

- по млину MPS-180 ВК: вібрація помольної чаші, перепад тиску, тяга перед і за млином, подача кускового вугілля;
- по привідному електродвигуну: температура статорної обмотки, температура двох підшипників та величина споживаного струму;
- по редуктору: температура масла;
- по сепаратору: частота обертання та температура трьох підшипників;
- по гідравлічній системі: тиск масла в системі та його температура положення трьох зовнішніх сполучних тяг.

Оскільки відсутні результати досліджень взаємозв'язку розглянутих параметрів зі зміною технічного стану робочих органів ВВМ, робити будь-які висновки щодо їх використання за ДО технічного стану без проведення детального аналізу та експериментальних досліджень недоцільно. В той же час слід відмітити, що для контролю технічного стану подібних об'єктів розроблені методи, що базуються на зміні температури об'єкту, споживаної ним потужності чи крутного моменту на валу привідного двигуна та рівня вібрації.

Підвищення температури привідного двигуна ВВМ вказує на зростання крутного моменту на валу, що може бути зумовлено як змінами в кінематичній схемі процесу помолу, так і процесом зношування та заклинювання помольних валків. Для вимірювання температури привідного двигуна крім існуючих давачів можуть бути використані наступні давачі і системи [29,30,31].

Вимірювання крутного моменту на валу привідного двигуна можна здійснювати прямими методами з використанням стаціонарних давачів і систем, наприклад [32]. Недоліком їх є складність монтажу і налагодження давачів, особливо для такого неконтролепридатного об'єкта, як ВВМ. Найбільшого розповсюдження набули непрямі (побічні) методи вимірювання крутного моменту на валу привідного двигуна, які позбавлені недоліків,

притаманних прямим методам [33,34,35].

Існує три принципи непрямих методів вимірювання крутного моменту на валі двигуна [35]:

– методи, що базуються на використанні закону Ампера, у відповідності з якими крутний момент визначається через силу струму ротора та магнітну індукцію. Застосування цих методів для асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором вимагає спеціального пристрою для виміру сили струму ротора;

– метод еквівалентних схем полягає в моделюванні електродвигуна схемою заміщення. Якщо опори схеми моделі подібні опорам еквівалентної схеми реального двигуна, то при живленні двигуна і моделі від одного джерела струму, струми, що споживаються моделлю та двигуном, будуть подібні. В цьому випадку електромагнітна потужність двигуна буде відповідати потужності, що розсіюється на опорі, який імітує опір ротора.

– метод енергетичних діаграм базується на аналізі потужності, що споживається електроприводом. Стосовно електроприводу помольної чаші ВВМ її можна представити у наступному виді (рис. 1.7).

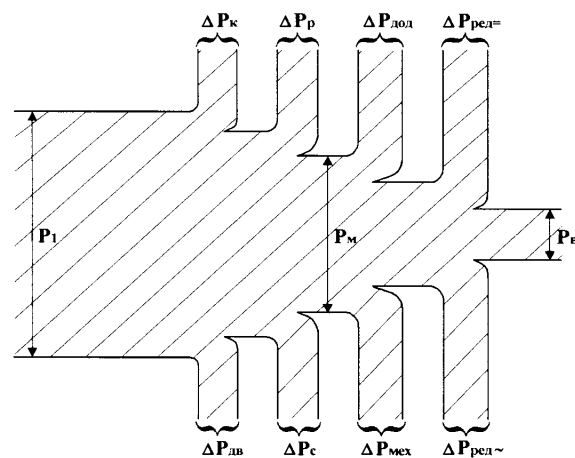


Рис. 1.7 Енергетична діаграма електродвигуна приводу помольної чаші

Потужність P_1 , що споживається ним, може бути подана у вигляді таких складових:

$$P_1 = \Delta P_k + \Delta P_{дв} + \Delta P_c + \Delta P_p + \Delta P_{мех} + \Delta P_{дод} + \Delta P_{ред=} + \Delta P_{ред\sim} + P_v \quad (1.1)$$

де $\Delta P_k = r_k l (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)$ – втрати потужності в кабелі;

r_k – питомий опір кабелю, Ом/км;

l – довжина кабелю, км;

I_A, I_B, I_C – струми в фазах А, В, С, що залежать від фізико-механічних властивостей вугілля, яке перемелюється в помольній чаші;

$\Delta P_{дв} = 3I^2 r_{дв}$ – втрати потужності в двигуні;

$r_{дв}$ – активний опір обмотки двигуна;

ΔP_c – втрати потужності в сталі двигуна від гістерезису і вихрових струмів;

ΔP_p – втрата потужності в обмотці ротора;

$P_{мех}$ – механічні втрати потужності в двигуні, що зумовлені тертям в підшипниках і ущільненнях;

$\Delta P_{дод}$ – пульсаційні і поверхневі втрати потужності, що виникають в зубцях статора і ротора при обертанні ротора внаслідок пульсації потоку, що проходить в зубець, а також втрат, що викликані вищими гармоніками намагнічувальних сил при навантаженні;

$\Delta P_{ред=}$ – втрати потужності на тертя в редукторі при холостому ході;

$\Delta P_{ред\sim}$ – втрати потужності в редукторі, що залежать від навантаження на валі помольної чаші.

Тоді потужність на валі помольної чаші можна представити у вигляді

$$P_v = P_1 - \Delta P_k - \Delta P_{дв} - \Delta P_c - \Delta P_p - \Delta P_{мех} - \Delta P_{дод} - \Delta P_{ред=} - \Delta P_{ред\sim},$$

$$\text{або } P_v = P_1 - P_{хх}, \quad (1.2)$$

де $P_{хх} = \Delta P_k + \Delta P_{дв} + \Delta P_c + \Delta P_p + \Delta P_{мех} + \Delta P_{дод} + \Delta P_{ред=} + \Delta P_{ред\sim}$ – потужність холостого ходу, яка є постійною величиною для даного електродвигуна і кінематичної схеми помольної чаші за відсутності навантаження.

Користуючись рівнянням (1.2), можна визначити потужність на валі помольної чаші P_v на підставі результатів вимірювань поточного значення активної потужності P_1 і потужності холостого ходу $P_{хх}$. При цьому потрібно враховувати, що вимірюване значення активної потужності P_1 відрізняється від дійсного значення потужності P , виміряного безпосередньо на затискачах електродвигуна, на величину втрат потужності в кабелі ΔP_k довжиною $l \neq 0$.

Відносна похибка вимірювання активної потужності в цьому випадку дорівнює

$$\Delta_p = \left(\frac{P_1 - P}{P} \right) \cdot 100 \% \quad (1.3)$$

Підставляючи в (1.3) значення P_1 із (1.1), отримаємо

$$\Delta_p = \frac{\Delta P_k}{\sqrt{3} U_0 I_0 \cos \varphi} \cdot 100 \% ; \quad (1.4)$$

де U_0 , I_0 – напруга і струм на затискачах електродвигуна при довжині кабелю $l=0$.

Відносна похибка вимірювання потужності збільшується при зростанні струму навантаження. Таким чином, метод енергетичних діаграм може бути використаний для контролю крутного моменту на приводу валу ПЧ, оскільки він не вимагає внесення жодних конструктивних змін в об'єкт контролю.

Методи віброакустичної діагностики. Вібрація ВВМ є результатом його роботи і обумовлюється не тільки кінематичною схемою, але і технічним станом окремих його вузлів і механізмів. В той же час вібрація сприяє зміні технічного стану останніх і є джерелом інформації, завдяки якому можна контролювати цю зміну використовуючи методи віброакустичної діагностики, що базуються на наступному положенні. Розвиток деградаційних (знос, викришування, старіння, і інш.) процесів, які проходять в об'єкті з часом його напрацювання, призводить до зміни супроводжуваних його коливних процесів. Встановивши взаємозв'язок зміни структурного параметру (величини зносу) об'єкта зі зміною характеристик коливних процесів можна контролювати стан об'єкту без його зупинки [28,36,37]. Визначення технічного стану агрегату за параметрами коливних процесів проводиться як за наявністю відповідної інформації в поточний момент часу, так і на основі аналізу тенденції їх зміни в часі.

Перша задача діагностики – контроль стану [28] об'єкта може бути вирішена шляхом нормування рівнів його вібрації для різних станів, для чого за діагностичну ознаку приймається середньоквадратичне значення віброшвидкості, оскільки вона найбільш повно характеризує енергію коливного процесу.

Рівні допустимих значень ефективної віброшвидкості при розробці норм вібрації об'єкта приймаються відповідно до рекомендацій Союзу німецьких

інженерів і стандартів Міжнародної організації по стандартизації (ISO) [38], а в міжнародних стандартах ISO 10816 і ISO 7919 [39,40] передбачається регламентувати середньоквадратичне значення віброшвидкості, яке вимірюється на підшипникових вузлах в залежності від класу машин. Сама процедура розробки норм і принципів нормування рівня вібрації розглядається в [41]. Стосовно ВВМ таких норм вібрацій не розроблено.

Друга задача діагностики – пошук дефектів, який полягає в тому, що необхідно провести комплекс цілеспрямованих експериментальних досліджень, в результаті яких встановлюється взаємозв'язок характеристик вібраційного процесу об'єкту із зміною технічного стану його основних вузлів і механізмів, тобто вибирається діагностична ознака стану об'єкту, яка закладається в основу методу діагностування, що розробляється. Існує значна кількість робіт з розробки методів віброакустичної діагностики в різних галузях промисловості [42,43, 44,45,46,47 і інш.], однак стосовно ВВМ таких досліджень проведено не було.

Розглянемо роботи, які стосуються питань контролю і діагностування технічного стану млинів різних моделей стосовно можливості використання їх при визначенні технічного стану ВВМ.

Так, в [48], як джерело інформації про інтенсивність коливань *барабанного млина* і про міру внутрішньо млинового заповнення, була використана змінна складова сигналу активної потужності привідного електродвигуна у вузькій смузі частот. Експериментальні дослідження змінної складової активної потужності у вузькій смузі інфранизького діапазону частот, підтвердили можливість контролю технологічних змінних процесу подрібнення по амплітуді окремих складових сигналу активної потужності. На основі аналізу сил, діючих в опорних підшипниках барабанних млинів обґрунтована залежність амплітуди коливань активної потужності на частоті оборотів барабана від міри внутрішньо млинового заповнення. Із-за демпфуючих властивостей рудного навантаження амплітуда коливань цапф млина в підшипниках на частоті оборотів барабана зменшується із збільшенням міри заповнення. Змінний момент навантаження проходить через систему приводу і

знаходить своє вираження в коливаннях активної потужності двигуна з частотою оборотів барабана. Практичним вираженням теоретичних і експериментальних досліджень з'явилася розробка електронного двох канального пристрою технологічної діагностики на основі вітчизняних інфранизкочастотних фільтрів. Перший канал пристрою виділяє із змінної складової сигналу активної потужності складову на частоті оборотів барабана, а другий - на частоті коливань центру тяжіння рудного навантаження. В [49] розглянуті шумові і вібраційні характеристики на прикладі конусних і шоккових дробарок і млинів, діагностика вузлів машин, обмеження на режими роботи обладнання. Так, для конусних дробарок КСД- 2200 знос місця посадки подрібнювальної чаші дробарки з утворенням значних проміжків, що призводить до появи ударів чаші об станину може бути визначений за діагностичною ознакою - зростанням загального рівня вібрації і появою великої кількості гармонік частоти гойдань конуса 4,0Гц.

Неправильне розточування сферичного підп'ятника ексцентрика дробарки КСД- 2200Т2-Д, що призводить до кільцевого торкання хвостовика валу конуса об верхню частину ексцентрика можна діагностувати за появою в спектрі вібрацій великої кількості непарних гармонік частоти гойдань конуса значної величини (0,65-3,64 мм/с).

Порушення геометричних розмірів броні, нерівномірні проміжки в просторі дроблення дробарки КМД-2200Т5-Д і як наслідок - поява биття та вихідного продукту різної крупності визначається за появою в спектрі вібрацій непарних гармонік значної величини (0,3-1,0 мм/с) і великої кількості гармонік з частотою обертання вхідного валу величиною 0,1-0,3 мм/с.

Бій шестерні, пов'язаний з неспіввісністю шестерні і валу або викривленням останнього. Причиною неспіввісності може бути невідповідність діаметрів посадочного отвору шестерні і діаметру валу. При розбиранні дробарки виявлено: пляма контакту нерівномірна і на зубах є риски, що говорить про занижений клас обробки зубів; є дефект у вхідного валу; занижений час вибігання. Діагностична ознакою при цьому є підвищена вібрація (0,58-0,95 мм/з по осі В) на частоті обертання привідного валу 9,8 Гц і

значні вібрації (0,3-0,5 мм/с) на частоті зубозачеплення 214,5 Гц та наявність бічних смуг біля цієї частоти, рознесених на частоту обертання вхідного валу 9,8 Гц і частоту гойдань дробарного конуса 3,3 Гц.

Стосовно діагностування *стержневих і кульових млинів* [49], то дефекти шестерні (неоднорідний знос зубів, тріщини і сколи на них, відсутність окремих зубів) і зачеплення зубчастої передачі (зміщення точок контакту зубів відносно розрахункової за рахунок зрушення шестерень один відносно одного уздовж осей обертання, в площині обертання шестерень або під кутом) млина МШЦ-3,6х4, 5 можуть бути діагностовані по великого числа зубцевих гармонік (77,74п Гц) і найбільш сильне зростання гармонік більшої кратності (1-а гарм. - 1,54 мм/с, 2-а - 2,93 мм/с, 3-я - 2,54 мм/с і 4-а - 0,62 мм/с) і наявність біля зубцевих гармонік бокових смуг, рознесених на частоту 8,3 Гц Частота обертання вхідного валу - 2,8 Гц, барабана млина - 0,31 Гц.

Величина вібрації основи зубчастого вінця на частоті зубчастого зачеплення і її 2й гармоніці у вертикальному напрямі вище (рівна) рівня попередження (відповідно 1,50 і 2,93 мм/с), але нижче за рівень "Зупинка" (відповідно 2,24 і 4,44 мм/с). Рівні сигналів тривоги отримані за результатами випробування кульових і стержневих млинів різних типорозмірів.

Дефект зачеплення зубчастої передачі млина МСЦ-3 (зміщення точок контакту зубів відносно розрахункової за рахунок зрушення шестерень відносно один одного уздовж осей обертання, в площині обертання шестерень або під кутом).

Діагностична ознака - поява великого числа зубцевих гармонік (60,96п Гц; 1а гарм. - 2,82 мм/с, 2а - 1,32 мм/с, 3я - 0,23 мм/с і 4а - 0,10 мм/с) і зубцевих півгармонік ($254/2 \times (2п - 1)$). Величина вібрації основи зубчастого вінця на частоті зубчастого зачеплення в горизонтальному напрямі вище рівня попередження (2,23 мм/с), але нижче за рівень "Зупинка" (3,34 мм/с), а на частоті 2ї, 3ї і 4ї гармонік - нижче за рівень попередження (відповідно 1,68, 0,29 і 0,28 мм/с).

Щічна дробарка [49] Такий дефект, як тріщини на зовнішній обіймі корінного підшипника можуть бути визначені за підвищеною вібрацією

корінного підшипника на частоті перекочування тіл кочення по зовнішній обоймі і її 2й і 3й гармоніках. Отримані результати по діагностуванні подрібнювально-розмельного устаткування, що проектується ТзОВ "ОМЗ - подрібнювально-розмельного устаткування", були покладені в основу розробки стаціонарної системи моніторингу і діагностики вузлів конусної дробарки великого дроблення ККД- 1500/180 "ПРОТОН-1000", яка забезпечує вимірювання вібраційних параметрів контрольованих вузлів (підшипників кочення, ковзання, зубчастих зачеплень, двигунів, пасової передачі) дробарки і отримання достатньої інформації для поглибленого аналізу стану устаткування і рішення діагностичних завдань.

В [50] розглядається метод діагностування перевантаження кульових дробарок рудою на основі закономірностей формування звукометричного сигналу. Результати досліджень встановлено, що сила звуку, яка генерується млином, визначається, в основному, кінетичною енергією куль, що падають, переходять з параболічних на кругові траєкторії руху в млині в зоні установки акустичного давача. При перевантаженні кульових барабанних млинів рудою різко зменшується сила звуку, що видається млином, а також частота звукометричного сигналу, що може бути використано при технологічній комп'ютерній діагностиці і недопущенні аварійних перевантажувальних режимів роботи млина. Вказано, що у подальших дослідженнях необхідно розглянути проблему формування інформативних ознак звукометричних сигналів за допомогою вейвлет-перетворення сигналів.

В [51] розглядаються питання підвищення ефективності роботи млинів дискових (МД) шляхом їх віброзахисту і вібродіагностики на основі теоретичних і експериментальних досліджень їх вібрації. Показано, що процеси в камері помолу є потужними джерелами збудження вібрації МД, що істотно перевищують по потужності вібрацію від дефектів підшипників, муфт і інших вузлів. Встановлено, що основними частотами збуджуючих коливання сил є секторні і оборотні частоти МД. У спектрах чітко проявляються власні частоти коливань різних вузлів МД, що модулюються оборотними і секторними частотами гарнітури млинів, а також комбінаційні частоти. За результатами

проведених досліджень виявлені структурні параметри технічного стану підшипників, муфт, електродвигунів і гарнітури МД і визначені їх діагностичні ознаки. Проведено уточнення норм середньоквадратичного значення віброшвидкості вібрації підшипників МД згідно з новітніми стандартами ІСО. Визначені норми відхилень дисків ротора і статора МД при перекосі з урахуванням граничних зон станів і градації МД за розмірами диска ротора. Основним і визначальним критерієм при обґрунтуванні норм є вплив відхилень дисків на технологічний процес.

Розглянуті вище методи діагностування дефектів конкретних вузлів різних моделей млинів не можуть бути використані для контролю зношення помольних валків і бігової доріжки помольної чаші ВВМ, що обумовлюється як конструктивними особливостями ВВМ так і принципом його роботи, а також відсутністю результатів дослідження вібростану основних вузлів ВВМ та розробленими нормами їх вібрації.

Використання методів ідентифікації об'єктів з метою контролю їх технічного стану є ще одним напрямком технічної діагностики машин і механізмів [52,53,54,55,56,57 і інш.]

Використання їх стосовно визначення технічного стану робочих органів можна обґрунтувати виходячи із зміни характеру розгінну характеристику ВВМ в залежності від величини зносу його робочих органів. Оскільки знос ПВ та БД помольної чаші призводить до деякого зменшення їх маси, як відмічено в [17], можна припустити, що при цьому змінюються динамічні характеристики ВВМ, що може виявлятися у зміні кривої розгону.

Розгінна характеристика ВВМ - це крива зміни швидкості обертання помольної чаші при її включенні. Розгінну характеристику можна розглядати як відгук системи на функцію Хевісайда – сигнал включення установки, тобто ПХ системи. Знаючи перехідну характеристику, можна оцінити параметри об'єкта (наприклад, коефіцієнти поліномів або значення нулів і полюсів дробово-раціональної функції передачі) одним із відомих методів. Таким чином, необхідно вирішити задачу ідентифікації лінійної системи за ПХ і встановити наявність та характер залежності між величиною зносу або часом

напрацювання об'єкта, з одного боку, та значеннями параметрів його передавальної функції – з іншого.

В загальному випадку задача ідентифікації вирішується для довільних вхідних та вихідних сигналів, а також з врахуванням збурюючих сигналів та запізнення. Сигнали представляються у вигляді послідовностей дискретизованих значень, виміряних з деякою частотою дискретизації. Найбільш загальна модель дискретної системи має вигляд:

$$A(z) \cdot y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} \cdot z^{-nk} \cdot u(t) + \frac{C(z)}{D(z)} \cdot e(t), \quad (1.5)$$

де $y(t)$ – вихідний сигнал, $u(t)$ – вхідний сигнал, $e(t)$ – сигнал завади (збурення), nk – запізнення,

$$A(z) = 1 + \sum_{k=1}^{na} a_k z^{-k}, \quad D(z) = 1 + \sum_{k=1}^{nd} d_k z^{-k}, \quad F(z) = 1 + \sum_{k=1}^{nf} f_k z^{-k},$$

$$B(z) = \sum_{k=0}^{nb} b_k z^{-k}, \quad C(z) = \sum_{k=0}^{nc} c_k z^{-k}.$$

Наявність або відсутність окремих елементів у формулі (1.5) визначає тип моделі. Найпростішою моделлю є авторегресійна:

$$A(z) \cdot y(t) = e(t),$$

де розглядається лише реакція системи на збурення. В цій моделі взагалі відсутній вхідний сигнал, тому вона не може бути застосована для вирішення поставленої задачі.

Також знаходять використання наступні моделі:

- авторегресійна із зовнішньою дією:

$$A(z) \cdot y(t) = B(z) \cdot z^{-nk} \cdot u(t) + e(t);$$

- авторегресійна із зовнішньою дією та ковзним середнім:

$$A(z) \cdot y(t) = B(z) \cdot z^{-nk} \cdot u(t) + C(z) \cdot e(t);$$

- модель «вихід-помилка»:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} \cdot z^{-nk} \cdot u(t) + e(t);$$

- модель Бокса-Дженкінса:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} \cdot z^{-nk} \cdot u(t) + \frac{C(z)}{D(z)} \cdot e(t);$$

- модель змінних стану:

$$x(t+Ts) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t),$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t),$$

де A, B, C, D, K – матриці порядків відповідно $n \times n, n \times 1, 1 \times n, 1 \times 1, n \times 1$, а n – порядок моделі.

Параметрами, які визначаються в процесі ідентифікації, є коефіцієнти поліномів дискретних функцій передачі відносно вхідного сигналу $u(t)$ та збурення $e(t)$. Для невеликого порядку моделі можна використати ці коефіцієнти або значення нулів і полюсів даних поліномів для визначення деякої інтегральної ознаки, яка характеризуватиме степінь зносу поверхні робочих органів млина.

Ідентифікацію лінійних динамічних систем розглянутими вище методами можна реалізувати в середовищі Matlab у пакеті System Identification Toolbox [58,59].

1.4. Обґрунтування і вибір напрямку досліджень

Аналіз конструкції ВВМ показав, що він є основним елементом вугільного комплексу системи помолу вугілля, мета функціонування якого полягає в забезпеченні безперебійного механічного впливу на куски вугілля за допомогою робочих органів ВВМ – ПВ та БД ПЧ. В процесі експлуатації останніх їх робочі поверхні підлягають значному зношуванню, який призводить як до зниження ефективності процесу помолу вугілля так і якості вихідного продукту - пилевугільної суміші, що характеризується тониною помолу.

На процес зношування робочих органів ВВМ, як показав проведений аналіз, впливають навантаженість останніх, втома, знос, відмови, обумовлені конструкторсько-технологічними причинами, а також динамічні процеси (вібрація). Вібрація, яка виникає в процесі експлуатації ВВМ, призводить до зношування робочих органів і, як наслідок, до зміни статичних навантажень на них, але і зміна останніх викликає подальше збільшення рівня вібрації.

Проведений аналіз конструктивних особливостей робочих органів ВВМ як об'єкту контролю їх технічного стану показав, що конструкція ВВМ є неконтролепридатною, тобто не дозволяє встановлювати, при необхідності, давачі і засоби для контролю технічного стану його робочих органів, оскільки контроль останніх в процесі експлуатації не передбачений. Сьогодні контроль технічного стану передбачає процедуру зупинки ВВМ і проведення вимірювань величини зношування робочих поверхонь ПВ та БД прямим методом.

Відсутність існуючих методів оперативного контролю технічного стану робочих органів ВВМ, як показав проведений аналіз, вимагає розробки таких методів. Одним із напрямків його вирішення є використання методів параметричної діагностики, оскільки за зміною окремих параметрів, що характеризують процес експлуатації ВВМ, як показав проведений аналіз, опосередковано можна оцінити стан його робочих органів. Іншими напрямками є використання методів віброакустичної діагностики, оскільки основний вплив на зміну стану його робочих органів здійснює вібрація, а також, виходячи із конструктивних особливостей ВВМ та його неконтролепридатності, методів ідентифікації об'єктів за ПХ ВВМ.

З метою розробки методів контролю технічного стану робочих органів ВВМ на основі розглянутих вище методів необхідно:

- розробити теоретичні засади методу контролю технічного стану робочих органів ВВМ в процесі його експлуатації;
- провести комплекс цілеспрямованих експериментальних досліджень на діючому ВВМ для виявлення ДО його технічного стану та розробити для цього їх методичне, технічне та програмне забезпечення;
- розробити алгоритми та методи контролю технічного стану робочих органів млина в процесі його експлуатації;
- розробити технічні та програмні засоби для реалізації методу контролю технічного стану робочих органів ВВМ;
- провести промислову апробацію і впровадження розроблених методів і засобів контролю технічного стану робочих органів ВВМ на ВАТ «Івано-Франківськцемент».

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВАЛКОВОГО МЛИНА

Успішний розв'язок задачі контролю технічного стану передбачає наявність моделі об'єкта контролю, що відображає зв'язки інформативного параметра (діагностичної ознаки технічного стану) з параметрами і показниками процесу помолу вугілля. При цьому можуть бути використані два методи побудови моделей ВВМ: один з них базується на вивченні фізико-механічної природи процесу помолу, а другий - на використанні формально-емпіричних математичних залежностей, отриманих в результаті статистичного дослідження процесу помолу вугілля. Статистичні математичні моделі мають вигляд регресивних і кореляційних співвідношень між параметрами вхідних і вихідних технологічних потоків [60,61].

Ці математичні моделі якісно і кількісно більш вірно відображають процес функціонування і властивості системи навіть при наявності недостатньо точних (у кількісному відношенні) параметрів моделі і дозволяють досліджувати загальні властивості об'єкту. Виходячи з цього, в розділі розглядаються два види моделей ВВМ та процесу помолу вугілля, на основі яких будуть розроблені методи контролю його технічного стану.

2.1. Розроблення узагальненої моделі ВВМ

Виходячи з розглянутих в розд. 1 конструктивних особливостей ВВМ та впливових факторів, що призводять до зміни технічного стану ПВ та БД, в першому наближенні узагальнену модель ВВМ можна подати у вигляді [2] (рис. 2.1).

Фактори (параметри і показники), що обумовлюють процес помолу вугілля у ВВМ поділені на наступні:

1. Вхідні параметри $\bar{X}(t)$, що характеризують процес помолу: об'єм сирого вугілля Q_s ; об'єм сушильних газів (гарячого повітря) Q_n , температура гарячого

повітря T_n , частота обертання ПЧ n_c , вологість сирого вугілля B_b , потужність приводу ПЧ P_n .

$$\bar{X}(t) = [Q_b(t), Q_n(t), T_n(t), n(t), n_c(t), B_b(t), P_n(t)]^T. \quad (2.1)$$

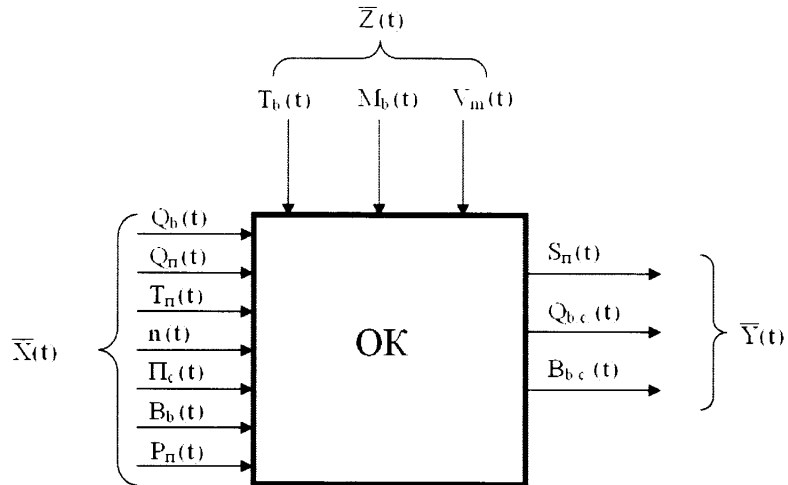


Рис. 2.1 Узагальнена модель об'єкту контролю технічного стану робочих органів ВВМ

2. Вихідні параметри $\bar{Y}(t)$, що характеризують якість вихідного продукту: S_n -тонина помолу, об'єм отриманого продукту $Q_{b.c.}$, та її вологість $B_{b.c.}$.

$$\bar{Y}(t) = [S_n(t), Q_{b.c.}(t), B_{b.c.}(t)]^T. \quad (2.2)$$

3. Збурюючі параметри $\bar{Z}(t)$: температура сирого вугілля T_b , фізико-механічні властивості сирого вугілля M_b , вібрація ВВМ V_m , технічний стан ПВ C_m .

$$\bar{Z}(t) = [T_b(t), M_b(t), V_m(t), C_m(t)]^T. \quad (2.3)$$

Як видно з моделі (рис.2.1) процес отримання кінцевого продукту є багатомірним технологічним оператором, символічна модель якого може бути записана у вигляді функціональної залежності:

$$\bar{Y}(t) = F_i [X(t), Z(t)], \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.4)$$

де $\bar{Y}(t)$ - вектор фізичних параметрів вихідного продукту, якість якого залежить як від вхідних параметрів $\bar{X}(t)$ так і збурюючих впливів, що обумовлюють зміну технічного стану робочих органів.

Для правильного вибору ДО стану ВВМ визначено клас задачі діагностування. Враховуючи, що процес отримання вихідного продукту є нестационарним випадковим процесом, який розвивається в часі і між точками

простору параметрів стану Y і простору спостережень Y_c немає однозначної відповідальності, вважаємо, що цей варіант діагностування відповідає визначенню подій в умовах невизначеності [62]. Використання методів і засобів діагностування може зменшити невизначеність стану об'єктів. Для цього в розд. 3 проведемо аналіз параметрів і показників процесу помолу вугілля з точки зору виявлення найбільш раціональних з них, які можна прийняти за ДО.

В той же час в модель ВВМ входять параметри і показники такі як потужність приводу ПЧ $P_n(t)$ та вібрація $V_m(t)$ (рис.2.1), що вже широко використовуються як ДО стану різноманітного технологічного обладнання [28,59 і інш.].

2.2. Аналітичні дослідження взаємодії кусків вугілля різної форми з помольною чашею в процесі їх руйнування у ВВМ

Виходячи із розглянутих в розд. 1 конструктивних особливостей ВВМ розглянемо процес взаємодії кусків вугілля з біговою доріжкою та валком, який залежить від форми куска вугілля, його розташування та розмірів. В таблиці 2.1 приведені характерні розміри та форми кусків вугілля, отримані в результаті проведеного аналізу вугілля марки СССШ компанії «Krutrade A.G.» ВАТ «Оф. Юг - Сиб» (Хутор «Светлый», Каменського району, Ростовської обл., Росія) та марки ССМШ компанії «Saintmarine Ltd.» ВАТ «Разрез Октябрьский» (м. Кісельовськ, Кемеровської обл. Росія), які є основним постачальником вугілля для ВАТ «Івано-Франківськцемент».

Дослідження будемо проводити виходячи з наступного розташування кусків вугілля на БД ПЧ [64] (рис. 2.2).

У першому випадку (рис. 2.2, а), його можна розподілити на такі варіанти.

1.1 Кусок вугілля не зтягується в зовнішню щілину між валком і біговою доріжкою.

1.2 Частина куска вугілля потрапила у щілину між валком та біговою доріжкою.

1.3 Кусок вугілля зтягується в щілину між валком та біговою доріжкою.

Характерні геометричні розміри та форми кусків вугілля

№	Наближена форма	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм
1	Паралелепіпед	42	25	31
2	Паралелепіпед	26	33	31
3	Паралелепіпед	34,5	25	29
4	Еліпсоїд	45,5	29,5	9
5	Еліпсоїд	46,6	13,5	12
6	Кулька	20	9	19,5
7	Похилий еліпсоїд	24	24÷13	12÷12,5
8	Просторовий клин	35,5÷28,5	20÷0	13÷0
9	Наближено - еліпсоїд загострений	23,5÷22	17÷14	10÷0
10	Наближено призматичний клин	24,5*16	16÷0	8÷10
11	Заокруглений односторонній еліпсоїд	24,5	14,5÷19	12
12	Двостороння сокира	0÷22	17÷12	12÷0

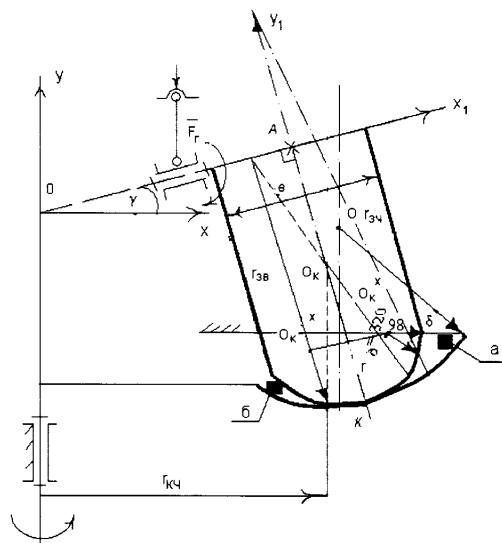


Рис. 2.2 Розрахункова схема взаємодії куска вугілля з ПВ та БД ПЧ при:

а- розташуванні його біля периферійної частини БД;

б - при розташованні його у заокругленій частині ПВ та БД

Варіант 1.1 буде мати місце тоді, коли форма та розміри куска вугілля є такими, що не дозволяють потрапити ззовні в щілину між ПВ та БД. Зокрема цьому варіанту відповідає розмір щілини в 16 мм при $\gamma = 18^\circ$, 21 мм при $\gamma = 19^\circ$ та 26 мм при $\gamma = 20^\circ$, а жодний з розмірів куска вугілля, більший за вказані розміри. Тоді руйнування вугілля роздавлюванням та стиранням буде

відсутнім, якщо не враховувати взаємодію окремих частинок подрібненого вугілля між собою.

Притискаючись до вертикальної стінки БД ПЧ, кусок вугілля буде рухатися заодно з БД, як і куски вугілля біля центру обертання. Якщо врахувати дію інших частинок подрібненого вугілля, цей кусок вугілля буде незначно стиратися вказаною стінкою БД за взаємного тертя між частинами вугільної маси, які мають швидкість, що є меншою відносно тієї, що розглядається. Наприклад, куски вугілля, що контактують з ПВ збоку, будуть мати відносну кутову швидкість приблизно в 1,6 разів меншу, ніж швидкість кусків вугілля, розташованих біля центра.

Варіант 1.2. Цьому варіанту відповідають такі розміри та форми кусків вугілля, що дозволяють більш тонкій її частині увійти в щілину між ПВ та БД, а більш товстішій - ні.

Основними параметрами ПВ та БД, які дозволяють певній частині куска вугілля потрапити у щілину, є кути нахилу дотичних, що проведені до заокруглених частин ПВ та БД.

Для їх знаходження складаємо систему рівнянь, виходячи з того, що рівняння дуги заглибленої частини БД описується таким рівнянням кола в системі координат ХОУ (рис.2.2):

$$(x - x_{oc})^2 + (y + y_{oc})^2 = r_{3ч}^2,$$

де $x_{oc} \approx 635\text{мм}$, $y_{oc} \approx -30\text{мм}$ - координати центра кола;

$r_{3ч} \approx 420\text{мм}$ - радіус заокругленої частини БД.

Рівняння контактної частини ПВ описується таким рівнянням кола в системі координат Х,АУ, Х₁АУ₁:

$$x_1^2 + (y_1 - AO_k)^2 = r_{3в}^2,$$

де $AO_k = 380\text{мм}$ – ордината положення центра заокруглення валка, $r_{3в} = 226\text{мм}$ - радіус заокруглення ПВ.

$$\begin{cases} (x - x_{oc})^2 + (y + y_{oc})^2 = r_{3ч}^2 \\ x_1^2 + (y_1 - AO_k)^2 = r_{3в}^2 \end{cases}, \quad (2.5)$$

де $A^x O_k^x = 497\text{мм}$; $r_{3в}^x = 73\text{мм}$.

Перенесемо систему координат x_1Ay на величину $AO^x = 143 + 585 = 728\text{мм}$ та повернемо потім на кут γ , після чого отримаємо:

$$(x \cos \gamma - y \sin \gamma + AO^x)^2 + (x \sin \gamma + y \cos \gamma - A^x O_k^x)^2 = (r_{3\delta}^x)^2. \quad (2.6)$$

Знайдемо з (2.5) похідну спочатку з першого рівняння системи

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-x + x_{0_4}}{y_{0_4} - r_{3\delta}^2 - (x - x_{0_4})^2}, \quad (2.7)$$

а потім з рівняння (2.6):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{(x \cos \gamma - y \sin \gamma + AO^x) \cos \gamma + x(\sin \gamma + y \cos \gamma - A^x O_k^x) \sin \gamma}{A^x O_k^x \cos \gamma + A^x O \sin \gamma - 0,5x \sin \lambda \gamma - y}, \quad (2.8)$$

$$y_{1,2} = x \sin 2\gamma + A^x O \sin \gamma - A^x O_k^x \cos \gamma \pm \sqrt{[x \sin 2\gamma + A^x O \sin \gamma - A^x O_k^x \cos \gamma]^2 - (x \cos \gamma + A^x O)^2 - (x \sin \gamma - A^x O_k^x)^2}.$$

З рівняння (2.7) у точці з координатами $x=873,6$ мм; $y=-349,9$ мм, а з рівняння (2.8) у точці з координатами: $x=857,6$ мм, для $\gamma=18^0$; $852,6$ мм для $\gamma=19^0$ та $847,6$ мм для $\gamma=20^0$ знаходимо кути нахилу дотичних $\alpha_ч$ та $\alpha_в$, під якими буде ковзати кусок вугілля (рис.2.3).

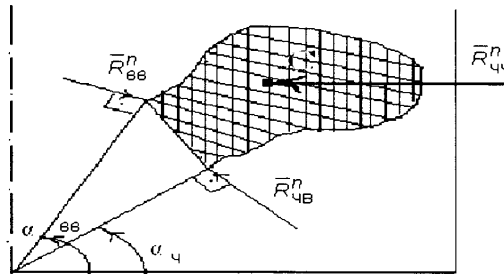


Рис. 2.3 Динаміка сил, що діють на кусок вугілля під дією ПВ та БД

На нього під кутом $\alpha_{вв}=\gamma+\alpha_в$ будуть тиснути точки валка з силою $R_{вв}^n$, а збоку чаші - $R_{чв}^n$ під кутом $\alpha_{чв} = \alpha_ч$. Вертикальні проекції цих реакцій в статиці

зрівноважуються: $R_{чв}^n \cos \alpha_{ч} = R_{вв}^n \cos \alpha_{вв}$, тому $R_{чв}^n = R_{вв}^n \frac{\cos \alpha_{вв}}{\cos \alpha_{ч}}$,

а для горизонтальних проекцій маємо

$$R_{вв}^n \sin \alpha_{вв} - R_{чв}^n \sin \alpha_{ч} = m_i \omega_ч^2 r_c, \quad (2.9)$$

де $m_i \omega_ч^2 r_c = R_{\gamma r}$ - реакція вертикальної оцінки, яка дорівнює відцентровій силі куска вугілля масою m_i та горизонтальною координатою r_c його центра мас.

З рівняння (2.9) отримуємо

$$R_{\text{ВВ}}^n = \frac{m_i \omega_{\text{ч}}^2 c_i}{\sin \alpha_{\text{ВВ}} + \cos \alpha_{\text{ВВ}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{ч}}}; \quad R_{\text{ЧВ}}^n = \frac{m_i \omega_{\text{ч}}^2 c_i \cos \alpha_{\text{ВВ}}}{\sin(\alpha_{\text{ВВ}} + \alpha_{\text{ч}})}.$$

Сили тертя, які напрямлені перпендикулярно до площин тертя, будуть

$$F_{m_i} = f_{\text{в}} R_{\text{ВВ}}^n + f_{\text{р}} R_{\text{ВЧ}}^r,$$

де $f_{\text{в}}$ і $f_{\text{ч}}$ - відповідні коефіцієнти тертя ковзання вугілля по ПВ та БД. Якщо вони будуть більшими за $m_i f_0 g$ - сили тертя спокою, тоді кусок вугілля розпочне ковзати в межах контактної зони валка зі швидкістю, яка спочатку зросте від 0

$$\text{до } \Delta v = \omega_{\text{ч}} \cdot r_{\text{с}} - \omega_{\text{ч}} \left(\frac{c_{\text{кч}} - \Delta x}{r_{\text{кв}} - \Delta x \cos \gamma} \right) r_{\text{вч}},$$

де $r_{\text{ч}} = 545 \text{ мм}$, а потім спадає з Δv до 0.

У цьому випадку момент $M_{\text{В}}$ зросте на величину $(f_{\text{в}} R_{\text{ВВ}}^n + f_{\text{р}} R_{\text{ВЧ}}^n) r_{\text{вч}} \cos \gamma_i$, якщо запасу зчеплення ПВ з БД не буде достатньо, він може розпочати пробуксовувати або зупинитися. Тоді швидкість ковзання може зрости до $\omega r_{\text{с}}$, що збільшить інтенсивність процесу зношування периферійних частин як БД, так і ПВ.

Якщо в результаті стирання кусок вугілля звільнить ПВ від заклинювання, тоді останній поступово відновить початкову швидкість $\omega_{\text{В}}$.

Як зупинка, так і відновлення будуть відбуватися за законом

$$I_{\text{в}} \varepsilon_{\text{в}} = K_0 F_{\text{ч}} + K_{\text{В}} F_{\text{ч}} \cos \gamma + M_{\text{кк}}^x,$$

де $M_{\text{кк}}^x$ - момент сил опору самовстановлюваності, що визначається за формулою [62], якщо замінити $\sin \gamma$ на $\cos \gamma$.

Варіант 1.3. У цьому випадку куски вугілля розпочнуть потрапляти в щілину, де за рахунок зменшення відстані між БД та ПВ у заокруглених їх частинах буде зменшуватися різниця швидкостей ковзання і, відповідно, інтенсивність процесу їх зношування.

Розмір щілини по горизонталі та вертикалі можна знайти з системи рівнянь (2.5). Для цього потрібно задатися певним значенням “у” в межах

$349,5 \text{ мм} \leq y \leq 441,5 \text{ мм}$ та знайти з першого рівняння системи (2.5) – $x_ч$, а з рівняння (2.6) – $x_в$. Їх різниця $\Delta x = x_ч - x_в$ визначить раціональний просвіт щілини.

Задаючись значенням “ x ” з (1) в межах $647,5 \text{ мм} \leq x \leq 873,5 \text{ мм}$, знаходимо $y_ч$, а з (2) – $y_в$ та їх різницю $\Delta y = y_ч - y_в$, яка визначить просвіт щілини по вертикалі.

Швидкість ковзання можна визначити з рівняння

$$\Delta v_3 = \left(r_{iч} - \frac{(r_{кч} - \Delta x)r_{ік}}{r_{кв} - \Delta x \cos \gamma} \right) \omega_ч,$$

де $r_{iч} = x$, а $r_{кв}$ змінюється в межах $y_в / \cos \gamma$,

$$\text{тобто } \Delta v_3 = \omega_ч \left(x - \frac{(r_{кч} - \Delta x)y_в}{(r_{кв} - \Delta x \cos \gamma) \cos \gamma} \right). \quad (2.10)$$

Випадок 2. У цьому випадку куски вугілля будуть потрапляти по ширині западини БД у простір під ПВ за рахунок перевищення лінійних швидкостей її точок над лінійними швидкостями точок ПВ, наприклад, при контакті точок куска вугілля по горизонталі, буде затягувати куски вугілля під ПВ. Останній буде їх розчавлювати та дещо розтирати.

Для можливості роздавлювання куска вугілля потрібно забезпечити виконання умови

$$\frac{F_ч \cos \gamma}{S_в} > [\sigma]_{кв}, \quad (2.11)$$

де $S_в$ – площа контакту з вугіллям; $[\sigma]_{кв}$ – допустиме контактне напруження вугілля.

Якщо умова (2.11) не виконана, тоді цей валок, обертаючись, почне зменшувати кут γ , виходячи з розміру h куска вугілля в межах $10 \text{ мм} \leq h \leq 42 \text{ мм}$ (див. таблицю 2.1).

При переході через цей кусок вугілля ПВ може (при певній формі куска вугілля) з ударом відновити контакт з БД. Тоді силу удару ПВ по БД можна визначити (якщо не враховувати наявний прошарок вугілля по чаші та динаміку повороту на $\Delta \gamma$) так: зближення центрів $y_ч$ БД та $y_в$ ПВ розглянемо тільки по вертикалі (у зв'язку з незначним значенням γ), вважаючи, що на ПВ діє сила $F r \cos \gamma$.

Спільним зближенням їх буде різниця

$$\Delta y = y_ч - y_г. \quad (2.12)$$

Рівняння руху мають вигляд

$$\begin{aligned} m_г \ddot{y}_г &= F_r \cos \gamma - F(y); \\ m_ч \ddot{y}_ч &= F(y), \end{aligned}$$

де $F(y)$ - шукана сила удару.

Підставляючи (2.12) в ці рівняння, отримуємо

$$y = \frac{F(y)}{m_ч + m_г} - \frac{F_ч \cos \gamma}{m_г}.$$

Перший інтеграл дає

$$0,5 \dot{y}^2 = \frac{1}{m_ч + m_г} \int F(y) dy - \frac{y F_ч \cos \gamma}{m_г} + C.$$

На початок удару швидкість валка за законом падіння при наявності сили $F_ч \cos \gamma$ була

$$v_0 = - \sqrt{2d \left(g + \frac{F_ч \cos \gamma}{m_г} \right)},$$

де d - розмір (товщина) куска вугілля, а час падіння $t = \sqrt{\frac{2dm_г}{G_г + F_ч \cos \gamma}}$.

$$\text{Тоді } 0,5 \dot{y}^2 = \frac{1}{m_ч + m_г} \int F(y) dy - y \frac{F_ч \cos \gamma}{m_г} - \sqrt{2d \left(g + \frac{F_ч \cos \gamma}{m_г} \right)}.$$

Найбільше зближення буде тоді, коли $\dot{y} = 0$.

$$\text{Як відомо [63] } F_{\max} = K_F y^{3/2}, \text{ тому } \int_0^{y_{\max}} F(y)_{\max} dy = \int_0^{y_{\max}} K_F y^3 dy = 0,4 K_F y_{\max}^{5/2}.$$

$$\text{Тоді з рівняння } 0,4 K_F y_{\max}^{5/2} - \frac{F_ч \cos \gamma}{m_г} y_{\max} - \sqrt{2d \left(g + \frac{F_ч \cos \gamma}{m_г} \right)} = 0$$

знаходимо y_{\max} і, підставляючи у вираз (2.13), знайдемо F_{\max} .

Для заокруглених форм частини ПВ та БД маємо такі значення параметрів, які фігурують у рівняннях для F_{\max} :

$$K_F = \frac{2E\sqrt{r-1}}{3(1-\mu^2)};$$

$E = \frac{E_q E_g}{E_q + E_g}$ - зведений модуль пружності матеріалів ПВ та БД; μ - коефіцієнт

Пуассона.

$$r = \left(\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right)^{-1} - \text{зведений радіус кривизни};$$

r_{21} - радіус центра кривизни чаші ($r_{21} < 0$);

r_{22} - радіус заокруглення впадини чаші ($r_{21} < 0$);

r_{11} - радіус контактної частини валка відносно осі його обертання ($r_{11} > 0$);

r_{12} - радіус більшого заокруглення валка $r_{12} > 0$.

Максимальний питомий тиск знайдемо за допомогою рівняння

$$P_{\max} = K_p \sqrt[3]{F_{\max} \frac{E}{r}}, \quad (2.13)$$

$$\text{де } K_p \approx 0,2295 \left[1 - \left(1 - \frac{r_y}{r_x} \right)^3 \right]^{0,189}; \quad r_x = \frac{2}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} - \Phi}; \quad r_y = \frac{2}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} + \Phi};$$

$$\Phi = \sqrt{\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right)^2 + \left(\frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right)^2} + 2 \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \right) \left(\frac{1}{r_{21}} - \left(\frac{1}{r_{22}} \right) \right) \cos \gamma.$$

Тут $r_{11} = 596 \text{ мм}$; $r_{12} = 226 \text{ мм}$; $r_{21} = -627 \text{ мм}$; $r_{22} = -493 \text{ мм}$.

Кутом захоплення називається кут, утворений двома дотичними, проведеними до поверхні БД та ПВ у точках торкання їх з вугіллям. В процесі затягування на кусок вугілля діє сила тиску ПВ, реакція БД, та сили тертя, які безпосередньо його затягують в простір між ПВ та БД (приймаємо по центру заокругленої частини ПВ). Нехай між ПВ та БД прошарок вугілля утворив зазор S , а ПВ обертається завдяки тертю між БД, ПВ та вугіллям.

У першому наближенні будемо вважати, що кусок вугілля має паралелепіпеду чи кубічну форму розміром на контакті d з однаковим коефіцієнтом тертя по БД та ПВ, а між нею та ПВ прошарку вугілля немає. Тоді ПВ спроектовується на вертикальну вісь у вигляді еліпсу, як показано на рис.2.4, а рівняння статичної рівноваги в проекціях будуть мати вигляд

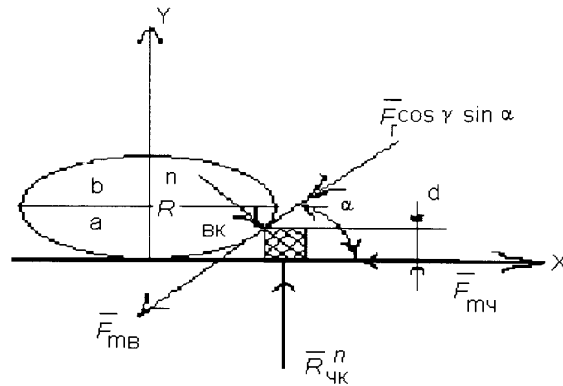


Рис. 2.4 Схема взаємодії куска вугілля з ПВ

$$R_{\text{вк}}^n \sin \alpha - F_{\text{мв}} \sin \alpha - F_{\text{г}} \cos \gamma \sin \alpha \cos \alpha - F_{\text{мч}} = 0,$$

$$-R_{\text{вк}}^n \cos \alpha - F_{\text{мв}} \cos \alpha - F_{\text{г}} \cos \gamma \sin^2 \alpha + R_{\text{чк}}^n = 0.$$

Звідки, враховуючи, що $R_{\text{вк}}^n = F_{\text{г}} \cos \gamma \cos \alpha$, маємо

$$f \geq \frac{1}{1 - \sin \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha)}. \quad (2.14)$$

Умова (2.14) є гарантією, що кусок вугілля буде потрапляти у простір вузького місця між валком та біговою доріжкою.

Кут α знаходиться з рівняння еліпса з великою віссю $a = r_{\text{вк}}$ та малою $b = r_{\text{вк}} \cos \gamma$.

$$\frac{(x - \epsilon)^2}{\epsilon^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1. \quad (2.15)$$

Торкання буде відбуватися в точці $y_0 = d$ та $x_0 = \epsilon \left[1 + \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}} \right]$, дотична в якій знайдеться диференціюванням (2.11) по x , а кут захоплення

$$\alpha = \arctg \left[\frac{2a \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2}}}{bd} \right]. \quad (2.16)$$

Розглядаючи можливі границі зміни розмірів куска вугілля d та кута γ можна знайти такі їх значення, які будуть задовільняти умові (2.14).

Випадок взаємодії куска вугілля з немеридіанним січенням ПВ не розглядаємо, оскільки при накочуванні ПВ на цей кусок вугілля останній буде відтискуватися у периферійну частину БД, де взаємодія буде відбуватися майже так, як розглянуто у варіанті 1.3.

Проведені аналітичні дослідження взаємодії куска вугілля різної форми та розмірів з поверхнею БД та ПВ в процесі його руйнування для двох випадків розташування куска вугілля на БД - біля периферійної частини БД і при розташованні його у заокругленій частині ПВ та БД.

Для першого випадку розглянуті три можливих варіанти: кусок вугілля не зтягується в зовнішню щілину між ПВ та БД; частина куска вугілля потрапила у щілину між ПВ та БД і кусок вугілля зтягується в щілину між ПВ та БД.

Враховуючи, що процес руйнування (помолу) вугілля одночасно супроводжується процесом зношуванням робочих поверхонь ПВ та БД, отримані емпіричні залежності можуть бути використані при побудові діагностичних моделей ПЧ млина з подальшою розробкою на їх основі методів контролю технічного стану її робочих органів.

2.3. Аналітичні дослідження процесу початкового завантаження вугілля у помольну чашу та його руйнування

Враховуючи, що процес початкового завантаження вугілля зі шнекового дозатора в ПЧ та положення, що воно займає на її БД, впливає на характер взаємодії вугілля з БД та ПВ в процесі його помолу і, відповідно, визначає характер зношування останніх, проведемо дослідження цього процесу, виходячи з наступного припущення [66]:

1. Опором руху куска вугілля можна знехтувати.
2. В початковий момент кусок вугілля рухався горизонтально з постійною швидкістю v_0 .
3. На робочій поверхні БД ПЧ відсутні куски вугілля.

Останнє припущення приймається з метою врахування найбільш небезпечного випадку взаємодії куска вугілля з робочою поверхнею БД, що має місце в початковий момент руху ПЧ (після повного її очищення від вугілля).

Визначаємо закон руху окремого куска вугілля, який падає з висоти h_m .

Враховуючи, що віддаль до зустрічі куска вугілля з поверхнею ПВ (висота падіння) буде меншою, ніж з поверхнею БД, розглянемо останній випадок (рис.2.5).

Швидкість руху по вертикалі ОУ визначаємо з формули $v_y = \sqrt{2h_m g}$,

де g – прискорення вільного падіння, а повна швидкість $v_n = \sqrt{v_0^2 + v_y^2}$.

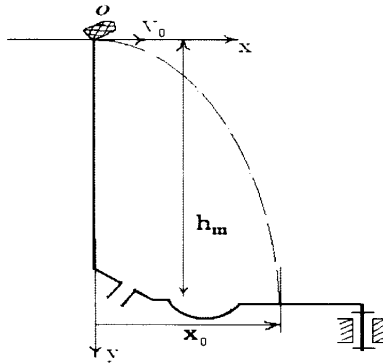


Рис. 2.5 Розрахункова схема дослідження руху куска вугілля

Відстань x_0 , на якій зустрінеться поверхня БД дорівнює $x_0 = v_0 \sqrt{\frac{2h_m}{g}}$, а кут, під яким впаде кусок вугілля, має вид: $\varphi_0 = \arctg \frac{v_0}{v_y}$.

Параметричне рівняння траєкторії руху центра мас куска вугілля має вид

$$\begin{aligned} x &= v_0 t; \\ y &= 0,5 g t^2. \end{aligned}$$

Виключаємо з цих рівнянь час t , тоді отримуємо

$$y = 0,5 g \left(\frac{x}{v_0} \right)^2. \quad (2.17)$$

Рівняння (2.17) показує, що траєкторією руху центра мас куска вугілля буде парабола.

Імпульс удару куска вугілля по біговій доріжці розкладаємо на такий, що розглядається вздовж y та x . Оскільки останній є малий, враховуємо надалі вертикальний імпульс.

Розглянемо такі випадки форми робочої поверхні бігової доріжки помольної чаші:

- вона зношена так, що має западини та виступи;
- вона горизонтальна.

Нехай у першому випадку виступ бігової доріжки має сферичну форму, як і ударна сторона куска вугілля.

При ударі центри сфер зближаться на величину

$$y = y_B - y_C, \quad (2.18)$$

де y_B і y_C – координати центрів мас чаші та куска вугілля в стані, коли розпочався їх контакт.

Рівняння руху обох тіл в процесі удару записується у вигляді

$$\begin{cases} m_C \ddot{y}_C = F(y); \\ m_B \ddot{y}_B = -F(y). \end{cases} \quad (2.19)$$

Виключимо з цих рівнянь координати y_C і y_B за допомогою рівності (2.18):

$$\ddot{y} = -\frac{F(y)}{m}, \quad (2.20)$$

де m – зведена маса ($m = \frac{m_C \cdot m_B}{m_C + m_B}$).

Перший інтеграл для швидкості зближення \dot{y} дає

$$0,5\dot{y}^2 = -\int_0^y \frac{1}{m} F(y) \cdot dy + C.$$

Оскільки в початковий момент часу $\dot{y}_0|_{t=0} = \sqrt{2gh_m}$, маємо

$$\dot{y}^2 - 2gh_m = -\frac{2}{m} \int_0^y F(y) \cdot dy.$$

Під час найбільшого зближення $\dot{y} = 0$, тому

$$\frac{2}{m} \int_0^y F(y) \cdot dy = 2gh_m. \quad (2.21)$$

У формулу (2.21) підставляємо відому з опору матеріалів [65] залежність сили від деформації для випадку деформації двох зовнішніх сфер

$$F \frac{2}{3(1-\mu^2)} \cdot E \sqrt{\frac{r_C r_B}{r_C + r_B}} \cdot y^{3/2} = K_c y^{3/2},$$

тоді отримуємо

$$2gh_m = \frac{2}{m} K_c \int_0^{y_{\max}} y^{3/2} dy = \frac{0,8K_c}{m} y_{\max}^{2,5},$$

звідки

$$y_{\max} = \left(\frac{gh_m}{0,4K_c} \right)^{0,4} \text{ і } F_{\max} = K_c y_{\max}^{1,5} = K_c^{0,4} \left(\frac{gh_m m}{0,4K_c} \right)^{0,6}. \quad (2.22)$$

Приймаємо тиск q розподіленим за законом на півсфери [67] з найбільшою інтенсивністю в центрі площадки контакту. Тоді рівнодійна тиску по цій площадці, яка дорівнює силі тиску, буде

$$F_{\max} = \int_F q ds = \frac{2}{3} \cdot \frac{q_0}{a_c} \cdot \pi a_c^3 = \frac{2}{3} \pi q_0 a_c^2,$$

де $q_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\max}}{\pi a_c^2}$, a_c – радіус площадки контакту, який [72] дорівнює:

$$a_c = \sqrt{(1-\mu)^2 0,375 F_{\max} (1/E_c + 1/E_b) / (1/r_c + 1/r_b)},$$

де μ – коефіцієнт Пуассона, E_c і E_b – відповідно модулі пружності матеріалу бігової доріжки та вугілля, r_c і r_b – радіуси сфер бігової доріжки та вугілля.

Найбільша інтенсивність питомого тиску на контакті буде в центрі величиною

$$q_0^{mx} = 1,09665 \sqrt[3]{\frac{(r_c + r_b)^2 E_c^2 E_b^2 (mh_m)^{0,6} K_c^{0,4}}{(1-\mu^2)^2 r_c^2 r_b^2 (E_c + E_b)^2}}. \quad (2.23)$$

Аналізуючи залежність (2.23) при різних значеннях r_c і r_b , та порівнюючи q_0^{mx} з $[q] \approx 0,25 \text{ МПа}$ для БД, встановлюємо чи руйнуватимуться викришуванням “нарости” на БД (якщо $q_0^{mx} > [q]$).

У випадку, коли сферична опукла частина куска вугілля вдаряється у вгнуту зношену частину БД (чи навпаки), маємо трохи менший питомий тиск:

$$q_0^{mx} \approx 1,09665 \sqrt[3]{\frac{E_c^2 E_b^2 (mh_m)^{0,6} K_c^{0,4}}{r_b^2 (1-\mu^2)^2 \cdot (E_c + E_b)^2}}. \quad (2.24)$$

У випадку контакту куска вугілля з плоскою частиною БД

$$q_0^{mx} \approx 1,09665 \sqrt[3]{\frac{(r_b - r_c)^2 E_c^2 E_b^2 (mh_m)^{0,6} K_c^{0,4}}{(1-\mu^2)^2 \cdot r_c^2 r_b^2 \cdot (E_c + E_b)^2}}. \quad (2.25)$$

На рис.2.6-2.7 представлено графіки залежностей інтенсивності питомого тиску від величини радіуса сфери куска вугілля r_b для різних значень радіуса западини чи виступу бігової доріжки r_c (рис.2.6) та від величини радіуса западини чи виступу бігової доріжки r_c , для різних значень радіуса сфери куска вугілля r_b (рис.2.7), отримані в середовищі MathCad. Горизонтальна лінія

$[q] \approx 0,25 \text{ МПа}$ дозволяє зробити наступний висновок – при тих комбінаціях значень r_c та r_b , при яких інтенсивність питомого тиску перевищує $0,25 \text{ МПа}$, явище викришування (зношування) буде спостерігатись, в іншому випадку воно буде відсутнє.

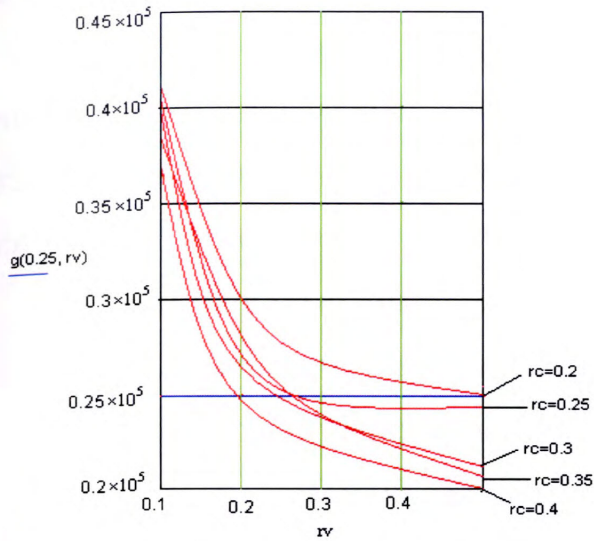


Рис. 2.6 Графіки залежностей інтенсивності питомого тиску q_0^{mx} від радіуса сфери куска вугілля r_b для різних значень радіуса западини чи виступу бігової доріжки r_c

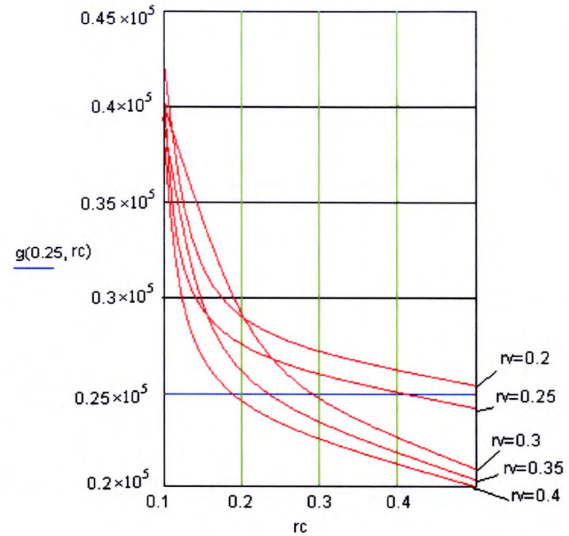


Рис. 2.7 Графіки залежностей інтенсивності питомого тиску q_0^{mx} від величини радіуса западини чи виступу бігової доріжки r_c для різних значень радіуса сфери куска вугілля r_b

Аналіз положення куска вугілля на біговій доріжці помольної чаші.

Під дією відцентрових сил кусок вугілля може обертатися разом з біговою доріжкою, а може також і пересуватися на периферію. З'ясуємо умови зриву куска вугілля масою m_b , нехтуючи у першому наближенні впливом інших кусків і частинок вугілля та зміною швидкості ω_c обертання чаші.

Це буде мати місце у випадку, коли сила тертя спокою куска вугілля на біговій доріжці буде меншою за відцентрову силу:

$$m_b \omega_c^2 r_i > f_0 m_b g, \quad (2.26)$$

де f_0 – максимальний коефіцієнт тертя спокою.

Усі куски вугілля, які розташовані в положенні з $r_i < \frac{f_0 m_b g}{m_b \omega r^2}$, не будуть рухатися в радіальному напрямку. Якщо для куска вугілля умова (2.26) виконана, тоді під дією відцентрових сил він буде ударно взаємодіяти як з ПВ, так і БД.

Оскільки раціональна відстань від осі обертання ПЧ до поверхні ПВ менша, ніж до периферійних частин БД, то ймовірність потрапляння куска вугілля у простір БД між ПВ більша, тому проаналізуємо ударну взаємодію куска вугілля саме з нею.

Ця взаємодія можлива у двох варіантах.

1. Кусок вугілля не відривається від БД.
2. Кусок вугілля відривається від БД.

Варіант 1. Нехай кусок вугілля опинився по закінченні падіння на відстані $r_0 = \frac{f_0 g}{\omega^2}$. Він розпочне ковзати зі стану спокою по осі x (в радіальному напрямку) за законом

$$m_g \ddot{x} = m_g \omega^2 r_i - f m_g g,$$

де f – коефіцієнт тертя руху ковзанням вугілля по БД. Треба вказати початкові умови, бо

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \omega^2 r_i - fg \\ \dot{x} &= (\omega^2 r_i - fg) t + C_1 \\ x &= \frac{(\omega^2 r_i - fg) t^2}{2} + C_1 t + C_2, \end{aligned} \quad (2.28)$$

звідти треба визначити C_1 і C_2 . Розв'язок цього рівняння дає при початкових умовах

$$\dot{x} \Big|_{t=0} = 0; \quad x \Big|_{t=0} = \frac{f_0 g}{\omega^2} : \quad x = \frac{(\omega^2 r_i - fg) \cdot t^2}{2} + \frac{f_0 g}{\omega^2}. \quad (2.29)$$

Це буде тривати до зустрічі із заглибленою частиною БД на відстані від її осі обертання, рівною $l_{зз} = 483 \text{ мм}$. Далі кусок вугілля розпочне рухатися без контакту з БД, маючи початкову швидкість $v_0 = (0,483 \omega^2 - 9,81 f) \cdot \sqrt{\frac{0,04924 - f_0 \omega^2}{0,02437 - 0,5 f}}$ за законом $y = (0,59 v_0^2) \cdot x^2$ по параболі до точки зустрічі, координата якої дорівнює

$$x_{\delta} = (0,0192 - 2f)(0,04924 - f_0/\omega^2)(0,02437 - 0,5f)^{-1}.$$

Варіант 2. При цьому можливі два випадки.

1. Кусок вугілля лежить в межах різниці $\Delta y = 64 \text{ мм}$ висот грані заокругленої частини БД (рис.2.8).

2. Кусок вугілля лежить на висоті, вищій за висоту грані заокругленої частинки БД.

У першому випадку кусок вугілля косо вдаряється у вищий берег канавки поверхні БД.

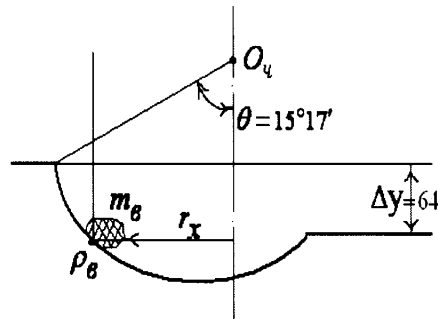


Рис. 2.8 Розрахункова схема дослідження положення куска вугілля на БД ПЧ

Вважаючи сферичною ударну частину куска вугілля, максимальний питомий тиск [65] можна визначити з формули

$$q_0^{\text{mx}} = K_p \sqrt[3]{F_e \left(\frac{E}{r}\right)}, \quad (2.30)$$

де $F_e = m_B r_B \omega_c^2 \cos \gamma$; $K_p = 0,2295 \left[1 - \left(1 - \frac{r_y}{r_x} \right)^3 \right]^{0,189}$; $r = \frac{1}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + 2 \frac{1}{r_{22}}}$;

$$r_y = \frac{r_{11} \cdot r_{21}}{r_{11} + r_{21}}; \quad E = 2E_B E_c / (E_B + E_c).$$

Для розрахунків маємо $r_{11} = -426 \text{ мм}$; $r_{12} = \rho_B$ (ρ_B змінюється в межах від 1 до 15 мм, а r_x - від 478 мм до 873 мм).

У випадку 2 удар куска вугілля буде відбуватися об вертикальну стінку ($r_c \approx 925 \text{ мм}$). Для цього випадку максимальний питомий тиск визначиться формулою

$$q_0^{\text{mx}} = 975 \sqrt{m_B \omega_c r_c \frac{E_B E_c}{(E_B + E_c) \cdot r_B}}. \quad (2.31)$$

Результати розрахунків наведені на рис.2.9, 2.10. Куски вугілля, які не задовольняють умові (2.26), не будуть потрапляти в зону руйнування (дроблення та стирання).

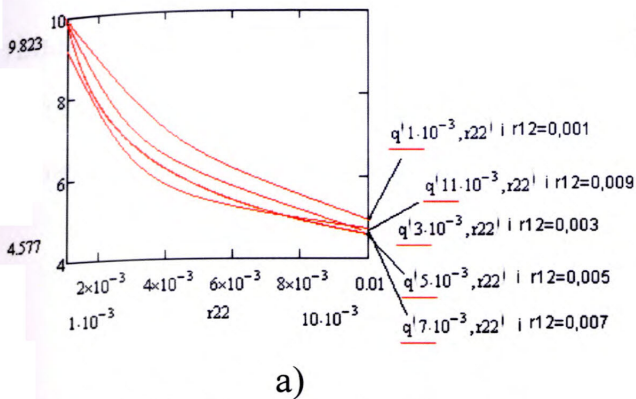


Рис. 2.9 Графіки залежностей максимального питомого тиску q_0^{mx} від величини r_{22} при різних значеннях r_{12} (0,001 - 0,009)

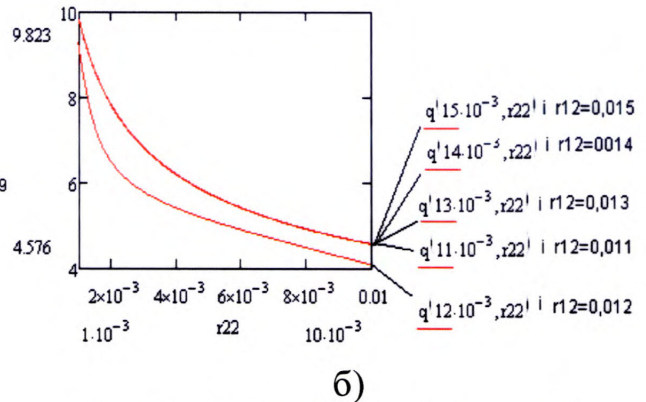


Рис. 2.10 Графіки залежностей максимального питомого тиску q_0^{mx} від величини r_{22} при різних значеннях r_{12} (0,011-0,015)

В результаті проведених досліджень отримані аналітичні залежності:

- інтенсивності питомого тиску q_0^{mx} від радіуса сфери куска вугілля r_b для різних значень радіуса западини чи виступу БД r_2 та залежність q_0^{mx} від r_2 при різних значеннях V_B доріжки та параметрами деформованої поверхні БД.

- залежність максимального питомого тиску q_0^{mx} від характеристик r_{22} та r_{12} , які визначаються радіусом шматка вугілля, радіусом заокруглення БД та параметрами її деформованої поверхні.

Результати проведеного моделювання на реальних даних показали, що:

- при вибраних комбінаціях значень величин радіуса сфери куска вугілля r_4 та значень величин радіуса западини чи виступу БД r_4 , при яких інтенсивність питомого тиску перевищує 0,25 МПа, буде спостерігатися явище зношування БД ПЧ і, відповідно, ПВ. В іншому випадку явище зношування робочих органів млина буде відсутнє;

- визначальною величиною, яка впливає на значення максимального питомого тиску, є величина r_{22} , в той час, як графіки при різних значеннях r_{12} відрізняються мало.

2.4. Аналітичні дослідження взаємного руху помольного валка і бігової доріжки та формування сили їх притискання

Оскільки процес зношування робочих органів ВВМ характеризується не тільки їх взаємодією з вугіллям в процесі його руйнування, але обумовлюється також характером руху ПВ та БД і силою притискання ПВ до БД ПЧ, проведемо аналітичні дослідження цих процесів.

З умови кінетостатичної рівноваги бігової доріжки та валка маємо:

$$\begin{cases} M_{\text{ч}} - F_m r_{\text{кч}} - I_{\text{ч}} \ddot{\varphi}_{\text{ч}} = 0, \\ M_{\text{в}} + F_m r_{\text{кв}} - I_{\text{в}} \ddot{\varphi}_{\text{в}} = 0, \end{cases} \quad (2.32)$$

де $M_{\text{ч}} = M_{\text{ч}}(\omega_{\text{ч}})$ – статичний момент (без врахування сил інерції) привідного електродвигуна, який у першому наближенні можна вважати сталою величиною для усталеного режиму роботи ВВМ;

$I_{\text{ч}}$ – зведений момент інерції БД відносно осі обертання (з врахуванням моменту інерції ротора та ланок приводу);

F_m – сила тертя, яка діє в площині контакту БД та ПВ;

$r_{\text{кр}}$ – контактний радіус БД;

$r_{\text{кв}}$ – контактний радіус ПВ;

$I_{\text{в}}$ – момент інерції ПВ, який дорівнює

$$\begin{aligned} I_{\text{в}} = & 0,5m_1 r_1^2 + I_n + m_2 (r_H^2 + r_{\Pi}^2) + \rho r_{\text{зв}}^2 \left\{ 0,125 \pi + \frac{L}{2 r_{\text{зв}}^2} \sqrt{(r_{\text{зв}}^2 - l^2)^3} - \right. \\ & - 0,25 \left(\sqrt{r_{\text{зв}}^2 - L^2} - L \arcsin \frac{L}{r_{\text{зв}}} \right) + \left[r_{\text{зв}} - L - r_{\text{зв}} \left(\frac{4 \sin^3 d}{6\alpha - 3 \sin 2\alpha} \right)^2 \right] \\ & \left. \left[0,5\pi - \frac{L}{r_{\text{зв}}} \sqrt{r_{\text{зв}}^2 - L^2} - \arcsin \frac{L}{r_{\text{зв}}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Де - $M_{\text{в}}$ - момент сили опору ПВ.

Виразимо F_m через параметри першого рівняння та підставимо у друге рівняння системи (2.32):

$$M_{\text{ч}} r_{\text{кв}} - I_{\text{ч}} \ddot{\varphi}_{\text{ч}} r_{\text{кв}} + M_{\text{в}} r_{\text{кч}} - I_{\text{в}} \ddot{\varphi}_{\text{в}} r_{\text{кч}} = 0.$$

Рівняння неголономного зв'язку

$$r_{\text{кч}} \dot{\varphi}_{\text{ч}} - r_{\text{кв}} \dot{\varphi}_{\text{в}} = 0, \text{ або } r_{\text{кч}} \dot{\varphi}_{\text{ч}} + r_{\text{кч}} \ddot{\varphi}_{\text{ч}} - \dot{r}_{\text{кв}} \dot{\varphi}_{\text{в}} - r_{\text{кв}} \ddot{\varphi}_{\text{в}} = 0. \quad (2.34)$$

Оскільки $\frac{r_{кв}}{r_{кч}} = i_{21}$ кінцевою будемо мати після врахування залежностей неголономного зв'язку

$$(I_u + I_s i_{21}^2) \ddot{\phi}_2 + I_s i_{21} \frac{di_{21}}{dt} \dot{\phi}_2 = M_s i_{21} + M_u.$$

Для моменту сил на валу валка будемо мати

$$M_s = (I_s + I_u \cdot i_{21}^2) \ddot{\phi}_s + I_u \cdot i_{21} \frac{di_{21}}{dt} \dot{\phi}_s - M_u \cdot i_{21},$$

$$M_s = \frac{1}{i_{21}} \left[(J_r + J_\delta i_{21}^2) \ddot{\phi}_r + J_\delta \cdot i_{21} \frac{di_{21}}{dt} \dot{\phi}_r - M_r \right]. \quad (2.35)$$

Оскільки $r_{кч}$ і $r_{кв}$ змінюються в процесі дроблення, тоді навіть при $M_u = const$ $\dot{\phi}_u = \omega_u = const$ момент на ПВ буде залежати від зміни i_{21} за законом

$$M_{sc} = J_u \frac{di_{21}}{dt} \omega_s - M_u \cdot i_{21} \quad (2.36)$$

зміна i_{21} пов'язана з процесами, які відбуваються у фрикційній парі «ПВ-БД».

Приймаємо, що ПВ контактує з ПЧ лише по заокруглених частинах.

Рівняння дуги заглибленої частини БД описується таким рівнянням кола в системі координат ХОУ (рис.2.2):

$$(x - x_{oc})^2 + (y + y_{oc})^2 = r_{зч}^2,$$

де $x_{oc} \approx 635 \text{ мм}$, $y_{oc} \approx -30 \text{ мм}$ - координати центра кола; $r_{зч} \approx 420 \text{ мм}$ - радіус заокругленої частини БД.

Рівняння контактної частини ПВ описується таким рівнянням кола в системі координат Х,АУ, Х₁АУ₁:

$$x_1^2 + (y - AO_k)^2 = r_{зв}^2,$$

де $AO_k = 380 \text{ мм}$ - ордината положення центра заокруглення ПВ, $r_{зв} = 226 \text{ мм}$ - радіус заокруглення ПВ.

Оскільки система координат Х₁АУ₁, повернута на кут γ та відстоїть на відстані $AO \approx 585 \text{ мм}$, перетворенням систем координат та спільним розв'язком знайдемо координати точок x_k та y_k з рівнянь:

$$\begin{cases} y_k = y_o \pm \sqrt{r_{\varphi}^2 - (\tilde{\delta}_e - \tilde{\delta}_{o-})^2}; \\ \left[x_k \cos \gamma + \right. \\ \left. + \left(y_o \pm \sqrt{r_{\varphi}^2 - (\tilde{\delta}_k - x_{o-})^2} \right)^2 \sin \gamma + \hat{A} \hat{I} \right]^2 + \left[\left(y_o \pm \sqrt{r_{\varphi}^2 - (\tilde{\delta}_k - x_{o-})^2} \right) \cos \gamma + \right. \\ \left. + x_k \sin \gamma - AO_k \right]^2 = r_{\varphi a}^2. \end{cases} \quad (2.37)$$

Теоретично знайдена точка контакту практично через наявність притискування ПВ гідроциліндром до БД перетворюється в площадку, по якій відбувається проковзування внаслідок складних явищ їх взаємодії.

Розглянемо такі три види проковзування [69]:

- пружне;
- буксування;
- геометричне.

Пружне проковзування. Від сили притискування ПВ $R_{вч}^n$ виникає деформація як БД, так і ПВ. Враховуючи, що ПВ торкається БД по площадці, яка буде утворена внаслідок контактних деформацій обох тіл та мати еліптичну форму. Великою віссю еліпса буде «а», а меншою «в».

Значення максимального питомого тиску p_0^{mx} визначимо за формулою:

$$p_0^{mx} = K_p \sqrt[3]{F_r \cos \gamma \left(\frac{E}{r} \right)^2}, \quad (2.38)$$

де $K_p = \frac{3}{\pi K_a K_e}$ - коефіцієнт питомого контактного тиску;

$$a = K_a \sqrt[3]{F_r \cos \gamma \frac{r}{E}} \quad (2.39)$$

- велика піввісь еліпса деформації;

$$e = K_e \sqrt[3]{F_r \cos \gamma \frac{r}{E}} \text{ - мала піввісь еліпса деформації;}$$

$$K_a = \sqrt[3]{\frac{6D}{\pi} \left(1 + \frac{r_x}{r_y} \right)} \text{ - коефіцієнт великої півосі еліпса деформації;}$$

$$K_e = \sqrt[3]{\frac{6D}{\pi} \left(1 + \frac{r_x}{r_y} \right)} \text{ - коефіцієнт малої півосі еліпса деформації;}$$

$$D = \frac{K - \alpha}{1 - \left(\frac{e}{a} \right)^2};$$

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{e^2}{a^2}\right) \sin^2 \varphi^{0.5}} d\varphi$$
 - повний еліптичний інтеграл першого роду;

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{e^2}{a^2}\right) \sin^2 \varphi^{0.5}} d\varphi$$
 - повний еліптичний інтеграл.

Для параметрів ПВ та БД характерним є таке співвідношення між головними радіусами кривизни поверхонь, які вимірюються в площинах OXZ та OYZ головних нормальних січень:

$$1 \leq \frac{r_x}{r_y} \leq 34 .$$

Тоді коефіцієнти k_p , k_a , k_r можна визначити наближено з похибкою не більше, ніж 3% так:

$$K_a = \frac{1,4664}{y^{0,0945}} \left(\frac{r_x}{r_y}\right)^{0,318}$$
 - коефіцієнт великої осі еліпса плями контакту;

$$K_s = \frac{1,41184}{y^{0,0945}} \left(\frac{r_y}{r_x}\right)^{0,318}$$
 - коефіцієнт малої осі еліпса плями контакту;

$$K_p = 0,2295 y^{0,189}$$
 - допоміжний коефіцієнт;

$$y = 1 - \left(1 - \frac{r_y}{r_x}\right)^3 ;$$

$$r_x = \frac{2}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} - \sqrt{\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)^2} - 2\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right)\left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)\sin 2\gamma}$$
 - головний радіус

кривизни в площині OXZ;

$$r_y = \frac{2}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} + \sqrt{\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)^2} + \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right)\left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)\sin 2\gamma}$$
 - головний

радіус кривизни в площині OYZ;

$$E = \frac{2E_q E_s}{E_q + E_s}$$
 - зведений модуль пружності;

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}}}$$
 - середній приведений радіус кривизни.

Для ПВ та БД маємо $r_{11} = -493\text{мм}$; $r_{22} = 226\text{мм}$; $r_{12} = -627\text{мм}$; $r_{21} = 596\text{мм}$.

Сила притиску $F_2 \sin \gamma$ повинна бути такою, щоб сила тертя $F_2 f \sin \gamma$ перевищувала силу опору.

Під дією сили опору $F_0 = \frac{M_a}{r_{kb}}$ на еліптичній площадці $a_1=0,5$ СД та її навкіллі праворуч і ліворуч виникнуть деформації зсуву та викривлення радіальних волокон матеріалів БД та ПВ (рис.2.11). Напрямок (кут) зсуву для БД співпадає з напрямком її обертання: $\varphi = \text{arctg} f$, де f – коефіцієнт тертя. У зоні I_1 чаші виникає та до точки c_1 поступово густішає ущільнення волокон. За точкою c_1 через зростання тиску та сил тертя викривлення та ущільнення волокон припиняється.

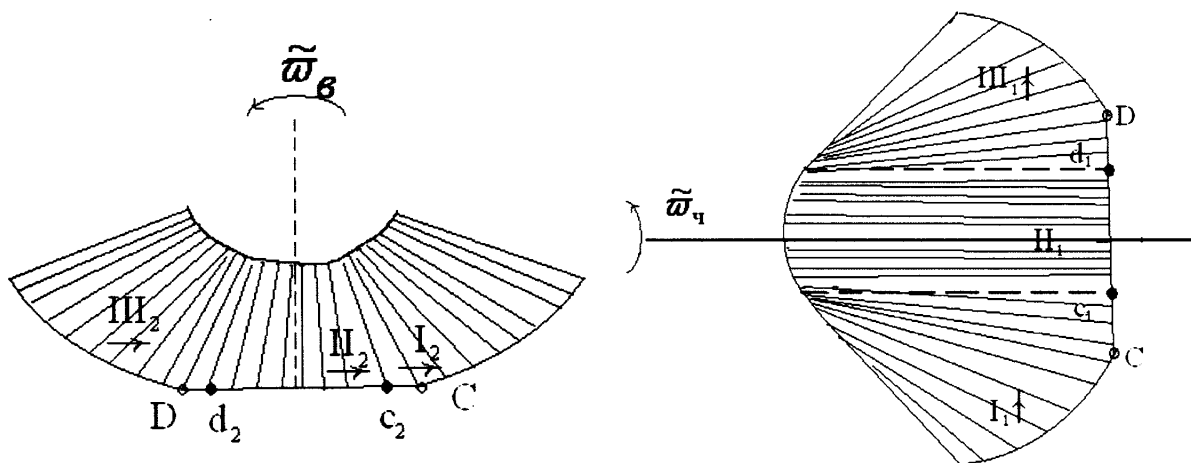


Рис. 2.11 Епюри деформації зсуву та викривлення радіальних волокон матеріалів БД та ПВ.

По валку в зоні I_2 до точки c_2 навпаки відбудеться розтяг волокон матеріалу та їх розрідження в радіальному напрямку.

З цих міркувань на ділянці Cc_1 має місце відносне випередження ковзання радіальних волокон чаші по відстаючих волокнах матеріалу ПВ.

Відстань c_1c_2 для різних випадків різна, оскільки залежить від співвідношення модулів пружності E_q і E_v , радіусів $ч_{кч}$ та $ч_{кв}$, від навантаження F_0 та сили притискання $F_f \sin \gamma$. В ідеалі може мати місце $c_1c_2=0$. Тоді центральні зони II_1 і II_2 будуть співпадати.

Після переходу через граничні точки c_1c_2 деформовані волокна БД та ПВ потрапляють в зони Π_1 і Π_2 , де збержуть незмінним досягнуті розрідження чи ущільнення. Так відбувається тому, що в цих зонах діють значні питомі контактні тиски та сили зчеплення від тертя, яке цим тискам відповідає. При цьому відносно ковзання волокон зони Π_1 відносно волокон зони Π_2 буде відсутнє, вони рухаються спільно з однаковою лінійною швидкістю.

Після точки d_1 тиск і зчеплення між ПВ та БД послабляються. Ущільнені волокна отримують можливість відновитися в зоні Π_1 , від чого на ділянці d_1D вони з випередженням почнуть ковзати по втрачаючих розрідження волокон зони Π_2 , внаслідок чого випрямляться і вже за точкою D поступово набудуть вільний стан.

Для ділянки d_1d_2 зони Π_2 з-за наявності тертя збоку БД розрідження волокон ПВ збережеться, а після точки d_2 , де тертя зменшується, наступить втрата розрідження, яке відновиться за точкою D з деяким коливанням недеформованої структури матеріалу ПВ. Внаслідок цього волокна валка в зоні Π_2 змістяться в сторону зворотного від напрямку обертання ПВ.

На підставі викладеного розподіл лінійних коливних швидкостей $V_{\psi}iV_{\phi}$ можна представити схемою (рис.2.12), де L – відстань від початку контакту.

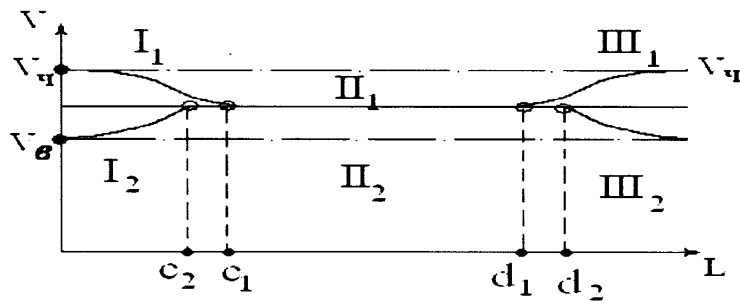


Рис. 2.12 Графік розподілу лінійних швидкостей ПВ та БД ПЧ.

У зонах Π_1 і Π_2 швидкості є однаковими, в зонах I_1 , I_2 та Π_1 , Π_2 вони є різними, тому для останніх можна записати

$$V_{\phi} = V_{\psi} - (\Delta V_{\psi} + \Delta V_{\phi}).$$

Передавальне відношення в цьому випадку буде мати вигляд

$$i_{21} = \frac{\omega_{\phi}}{\omega_{\psi}} = \frac{r_{k\psi} V_{\phi}}{r_{k\phi} V_{\psi}} = \frac{r_{k\psi}}{r_{k\phi}} \left(1 - \frac{\Delta V_{\psi} + \Delta V_{\phi}}{V_{\psi}} \right) = \frac{r_{k\psi}}{r_{\phi}} (1 - \zeta), \quad (2.40)$$

де $\zeta = \frac{\Delta V_{\text{ч}} + \Delta V_{\text{в}}}{V_{\text{ч}}}$ - коефіцієнт пружного ковзання.

Він залежить від навантаження $M_{\text{в}}$, матеріалів ПВ та БД і їх розмірів. Дослідами встановлено, що чисельні значення для сталевих ПВ та БД складають $0,002 \div 0,004$.

Буксування. Якщо при постійному притискуванні $F_2 \cos \gamma$ навантаження $M_{\text{в}}$ з якихось причин зросте, наприклад, від деякого заклинювання куском вугілля, тоді при достатньому запасі потужності привідного електродвигуна з моментом $M_{\text{ч}}$ буде зростати і колове зусилля $F_0 = \frac{M_{\text{в}}}{r_{\text{кв}}}$. Це викличе збільшення

викривлення зсуву радіальних волокон з поворотом на кут $\text{tg } \gamma = \frac{F_0}{F_{\text{г}} \sin \gamma}$ місця

контакту та звуження зон Π_1 і Π_2 навіть до значення $c_1 d_1 = 0$.

Тоді знак нерівності у співвідношенні

$$fF_{\text{г}} \sin \gamma \geq F_0, \quad (2.41)$$

яке є умовою повороту ПВ зникне, тобто

$$fF_{\text{г}} \sin \gamma = F_0, \quad (2.42)$$

а коефіцієнт ковзання ζ зросте до максимуму.

У зв'язку з тим, що коефіцієнт тертя f є величиною нестабільною [70], а в залежності від стану поверхонь контакту змінюється в деяких межах, тоді нестабільною буде також сила тертя $F_m = fF_2 \sin \gamma$.

При значному зростанні моменту опору $M_{\text{в}}$ сила тертя F_m стане меншою за F_0 , тому рівність (2.42) буде порушуватися то в одну, то в іншу сторону, а ПВ та БД будуть рухатися не плавно, а стрибкоподібно, що призведе також до збільшення їх вібрації. При зростанні $M_{\text{в}}$ до значень, коли F_m буде меншою за потрібну силу F_0 , БД повністю втратить зчеплення з ПВ – відбудеться його буксування. Тоді або $V_{\text{в}}$ буде набагато меншим за $V_{\text{ч}}$, або ПВ зупиниться, не пропускаючи через зону взаємодії коченням з ПВ продукти помолу, гальмуючи їх передачу БД до інших ПВ.

Звідси видно, що основною вихідною умовою працездатності ВВМ є така Уточнена умова для кожного валка

$$F_m \geq n_k F_0, \quad (2.43)$$

де $n_k \approx 1,5 \div 2,5$ - коефіцієнт запасу повної сили тертя спокою [64].

На лінії розділу $c_1 d_1$ контакту не завжди існує абсолютне зчеплення, яке відповідає миттєвому пружному проковзуванню. При наявності вугільних частинок буде мати місце додаткове проковзування БД в зоні Π_1 відносно зони Π_2 ПВ. Це проковзування нагадує повільне перенесення «течії» однієї поверхні по іншій і тому має назву «проковзування течією».

Затягування дрібних частинок вугілля в місце контакту призводить до того, що лінійні швидкості волокон матеріалу БД та ПВ в зонах Π_1 і Π_2 будуть відрізнятися одна від одної на деяке значення Δv_{cd} . Воно додається до пружного проковзування та визначається формулою

$$\zeta_\Sigma = \frac{\Delta V_\psi + \Delta V_\phi + \Delta V_{cd}}{V_\psi}. \quad (2.44)$$

Врахування $\frac{V_{cd}}{V_\psi}$ на порядок перевищує пружне проковзування, значно збільшуючи зношування контактних поверхонь ПВ та БД.

Геометричне ковзання. Точки БД та ПВ за конструктивних і кінематичних причин не можуть мати однакову швидкість у межах еліптичної плями контакту з проекцією $LN = v \cos(\gamma + \phi)$, де v - мала вісь еліпса (рис.2.13).

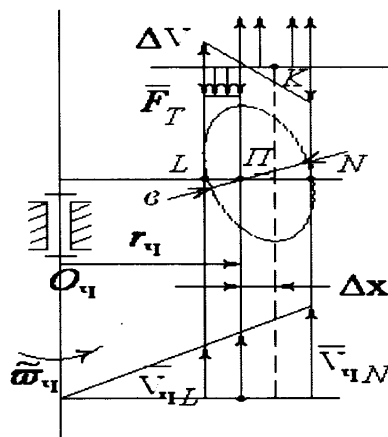


Рис. 2.13 Розрахункова схема для визначення геометричного ковзання

Напрямок сили тертя у кожній точці плями контакту ПВ до БД буде протилежним швидкості ковзання. Швидкість точок ПВ на ділянці LN будуть більшими, ніж у точці L , а на ділянці PL - меншими, оскільки лише в точці L

його швидкість дорівнює швидкості БД. Саме в цій точці буксування буде відсутнє. Тому на ділянці PN розподілена (вважаємо рівномірно) сила тертя буде створювати момент M'_F , який діє протилежно напрямку обертання ПВ. А на ділянці PL - момент M''_F , який буде напрямлений у бік обертання ПВ. Причина моментів залежить від координат Δx (від середини плями контакту K полюса P) положення точки P . Сама ж координата X є функцією навантаження, яка діє на ПВ.

Будемо вважати у першому наближенні, що тиск по ширині контакту ПВ розподілений рівномірно. Тоді можемо визначити сили тертя для ділянок PL і PN так:

$$F'_{mb} = \frac{F_z \cos \gamma}{b} * f(0,5b - \Delta x); \quad F''_{mb} = \frac{F_z \cos \gamma}{b} * f(0,5b + \Delta x).$$

З умови рівноваги валка маємо:

$$M''_e - M'_e = M_g, \quad (2.45)$$

$$\text{де } M'_e = \frac{F_z \cos \gamma}{b} f(0,5b - \Delta x) r_{ek} + \Delta x \sin \gamma + r_{ek} - 0,5b \sin \gamma,$$

$$M''_e = \frac{F_z \cos \gamma}{b} f(0,5b + \Delta x) \left(r_{ek} + \left(\frac{\Delta x + 0,5b}{2} \right) \sin \gamma \right).$$

З рівняння (2.45) знайдемо

$$\Delta x = - \frac{r_{ek}}{\sin \gamma} + \sqrt{\frac{r_{ek}^2}{\sin^2 \gamma} + 0,5b^2 + \frac{M_g b}{0,5 f F_z \sin^2 \gamma}}. \quad (2.46)$$

Перед радикалом взятий знак плюс тому, що точка P ділить меншу піввісь еліпсу внутрішнім чином.

Як бачимо з (2.46), зміщення залежить від моменту сил опору M_g , сили притискання до БД F_z , кута нахилу осі обертання ПВ γ , зміни коефіцієнту неповної сили тертя спокою f . При зменшенні M_g і збільшенні $F_z \cos \gamma$ зміщення Δx буде меншим, а тому і зношування від ковзання ПВ та БД буде меншим. Найбільшу величину зношення будуть мати ділянки ПВ, які розташовані на зовнішній частині плями контакту (біля точки N). Якщо M_g і $F_z \cos \gamma$ будуть такими, що точка P співпаде з точкою L , тоді сила зчеплення буде використана повністю.

Враховуючи зміщення Δx , передавальне відношення можна визначити за формулою

$$i_{rb} = \frac{r_{kb} - \Delta x \cos \gamma}{r_{kr} - \Delta x} \quad (2.47)$$

2.4.1 Формування сили притискання помольного ПВ до БД ПЧ

Система «гідроциліндри - притискна рама-валки-бігова доріжка» має

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - p_1 = 6 \cdot 17 - 5 \cdot 13 - 4 \cdot 3 - 3 \cdot 6 - 3 = 4$$

кінематичних ступені вільності (рис.2.14).

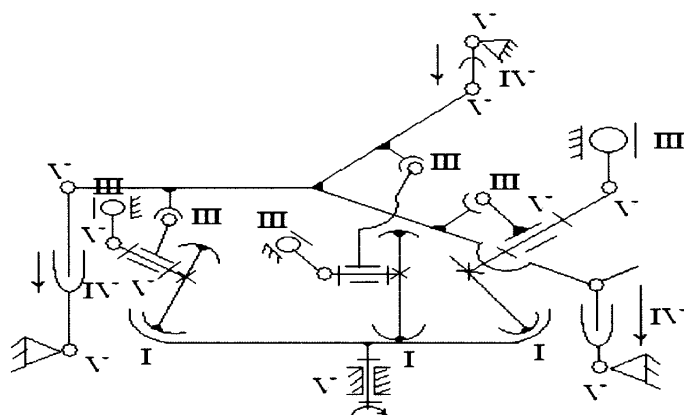


Рис. 2.14 До визначення кінематичних ступенів вільності системи «гідроциліндри - притискна рама-ПВ-БД»

Якщо врахувати, що гідроциліндри кожного ПВ живляться за принципом сполучених посудин, тоді формується один ступінь вільності на притискання з однаковою силою усіх трьох ПВ, а один ступінь вільності - на привід ПЧ від електродвигуна. Однак рівність сил притискання ПВ F_2 в шарнірі III класу зберігається, але на контакті з БД ця рівність порушується, якщо $\gamma_1 \neq \gamma_2 \neq \gamma_3$. В залежності від різниці цих кутів фактична сила притискання буде різною, оскільки силу тертя формує нормальна складова реакції

$$R_{сч}^n = F_2 \cos \gamma.$$

При цьому вздовж осі ПВ буде діяти друга складова сили F_2

$$R_{сч}^t = F_2 \sin \gamma.$$

При повороті притискної рами, наприклад, з $\gamma_1 > \gamma_2$ буде мати місце $R_{сч1}^n < R_{сч2}^n$. Тобто менш зношений ПВ буде мати більше ковзання та контакт деформації, а тому і більш інтенсивно зношуватися.

Надійну умову зчеплення валка з БД забезпечує більш повна умова у вигляді

$$\frac{fF_z \cos \gamma}{\Psi} \geq \frac{M_\epsilon}{r_{bk}}, \quad (2.48)$$

де Ψ - коефіцієнт запасу. Що встановлюється з досвіду.

Якщо не враховувати момент сил інерції ПВ при зміні γ , тоді

$$M_\epsilon = K_0 F_z + M_{k0} + M_{k\epsilon} + M_{kk},$$

де K_0 - коефіцієнт тертя кочення опори;

$M_{k\epsilon} = K_b F_z \cos \gamma$ - момент опору кочення ПВ;

K_0 - коефіцієнт кочення ПВ;

M_{k0} - момент сили корисного опору руйнування вугілля;

M_{kk} - момент опору вертіння сферичного кулькопідшипника та його самовстановлюваності [64].

Момент M_{kk} дорівнює

$$M_{kk} = \frac{3F_z \sin \gamma r_c f}{4} c (2 + c^2) \ln \frac{1 + \sqrt{1 + c^2}}{c} \sqrt{1 + c^2}, \quad (2.49)$$

$$c = 310 \frac{r_c^2 \operatorname{tg} \varphi}{r_c - d_p} \sqrt[3]{\frac{d_p z^2}{F_z^2 \cos^2 \gamma \cos \beta}}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega_c}{\omega_\epsilon},$$

де ω_c - кутова швидкість самовстановлення, с^{-1} ;

ω_ϵ - швидкість ПВ, с^{-1} ;

r_c - радіус сфери сферичного кільця опорного ролика ПВ, см;

d_p - діаметр ролика, см;

z - число роликів;

2β - центральний кут розвалу рядів тіл кочення.

Кут нахилу γ не повинен бути меншим за $[\gamma]$, знайдений за умови (2.49)

Тобто більш зношений по радіусу ПВ буде з меншою гарантією працездатності притискуватися до БД, якщо його γ буде більшим за $[\gamma]$.

Якщо будуть зношені в радіальному напрямку два ПВ, а, наприклад, третій не зношений, тоді на нього буде діяти більша сила притискання до БД і, відповідно, він буде більше зношуватися.

Висновки до розділу 2

1. Створена узагальнена діагностична модель ВВМ і визначені фактори (параметри і показники), що обумовлюють ефективність процесу помолу вугілля, та проведений їх аналіз з метою вибору найбільш інформативних, які можуть бути використані за ДО технічного стану робочих органів ВВМ.

2. За результатами проведених аналітичних досліджень взаємодії куска вугілля різної форми та розмірів з поверхнею БД та ПВ в процесі його руйнування для різних випадків розташування куска вугілля на БД отримані емпіричні залежності, які можуть бути використані при побудові діагностичних моделей ПЧ ВВМ з подальшою розробкою на їх основі методів контролю технічного стану її робочих органів.

3. Отримані емпіричні залежності інтенсивності питомого тиску на ПВ від геометричних розмірів куска вугілля для різної величини зношення БД (визначається різними значеннями радіуса її западини чи виступу) та залежності питомого тиску від радіуса заокруглення БД та величини зношення при різних значеннях швидкості її обертання. Результати проведеного моделювання з використанням отриманих залежностей показали, що при вибраних комбінаціях розмірів куска вугілля та величини зношення БД при яких інтенсивність питомого тиску на ПВ перевищує 0,25 МПа, буде спостерігатися явище зношування БД ПЧ і, відповідно, ПВ. В іншому випадку явища зношування робочих органів млина буде відсутнє.

4. Проведені аналітичні дослідження взаємного руху ПВ та БД, в результаті яких встановлені умови працездатності ПЧ ВВМ при наявності трьох видів проковзування ПВ – пружного, буксування та геометричного.

5. Визначена кількість кінематичних ступенів вільності системи «гідроциліндри - притискна рама-ПВ-БД» та проведені аналітичні дослідження формування сили притискання ПВ до БД ПЧ, в результаті яких встановлена умова надійного зчеплення останніх в процесі експлуатації.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ ПОМОЛУ ВУГІЛЛЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДИЧНОГО, ТЕХНІЧНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Дослідження інформаційних показників процесу помолу вугілля

Проведений аналіз процесу помолу вугілля як об'єкта контролю [2,18,19] показав, що він характеризується багатьма вхідними, вихідними та збурюючими факторами (параметрами і характеристиками) – тобто як об'єкт дослідження він є достатньо складним, стохастичним і залежним від багатьох факторів. Детермінований підхід до аналізу властивостей процесу помолу не дає необхідного ефекту, тому найбільш доцільним є використання статистичного методу.

Коректність, а також інтерпретація результатів аналізу в значній мірі залежать від основних властивостей процесу, який аналізується. До таких властивостей відносяться, перш за все, нормальність процесу, його стаціонарність і ергодичність – стан при якому середні за часом значення фізичних величин, що характеризують консервативну систему, рівні середнім статистичним. При цьому для перевірки ергодичності системи достатньо обчислити відсоток відхилення заданого показника від його середнього значення і у випадку його знаходження в межах 3-5%, можна вважати даний процес ергодичним і стаціонарним [74,75,76,77].

Проведемо оцінку вказаних властивостей процесу помолу вугілля на вертикальному валковому млині з використанням результатів промислових досліджень, отриманих при експлуатації млина при різних режимах його роботи (додаток Б).

В процесі проведення промислових експериментів використовувалися серійні давачі та контрольно-вимірювальні прилади, призначені для контролю параметрів і показників процесу помолу вугілля та повірені за відомими методиками (давач температури Sitrans TF, давач маси отриманого продукту

Shenck ECOCONT, давач вібрації Vibrocontrol 1000, трансформатор струму Т-0,66-20/5), а також результати лабораторних досліджень показників вугілля.

Обробку отриманих експериментальних даних проводили на ПЕОМ з використанням програмних продуктів MathCad 13.0 та SPSS 10.0 [78,79,80], які є найбільш поширеними при обробці статистичної інформації.

3.1.1 Статистичні характеристики споживаної потужності приводу помольної чаші та її вібрації

В [18] було встановлено, що найбільш інформативними параметрами, за допомогою яких можна визначити технічний стан млина, є споживана потужність приводу ПЧ та вібрація ВВМ. Тому в першу чергу зупинимося на розгляді їх статистичних характеристик [20,81].

Оцінку статистичних характеристик потужності приводу ПЧ проводили на основі обробки діаграми зміни потужності P в часі t (рис.3.1), побудованої на основі даних, наведених в додатку Б. Для виявлення закону розподілу потужності $P(t)$ буда взята вибірка об'ємом $n = 200$ значень на ділянці стаціонарності з кроком дискретизації $\Delta t = 2$ год.

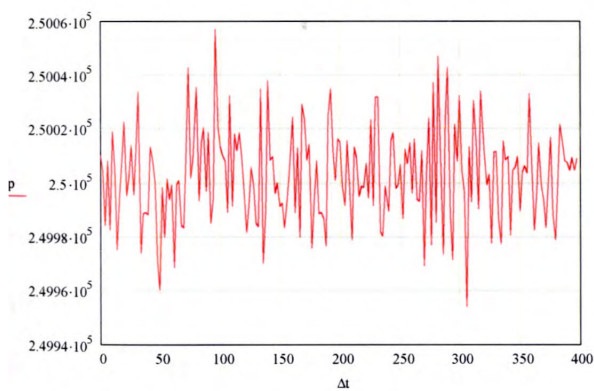


Рис. 3.1 Діаграма зміни потужності P приводу барабана чаші в часі t

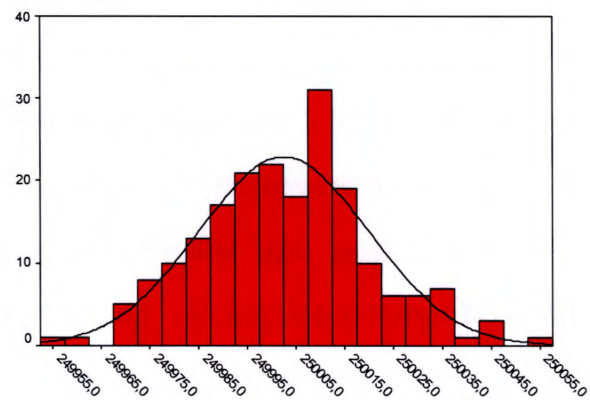


Рис. 3.2 Гістограма розподілу $P(t)$

Крок дискретизації і довжину реалізації вибирали з умови [82]. Із сукупності значень $P(t)$ після перевірки однорідності знайдені найменше $P_{min} = 249953,8$ Вт та найбільше значення $P_{max} = 250056,8$ Вт. Весь проміжок між ними розділений на рівні інтервали h , довжину яких визначали, користуючись формулою Стерджеса [75,76]. Довжина інтервалу становить $h = 11,9$. Після встановлення шкали інтервалів і групування результатів вимірювання отримали

дані для побудови гістограми, яка наведена на рис.3.2.

Перевірка на відповідність реальної гістограми нормальному закону розподілу проводилася з використанням тесту Колмогорова-Смірнова [78,81], основою якого є розрахунок максимальної різниці між кумулятивними частотами обох вибірок – z , на підставі якої визначається вірогідність помилки p . Результати тесту наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Результати тесту Колмогорова-Смірнова для $P(t)$

Вимірювальна величина		P
Кількість вибірок	N	200
Параметр нормального розподілу	Середнє значення	250002,5469
	Середньоквадратичне відхилення	17,4076
Найбільше відхилення	Абсолютне	0,046
	Позитивне	0,046
	Негативне	-0,036
Z Колмогорова-Смірнова		0,649
Статистичне значення p		0,794

Як видно з отриманих результатів (табл.3.1) закон розподілу $P(t)$ підпорядковується нормальному, оскільки для вибраного рівня значимості $p = 0,05$ отримали $p = 0,794$. Для підтвердження нормального закону розподілу $P(t)$ скористаємося ще одним тестом – діаграмою нормального розподілу, за якою візуально можна визначити, чи достатньо близько заданий розподіл наближається до нормального, так як кожне експериментально отримане значення $P(t)$ порівнюється із значенням, очікуваним при нормальному його розподілі. При цьому по осі X відкладаються експериментально отримані значення, а на осі Y – очікувані при нормальному законі розподілу і всі значення піддаються стандартизації. Як показує діаграма, отримані експериментальні значення $P(t)$ достатньо близькі до прямої (рис. 3.3).

Таким чином, результати проведених тестів підтверджують нормальний закон розподілу потужності $P(t)$ приводу помольної чаші.

Реалізація випадкового процесу $P(t)$ перевірялася на стаціонарність за тестом стаціонарності [83] згідно з гіпотезою про стаціонарність. За результатами експериментальних даних визначалася оцінка автокореляційної функції (рис.3.4). З рис. 3.4 видно, що вона має властивість позитивної визначеності. Виходячи з виконання достатньої умови ергодичності

стаціонарного випадкового процесу $P(t)$ за математичним сподіванням $\lim_{k \rightarrow \infty} R_{xx}(k\Delta t) = 0$, вважаємо, що досліджуваний процес є ергодичним і практично відсутня зміна автокореляційної функції в різних експериментах.

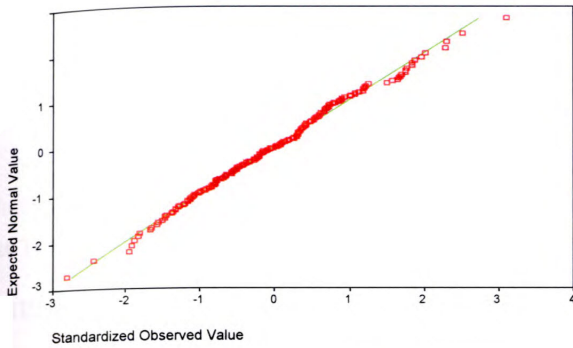


Рис. 3.3 Діаграма нормального розподілу $P(t)$

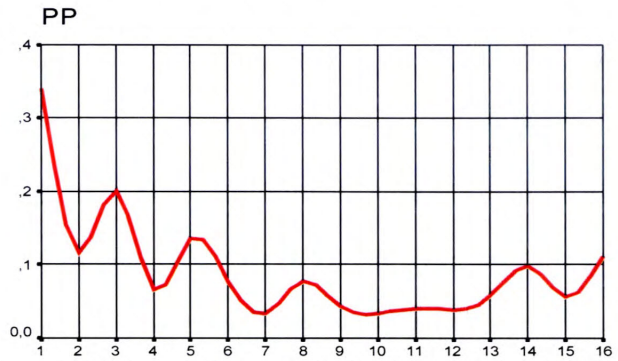


Рис. 3.4 Графік оцінки автокореляційної функції $P(t)$

Враховуючи, що математичне очікування постійне, а автокореляційна функція є лише функцією зсуву між аргументом, вважаємо процес $P(t)$ стаціонарним у широкому розумінні.

Розглянемо статистичні характеристики параметрів вібрації (віброшвидкості) ПЧ ВВМ. Дані для розрахунку статистичних характеристик отримали шляхом обробки віброграми (рис.3.5). Для виявлення закону розподілу віброшвидкості $V_m(t)$ буда взята вибірка об'ємом $n=200$ значень на ділянці стаціонарності з кроком дискретизації $\Delta t = 2$ год. Подальші дослідження проводили за методикою, розглянутою вище.

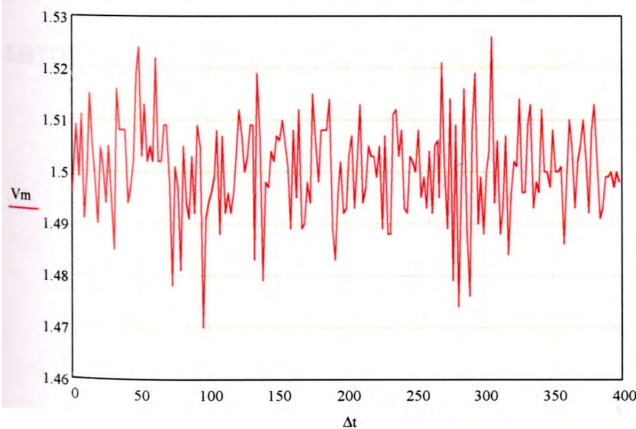


Рис. 3.5 Віброграма зміни віброшвидкості V_m млина в час t

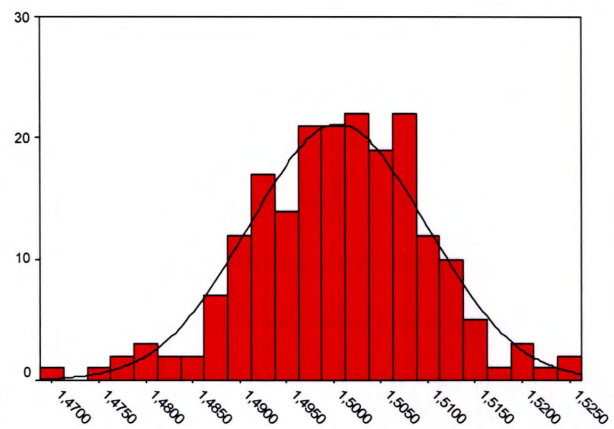


Рис. 3.6 Гістограма розподілу віброшвидкості $V_m(t)$ млина

Із сукупності значень після перевірки однорідності знайдені найменше $V_{min} = 1,47$ та найбільше значення $V_{max} = 1,53$. Весь проміжок між ними розділений на рівні інтервали, довжина яких визначена за формулою Стерджеса. Довжина інтервалу дорівнює $h=6,941 \cdot 10^{-3}$.

Після встановлення шкали інтервалів і групування результатів вимірювання отримали дані для побудови гістограми, яка наведена на рисунку 3.6.

Для встановлення відповідності $V_m(t)$ нормальному закону розподілу застосували тест Колмогорова-Смірнова (табл.3.2). Результати показують, що випадковий процес $V_m(t)$ підпорядковується нормальному закону розподілу.

Таблиця 3.2

Результати тесту Колмогорова-Смірнова для $V_m(t)$

Вимірювальна величина		V_m
Кількість вибірок	N	200
Параметр нормального розподілу	Середнє значення	1,5005
	Середньоквадратичне відхилення	9,419E-03
Найбільше відхилення	Абсолютне	0,040
	Позитивне	0,040
	Негативне	-0,038
Z Колмогорова-Смірнова		0,572
Статистичне значення p		0,899

Це підтверджується також діаграмою нормального розподілу $V_m(t)$ (рис.3.7). Реалізація випадкового процесу $V_m(t)$ перевірялася також на стаціонарність за тестом стаціонарності згідно з гіпотезою про стаціонарність. За результатами експериментальних даних визначалася оцінка автокореляційної функції (рис.3.8).

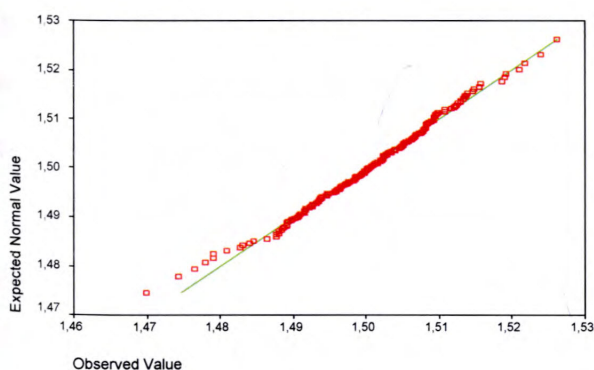


Рис. 3.7 Діаграма нормального закону розподілу $V_m(t)$

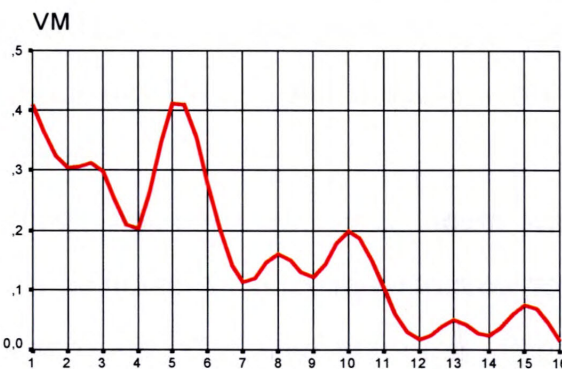


Рис. 3.8 Графік оцінки автокореляційної функції $V_m(t)$

Виходячи з виконання достатньої умови ергодичності стаціонарного випадкового процесу $V_m(t)$ за математичним сподіванням $\lim_{k \rightarrow \infty} R_{xx}(k\Delta t) = 0$, вважаємо, що досліджуваний процес є ергодичним, та враховуючи, що математичне сподівання постійне, а автокореляційна функція є лише функцією зсуву між аргументом, вважаємо процес $V_m(t)$ стаціонарним у широкому розумінні.

Використовуючи дану методику були досліджені статистичні характеристики вхідних і вихідних параметрів ВВМ, а також які характеризують якість помолу вугілля, що наведені Додатку Б1.

3.2. Факторний аналіз параметрів ВВМ і вугілля

Враховуючи, що в результаті статистичних досліджень до моделі ВВМ були добавлені такі параметри, як властивості вугілля, які не можуть бути виміряні в реальному часі, а також наявність значної кількості параметрів впливу на ВВМ, проведемо факторний аналіз.

Факторний аналіз – це процедура, за допомогою якої велике число змінних, що відносяться до наявних спостережень зводиться до меншої кількості незалежних впливаючих величин, званих факторами. При цьому, в один фактор об'єднуються змінні, що сильно корелюють між собою. Змінні з різних факторів слабо корелюють між собою. Таким чином, метою факторного аналізу є знаходження таких комплексних чинників, які найбільш повно пояснюють досліджувані зв'язки між наявними змінними.

На першому кроці процедури аналізу факторів проводимо стандартизацію заданих значень змінних (z-перетворення), потім за їх допомогою розраховуємо кореляційні коефіцієнти між даними змінними. Початковим елементом для подальших розрахунків є кореляційна матриця.

Для побудованої кореляційної матриці визначаються так звані власні значення і відповідні їм власні вектори, при визначенні яких використовуються оціночні значення діагональних елементів матриці (так звані відносні дисперсії простих чинників). Власні значення сортуються в порядку спадання, для чого звичайно відбирається стільки чинників, скільки є власних значень, що більші за одиницю. Власні вектори, що відповідають цим власним значенням,

утворюють фактори, елементи власних векторів отримали назву фактора навантаження. Їх можна вважати коефіцієнтами кореляції між відповідними змінними і факторами.

Навантаження факторів поверненої матриці можуть розглядатися як результат виконання процедури аналізу фактора. Крім того, на підставі значень цих навантажень необхідно дати тлумачення окремим факторам.

Таким чином, для кожного спостереження значення великої кількості змінних можна перевести в значення невеликої кількості чинників. Спочатку розраховуються первинні статистики, результати наведені в таблиці 3.3.

Оскільки, як видно з табл. 3.3, п'ять чинників мають значення, що перевищують одиницю, їх було вибрано для подальшого аналізу. Перший фактор пояснює 43,933% сумарної дисперсії, другий фактор 12,193%, третій фактор 7,877%, четвертий фактор 7,089%, п'ятий фактор 6,956%.

Таблиця 3.3

Результати розрахунків первинної статистики

Компоненти	Власне значення			Сума квадратів навантажень		
	Сума	% Дисперсії	% Сукупності	Сума	% Дисперсії	% Сукупності
1	2	3	4	5	6	7
V_m	7,029	43,933	43,933	7,002	43,763	43,763
P_n	1,951	12,193	56,125	1,867	11,668	55,431
S_n	1,260	7,877	64,002	1,234	7,710	63,141
n_c	1,134	7,089	71,091	1,217	7,607	70,748
T_n	1,113	6,956	78,047	1,168	7,299	78,047
$V_{в.с.}$	0,872	5,448	83,495			
$Q_{в.с.}$	0,826	5,160	88,655			
Зола	0,729	4,558	93,213			
Волога	0,645	4,032	97,245			
Летючі речовини	0,403	2,518	99,763			
Калорійність	1,606E-02	0,100	99,863			
C	9,470E-03	5,919E-02	99,922			
H_2	6,304E-03	3,940E-02	99,962			
N_2	3,810E-03	2,381E-02	99,986			
O_2	2,309E-03	1,443E-02	100,000			
S	6,205E-09	3,878E-08	100,000			

Навантаження п'яти факторів в блоковому вигляді розташовані по діагоналі матриці. Змінні, що знаходяться усередині одного блоку, відсортовані в порядку спадання навантажень чинників, причому був заборонений вивід навантажень чинників, менших 0,1.

Таблиця аналізу компонентів

	Компоненти				
	V_m	P_n	S_n	p_c	T_n
V_m	0,995				
P_n	-0,905				
S_n	0,857				
p_c	0,872				
T_n	-0,842				
$V_{в.с.}$	0,839				
$Q_{в.с.}$	0,803				
Зола	0,139	-0,574	0,171		0,464
Волога		-0,679	-0,178		-0,138
Летючі речовини		0,634	-0,167	-0,126	0,412
Калорійність		0,576		0,195	-0,201
C					0,621
H₂	0,166	0,214	0,225	0,364	
N₂		0,139	0,534	-0,339	0,151
O₂			0,612	0,185	
S			-0,175	0,644	0,119

Як видно з табл.3.4 фізико-механічні параметри вугілля та його показники мають дуже слабку кореляцію з технічними параметрами млина, а тому при подальшому виборі діагностичних ознак ВВМ ми їх враховувати не будемо. Найбільш суттєвим фактором впливу є вібрація ВВМ. Тому в подальшому будемо використовувати її, як основний інформативний параметр для контролю технічного стану ВВМ, оскільки кореляція його з іншими елементами є високою.

Оскільки коефіцієнти кореляції для залежностей параметрів вугілля не значні, то це свідчить про відсутність кореляційного зв'язку.

Як допоміжний засіб для визначення числа факторів, може послужити спеціальна точкова діаграма за допомогою якої маловажні фактори – параметри вугілля – можна відділити від значущих факторів. Ці значущі фактори на рис. 3.9 відображаються крутим падінням графіка, який спостерігається в області перших двох факторів, а область незначущих значущих факторів починається з третього чинника.

Оскільки для оцінки точної інтерполяції вимірювальних величин потрібні оцінки автокореляційних функцій, наведених в Додатку Б, був проведений їх аналіз, який показав, що всі досліджені автокореляційні функції мають властивість:

$$R_{xx}(k\Delta t) < R_{xx}(0), \quad (3.1)$$

яка відповідає властивості позитивної визначеності. Крім того, оскільки достатня умова ергодичності даних стаціонарних випадкових процесів за математичним сподіванням $\lim_{k \rightarrow \infty} R_{xx}(k\Delta t) = 0$ виконується, то можна вважати, що всі досліджувані процеси ергодичні. Аналіз показав також, що практично відсутня зміна автокореляційних функцій названих параметрів у різних експериментах.

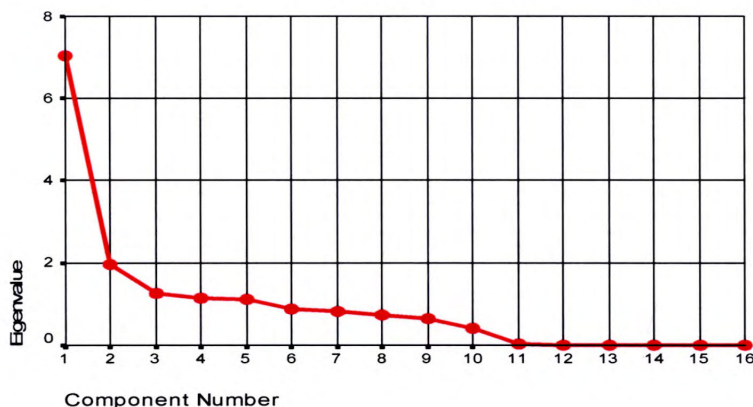


Рис. 3.9 Точкова діаграма факторного аналізу

Для визначення впливу різних факторів на вібрацію V_m з'ясуємо статистичний зв'язок між ними. Оцінку статистичного зв'язку здійснимо за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона, який розрахуємо за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{(n-1)S_x S_y} \quad (3.2)$$

де x_i та y_i значення двох змінних;

\bar{X} і \bar{Y} – їх середні значення;

S_x і S_y – їх стандартні відхилення;

n – кількість пар значень.

Отримані результати занесемо в табл. 3.5.

Отримані результати містять: кореляційний коефіцієнт Пірсона r , кількість використаних пар значень змінних і вірогідність коваріацію. В наведених даних присутня сильна кореляція, тому всі коефіцієнти звичайно ж є значущими.

Таблиця 3.5

Коефіцієнти кореляції Пірсона

Значення		V_m	P_n	S_n	n_c	T_n	$V_{в.с.}$	$Q_{в.с.}$
V_m	Кореляція Пірсона	1,000	-0,905	0,857	0,872	-0,842	0,849	0,863
	Коваріація	8,872E-05	-0,163	6,001E-02	1,448E-03	-4,898E-02	4,529E-05	1,359
P_n	Кореляція Пірсона	-0,905	1,000	-0,808	-0,804	0,802	-0,873	-0,854
	Коваріація	-0,163	303,02	-111,06	-2,684	90,358	-8,373E-02	-2511,815
S_n	Кореляція Пірсона	0,857	-0,808	1,000	0,893	-0,804	0,895	0,858
	Коваріація	6,001E-02	-111,06	41,662	0,994	-33,587	3,111E-02	933,235
n_c	Кореляція Пірсона	0,872	-0,804	0,893	1,000	-0,801	0,845	0,875
	Коваріація	1,448E-03	-2,684	0,994	2,404E-02	-0,804	7,469E-04	22,408
T_n	Кореляція Пірсона	-0,842	0,802	-0,804	-0,801	1,000	-0,885	-0,865
	Коваріація	-4,88E-02	90,358	-33,587	-0,804	27,384	-2,523E-02	-756,790
$V_{в.с.}$	Кореляція Пірсона	0,849	-0,873	0,895	0,845	-0,885	1,000	0,879
	Коваріація	4,529E-05	-8,373E-02	3,111E-02	7,469E-04	-2,523E-02	2,346E-05	0,704
$Q_{в.с.}$	Кореляція Пірсона	0,863	-0,854	0,858	0,875	-0,865	0,879	1,000
	Коваріація	1,359	-2511,815	933,235	22,408	-756,790	0,704	21112,724
N		200	200	200	200	200	200	200

Розрахунки подібних двомірних критеріїв взаємозв'язку ґрунтуються на формуванні парних значень, які утворюються з даних залежних вибірок. Для графічного представлення подібного зв'язку можна використовувати прямокутну систему координат з осями, які відповідають обом змінним. Кожна пара значень позначається за допомогою певного символу. Такий графік називається «діаграмою розсіяння» для двох залежних змінних. Графіки взаємокореляційних функцій вібрації з розглянутими факторами впливу наведені на рис. 3.10.

На основі аналізу впливових факторів (параметрів і показників як роботи ВВМ так і вугілля), визначення їх статистичних характеристик та взаємозв'язків між ними було встановлено, що вібрація ВВМ є єдиним інформаційним параметром як технологічного процесу помолу вугілля, так і технічного стану ВВМ, який можна визначати в неперервному режимі, значення якого залежить від вхідних та збурюючих параметрів. Виходячи з цього уточнену діагностичну модель ВВМ можна представити в наступному вигляді (рис. 3.11).

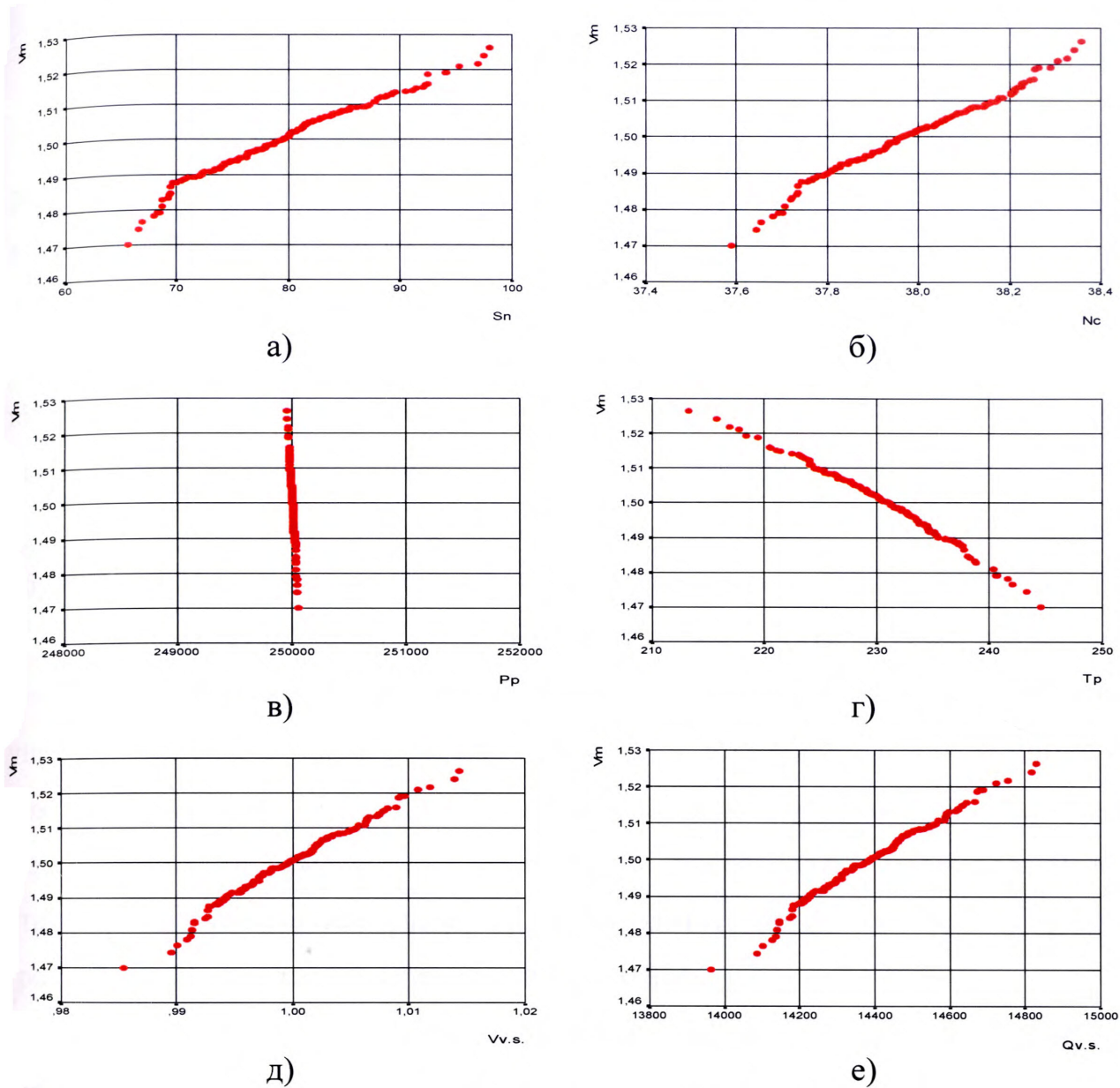


Рис. 3.10 Графіки взаємкореляційних функцій вібрації з факторами впливу –

$$R_{V_m S_n}; R_{V_m N_c}; R_{V_m P_p}; R_{V_m T_p}; R_{V_m V_v.s.} R_{V_m Q_v.s.}$$

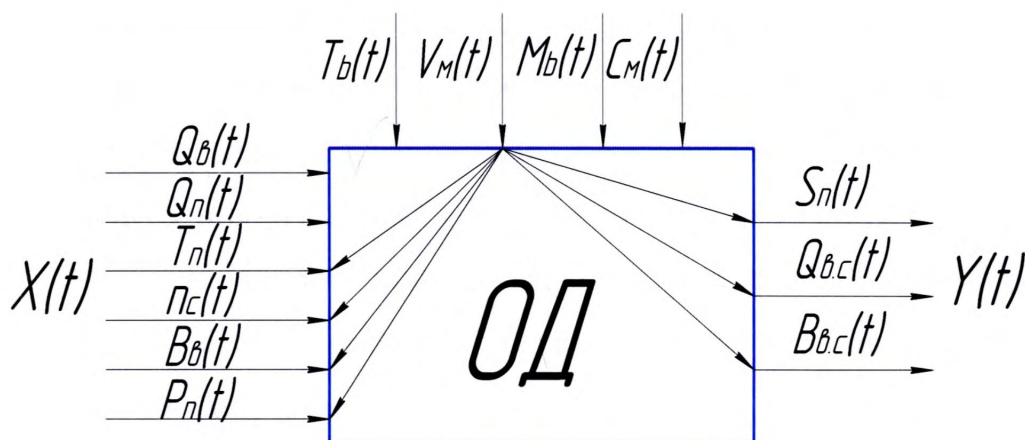


Рис. 3.11 Уточнена діагностична модель ВВМ

3.3. Методика проведення експериментальних досліджень

Методика проведення експериментів на ВВМ MPS-180 ВК була розроблена таким чином, щоб в результаті проведених досліджень можна було виявити вплив зміни технічного стану робочих органів ВВМ – ПВ та БД ПЧ на зміну вібрації ПЧ та зміну її ПХ.

Методика передбачала вимірювання параметрів вібрації в найбільш віброактивних точках на корпусі ВВМ, зняття його ПХ та вимірювання величини зносу робочих органів.

Весь комплекс експериментів складався із окремих етапів, що обумовлювалося поставленими задачами дослідження.

Перший етап досліджень передбачав збір статистичних даних про параметри експлуатації, які були отримані з існуючої бази даних системи управління ВВМ, а також дані про параметри і показники вугілля, отримані за результатами його досліджень в лабораторних умовах за існуючими методиками. Ці результати вже були використані при дослідженні статистичних показників факторів, що впливають на процес помолу вугілля (розд. 3.1-3.2) і визначають технічний стан ВВМ.

Другий етап досліджень передбачав визначення форми, розмірів і кількості кусків вугілля у заданому об'ємі. Для цього з бункера кускового вугілля об'ємом 230 м^3 , куди воно попадало після молоткової дробарки, з п'яти різних місць бункера відбирали по $0,05 \text{ м}^3$ вугілля, проводили сортування за розмірами кусків і описували їх форму відповідно до табл.2.1 (розд.2.2). Після чого проводилася статистична обробка отриманих результатів. Ця інформація необхідна була для підтвердження результатів аналітичних досліджень процесів руйнування вугілля в ВВМ та зміні його технічного стану, наведених в розд. 2.2-2.4, а також при подальшій розробці вібраційного методу діагностування стану робочих органів ВВМ та визначенні похибки мікропроцесорної системи для його реалізації.

Третій етап досліджень передбачав проведення вимірювання параметрів вібрації (віброшвидкості коливань по трьох осях - вертикальній, горизонтальній та вздовж осі вибраного об'єкту контролю) найбільш віброактивних точок на

корпусі ВВМ, оскільки штатна система Vibrocontrol 1000 з давачем вібрації Shenck VS-069, який розміщений на корпусі підшипника редуктора ВВМ, дозволяє проводити вимірювання абсолютної вібрації лише у вертикальному напрямку. Такими віброактивними точками досліджень, виходячи з рекомендацій [87] було вибрано корпус гідроциліндрів, корпус 1-го і 2-го підшипника привідного електродвигуна, а також корпус ПЧ. Результати третього етапу досліджень повинні були визначити стратегію проведення подальших експериментів з визначення вібростану ВВМ.

Четвертий етап досліджень передбачав розробку методу вимірювання фактичної величини зносу ПВ та БД ПЧ. Це обумовлювалося недосконалістю методу вимірювання величини зносу за допомогою накладних шаблонів, оскільки отримані результати не відповідали реальним значенням, так як при цьому не враховувалася форма зношених поверхонь ПВ та БД. Результати цього етапу досліджень повинні були визначити похибку традиційного методу вимірювання величини зносу з тим, щоб в процесі подальших експериментів і проведення вимірювання величини зносу її враховувати.

П'ятий етап досліджень полягав у відпрацюванні методики і технічних засобів для зняття ПХ ВВМ, що було обумовлено як конструктивними особливостями, що визначили його неконтролепридатність, так і відсутністю необхідних технічних засобів.

З врахуванням результатів досліджень кожного з розглянутих етапів методика проведення експериментів передбачала проведення вимірювання вібрації у вибраних контрольних точках ВВМ, зняття його ПХ та вимірювання величини зношування поверхонь ПВ та БД. Якщо процедура вимірювання вібрації не вимагала зупинки ВВМ, а процедура зняття ПХ вимагала його короткочасної зупинки (на 5-10 хв.) і практично не впливала на хід протікання процесу помолу вугілля та була санкціонована керівництвом підприємства у вигляді програми проведення експериментальних досліджень (Додаток Б), то вимірювання величини зношування ПВ та БД проводилося згідно регламенту, тобто через кожних три- чотири тижні роботи ВВМ. Як показала практика, фактично вимірювання величини зношення ПВ та БД проводилося через

місяць-півтора. Зняття ПХ ВВМ проводилися регулярно через три – п'ять тижнів його роботи. Методика передбачала вимірювання вібрації та зняття ПХ за два-три дні, а також за день до зупинки ВВМ з причини проведення операції наплавки зношених поверхонь ПВ та БД, а також безпосередньо після запуску його в роботу після відновлення зношених поверхонь. Дата проведення зупинки ВВМ повідомлялася обслуговуючим персоналом, що обумовлювалося програмою проведення експериментальних досліджень.

Після заміни ПВ та БД з причини їх повного зносу і відсутності можливості подальшої наплавки зношених поверхонь, проводився детальний опис характеру зношених поверхонь та знімалися їх відбитки з використанням гіпсу.

Після відпрацювання методики проведення експериментів, відповідно до розглянутих вище п'яти етапів, самі експерименти проводилися протягом 2008-2010 років.

3.4. Розроблення технічного та програмного забезпечення для проведення експериментальних досліджень технічного стану ВВМ

Для реалізації третього етапу експериментальних досліджень – проведення контролю вібростану ВВМ у вибраних контрольних точках, було вибрано віброперетворювач AP21 російської фірми «Октава+» [88], який призначений для перетворення діючої на нього вібрації в електричний сигнал, пропорційний віброприскоренню. Даний перетворювач застосовується в апаратурах контролю і вимірювання вібрації (віброприскорення) обладнання в різних галузях промисловості, а також в складі дослідницьких вібродіагностичних комплексів.

Технічні характеристики вібродавача і його геометричні розміри, які можуть бути використані при проведенні монтажних робіт, приведені в Додатку Б. Перетворювач володіє високою стабільністю нормалізованого коефіцієнта перетворення та високою надійністю в широкому діапазоні дії зовнішніх факторів (великий час напрацювання до відмови), дає змогу вимірювати віброприскорення в трьох напрямках (напрямки x , y , z тривимірного простору). Оскільки вібродавач має можливість кріпитися до

корпуса ВВМ за допомогою магнітної системи і немає необхідності стаціонарної установки декількох вібродавачів у всіх вибраних контрольних точках ВВМ, що вимагає розробки відповідної систему збору інформації, додатково було розроблено диференційний підсилювач, який під'єднувався до виходу вібродавача. Диференційний підсилювач, принципова схема якого приведена на рис. 3.12, зібраний за типовою схемою, однак при його побудові було використано операційний підсилювач AD745 фірми Analog Devices, який має низький рівень власних шумів та високу лінійність. Вихід підсилювача навантажений на АЦП звукової карти комп'ютера. Останній виконує роль пристрою зберігання, обробки та представлення записаних даних.

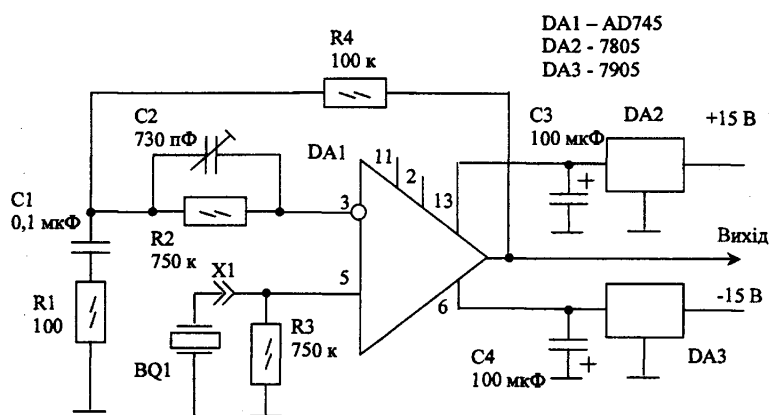


Рис. 3.12 Принципова електрична схема узгоджуючого підсилювача

Обробка записаних сигналів з вібродавача проводилася з використанням програмного продукту WaveLab 3.0 [89], спеціально розробленого для роботи з акустичними сигналами. Він має широкі можливості по перетворенню, фільтрації та аналізу частотних спектрів записаних реалізацій вібросигналів.

Для реалізації п'ятого етапу експериментальних досліджень – зняття ПХ ВВМ, виходячи з його конструктивних особливостей, що визначають неконтролепридатність ВВМ, було розроблено вимірювальну систему [90]. На першому етапі її розробки була виготовлена двополосна лінійка з градаціями в 1см та 10см відповідно, яка кріпилася до видимої рухомої частини помольної чаші. Поруч з нею на нерухомій основі була встановлена мітка (рис. 3.13,а).

Пуск ВВМ знімався на відеокамеру (рис. 3.14) та переносився на ПК. Далі за допомогою спеціального програмного забезпечення розбивався на кадри (30 кадрів на 1 сек.).

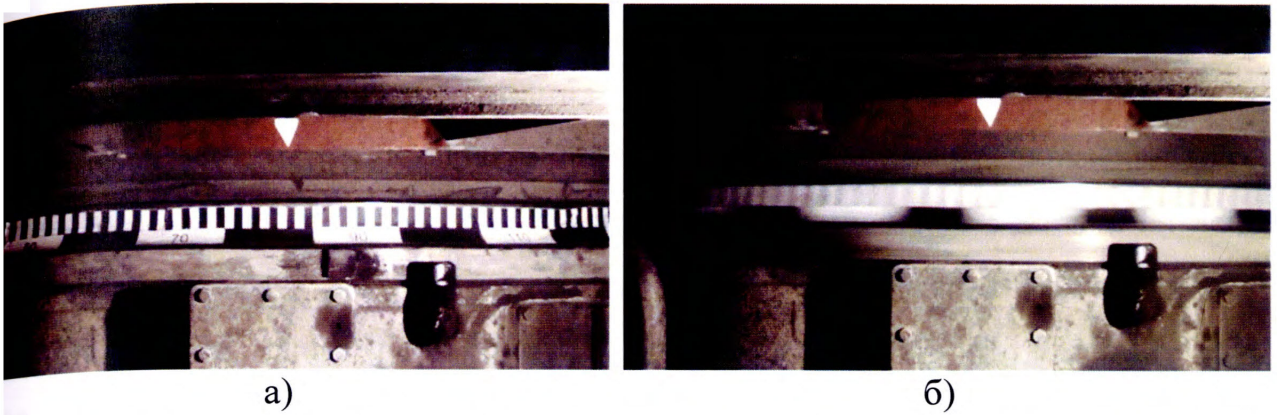


Рис. 3.13 До методики зняття перехідної характеристики ВВМ за допомогою відеокамери

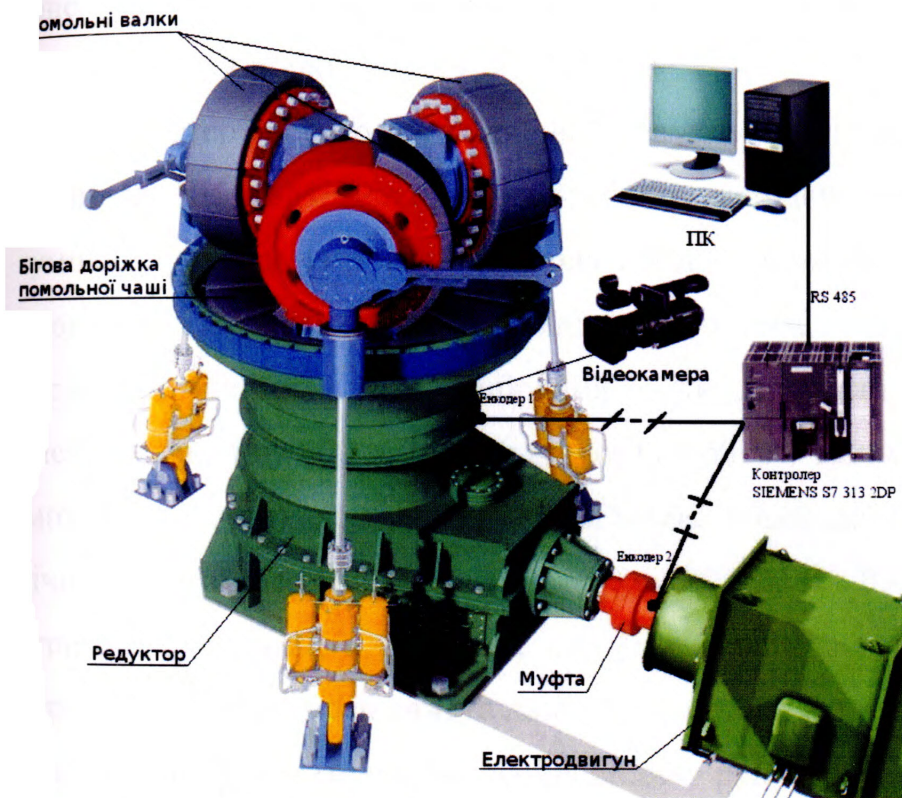


Рис. 3.14 Вимірювальна система для зняття перехідної характеристики

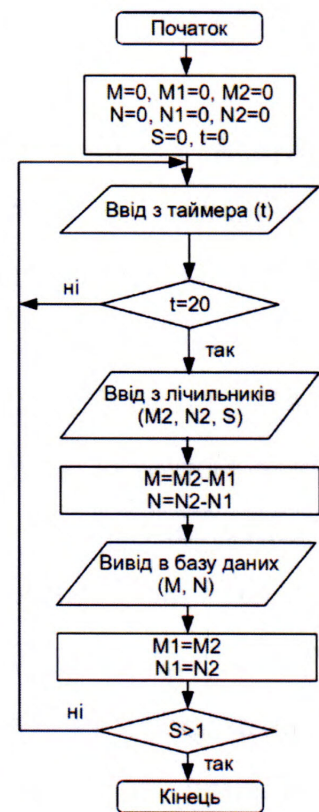


Рис. 3.15 Блок-схема алгоритму програми обробки даних

За допомогою стаціонарної мітки та рухомої лінійки теоретично можна було порахувати відстань, яку пройшла помольна чаша за 1/30 сек. та побудувати ПХ. Однак ця методика не була використана у зв'язку з нечіткістю (розмитістю) отриманого зображення (рис. 3.13,б). Метод було вдосконалено шляхом встановлення градуйованої лінійки на нерухомій основі та наклеюванні міток різних кольорів на видимій рухомій частині помольної чаші. Відстань між

мітками була дещо меншою за довжину лінійки. Це було обумовлено обов'язковою наявністю хоча б однієї мітки навпроти градуьованої лінійки в будь-який період часу. Порівнюючи розташування мітки на двох суміжних кадрах визначалась відстань, яку пройшла помольна чаша за $1/30$ сек. Ці дані заносились в таблицю, та на їх основі будувалась ПХ. Хоча методика виявилась простою і дієвою, однак похибка отриманих даних була значною (більше 30%), у зв'язку з чим було прийняте рішення перейти до більш складних апаратних методів, які б давали більшу точність отримання даних.

Розроблена вимірювальна система складається з наступних елементів: (рис.3.14) енкодера фірми Autonics, контролера CPU 313C-2DP фірми Siemens та програми обробки даних (рис. 3.15).

Енкодер встановлюється на нерухому основу, суміжну з видимою частиною ПЧ ВВМ. Для кращого контакту енкодера з основою ПЧ використали гумовий фланець із довжиною кола 200мм. Довжина кола основи ПЧ в місці проведення вимірювань складає 3400мм. Керуючись технічними характеристиками, був вибраний енкодер типу E40S8-800-3-T-24 з дискретизацією у 800 імпульсів (точок) на оберт. Таким чином величина одного імпульсу (точки) складає 0,25мм. Сигнал з енкодера потрапляє на швидкий лічильник, вмонтований в контролер CPU 313C-2DP. Лічильник сумує всі отримані імпульси, а програма, яка написана в середовищі Simatic Step 7, з періодичністю 20 мсек зчитує дані з лічильника та формує базу даних за якими будується ПХ. З метою врахування впливу редуктора на ПХ, на вал привідного електродвигуна встановлювали додатковий енкодер. Структурна схема програми обробки даних приведена на рис. 3.15.

Як приклад на рис.3.16 приведена перехідна характеристика ВВМ.

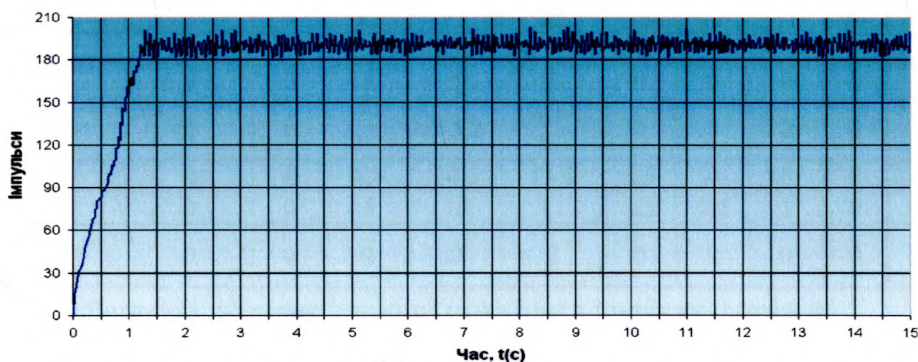


Рис. 3.16 Перехідна характеристика ВВМ

По осі ординат відкладена кутова швидкість ПЧ, визначена у кількості імпульсів вимірювальної системи за інтервал дискретизації по часу, який складає 0,02 с. Встановлений режим характеристики дає швидкість порядку 190 імпульсів, що відповідає кутовій швидкості 38 об/хв. По осі абсцис відкладено час, визначений у секундах. Як можна бачити, перехідний процес завершується за 1.2 с.

3.5. Розробка методики вимірювання величини зносу поверхонь робочих органів ВВМ

Четвертий етап досліджень передбачав розробку методу вимірювання фактичної величини зносу ПВ та БД ПЧ, що обумовлювалося недосконалістю методу вимірювання величини зносу за допомогою накладних шаблонів (розд. 1.3). Розглянемо процес вимірювання величини зношення поверхні ПВ та БД з використанням шаблонів.

Аналогічні вимірювання проводилися протягом року (табл.3.6) [17].

Таблиця 3.6

Результати вимірювання величини зношення валків і бігової доріжки помольної чаші валкового млина

Дата	Величина зношення "заднього" валка (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
05.12.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка валка
13.12.07	2	0	2	3	10	10	4	2	1	2	2	
28.12.07	2	0	2	4	12	14	5	3	3	3	4	
10.01.08	2	0	2	4	13	16	6	4	5	4	5	
25.01.08	3	0	3	6	16	17	7	6	5	5	6	
14.02.08	3	0	3	6	18	18	7	6	6	6	6	
28.02.08	4	0	5	7	22	24	11	10	10	14	14	
13.03.08	5	1	6	9	22	25	12	11	10	14	14	
29.03.08	5	3	6	12	23	25	13	12	11	14	14	
06.06.08	Заміна валка											
10.07.08	0	0	0	3	5	3	0	0	0	0		
24.07.08	0	0	0	3-3,3	5-5,2	3,1-3,3	0	0	0	0		
10.08.08	0	0	0	4,8	10,5	11,5	5,5	0	0	0		
01.10.08	0	0	0	6	15	11	3,5	2,5	1	0		
03.10.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		наплавка валка
Дата	Величина зношення "правого" валка (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
05.12.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка
13.12.07	0	1	0	1	1	2	1	1	0	0	0	
28.12.07	1	2	0	4	4	4	2	1	1	1	1	
10.01.08	1	3	0	6	7	7	3	2	2	2	1	
25.01.08	2	4	0	7	9	9	4	3	3	3	2	
14.02.08	3	5	0	10	12	13	5	4	4	5	5	
28.02.08	4	5	0	12	16	14	6	6	5	5	5	
13.03.08	5	5	0	12	16	15	7	6	5	6	6	
29.03.08	5	6	2	14	18	16	8	7	5	8	6	
06.06.08	Заміна валка											
10.07.08	0	0	0	3	5,5	2	0	0	0	0		
24.07.08	0	0	0	3-3,2	5,5-5,7	2-2,2	0	0	0	0		
10.08.08	0	0	4,5	8	11,5	13	5,5	0	0	0		
01.10.08	0	0	5	9,5	18	16	7	3,5	0	0		
03.10.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		наплавка
Дата	Величина зношення "лівого" валка (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
05.12.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка
13.12.07	1	2	0	1	1	1	2	1	0	0	0	
28.12.07	3	4	0	1	1	4	5	3	1	0	0	
10.01.08	3	4	0	2	3	7	7	5	4	1	2	
25.01.08	4	5	0	3	4	8	9	5	4	1	2	
14.02.08	4	5	0	4	4	8	9	6	4	3	2	
28.02.08	5	5	0	4	5	10	10	6	5	4	3	
13.03.08	5	7	2	6	6	12	14	8	6	6	4	
29.03.08	6	8	2	8	10	12	16	10	6	6	4	
06.06.08	Заміна валка											
10.07.08	0	0	0	3,0	6,5	5,0	2,0	0	0	0	0	
24.07.08	0	0	0	3,0-3,3	6,5-6,8	5,0-5,3	2-2,4	0	0	0	0	
10.08.08	0	0	6	8	13	12	4	2	0	0	0	
01.10.08	0	0	2	11	18	6	7	3,5	0	0	0	
03.10.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка
Дата	Величина зношення бігової доріжки помольної чаші (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
05.12.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		наплавка
13.12.07	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0		
28.12.07	0	1	1	3	4	6	3	2	1	1		
10.01.08	1	2	1	4	6	6	4	2	2	1		
25.01.08	1	3	3	4	6	6	4	2	2	1		
14.02.08	1	3	3	4	6	6	4	3	2	1		
28.02.08	1	3	4	4	7	6	5	3	2	1		
13.03.08	1	3	4	4	7	6	5	4	3	1		
29.03.08	1	3	5	5	7	6	5	4	3	1		
06.06.08	Заміна бігової доріжки											
10.07.08	0	0	0	3	8	12	7	4	0	0	0	
24.07.08	0	0	0	3,0	8,0	11-12	7-7,5	4-4,2	0	0	0	
10.09.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка
01.10.08	0	0	4	5	7	13	10	6	3	0	0	
03.10.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка

Коли величина зношення перевищує задану, проводиться процес наплавки зношеної площини робочих органів. Враховуючи, що матеріалом ПВ та БД є високохромистий чавун (хромкус), то наплавка проводиться одночасно

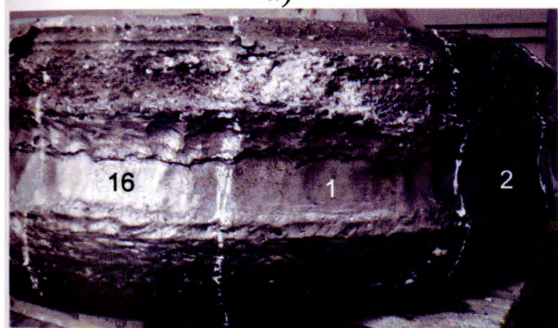
дротом марки 4604 та 4601 діаметром 2,8мм, який виготовляє фірма Castolin Eutectic [21] та наплавочним дротом, який розроблено в ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. У випадку коли наплавка зношених поверхонь уже є недоцільною (після однієї-двох наплавок) проводиться заміна робочих органів.

Як видно з табл. 3.6 починаючи з 25.01.08р. різко почала збільшуватися величина зношення поверхні «заднього» ПВ в точках 5 і 6 (16мм і 17мм). Через місяць експлуатації на 28.02.08р. величина зношення у вказаних точках вже становила 22мм і 24мм, тобто наближалася до критичного значення. Однак рішення про проведення заміни зношеного ПВ не було прийнято, оскільки на цей період часу величина зношення у вказаних точках для «правого» і «лівого» валків становила 16мм; 14мм і 5мм; 10мм відповідно. Як бачимо, найменшу величину зношення мав «лівий» валок. Після ще одного місяця експлуатації на 29.03.08р. величина зношення «заднього» валка склала 23мм і 25мм і було прийнято рішення про заміну всіх ПВ, хоча знос «правого» валка склав лише 72.0% в точці 5 і 64.0% в точці 6, а «лівого» валка відповідно 40.0% і 48.0%, тобто був найменш зношеним. Проведений аналіз роботи ПВ та БД до наплавки 5.12.07р. показав, що 4.12.07р. ВВМ був зупинений внаслідок того, що «правий» ПВ викотився на борт ПЧ через зношення упорів і самого ПВ, а під час наплавки «заднього» ПВ 5.12.07р. його заклинило в одному місці. Оскільки причина не була встановлена, то процес заклинювання цього ПВ мав місце і при його експлуатації, що і пояснює причину значного, в порівнянні з іншими ПВ, зношення «заднього» ПВ. Стосовно БД ПЧ, то її зношення було практично рівномірним в більшості точок вимірювання в одній площині і склало 30,0-35,0%. Заміну всіх ПВ та БД провели виходячи з тих міркувань, що заміна одного і наплавка двох інших може призвести до збільшення віброактивності всієї системи через нерівномірність напавленої поверхні по відношенню до поверхні нового ПВ, що в процесі їх експлуатації призведе до підвищення рівня вібрації і, як наслідок, прискореному зношенню ПВ та БД ВВМ. В той же час, як показав візуальний огляд демонтованих ПВ та БД, вимірювання величини зношення за прийнятою методикою в одній площині не дає реальної картини зношення ПВ та БД по всіх їх робочих площинах. На рис.3.17,а приведені

фотографії «заднього» ПВ на якому видно сектори 16, 1 і 2, а також «правого» (рис.3.17,б) ПВ з секторами 6 і 7. Як видно з фотографії зношення поверхні ПВ в секторах 16, 1 і 2 є досить значним, однак вимірювання величини зношення не проводилося, так як при зупинці ПВ доступною для вимірювання була протилежна його сторона, що і позначилося на отриманих результатах. Аналогічна картина мала місце і для «правого» ПВ в 8-ій і 9-ій точках вимірювання 6 і 7 секторів. Стосовно БД ПЧ спостерігається така ж картина (рис. 3.18).



а)



б)

Рис. 3.17 Фотографія секторів помольних валків: а – заднього; б – правого

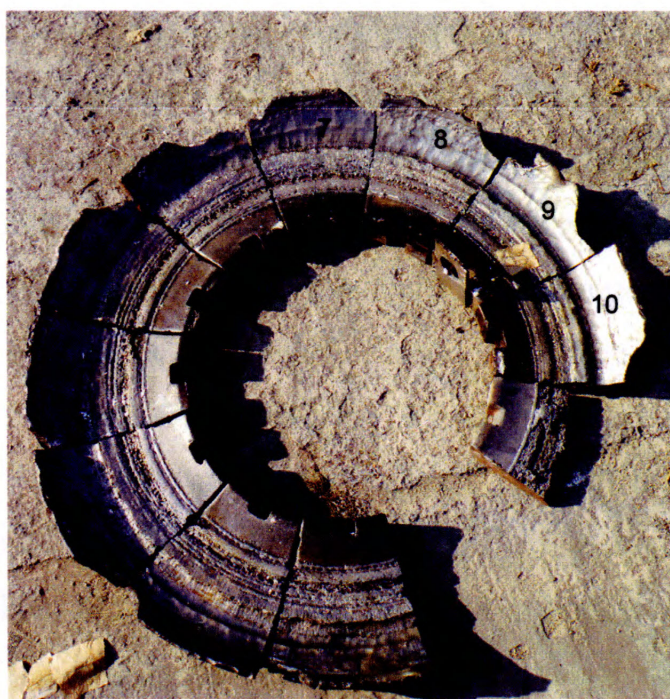


Рис. 3.18 Фотографія секторів бігової доріжки помольної частини

Вимірювання величини зношення з використанням шаблону проводилося в секторі 6, який мав найменшу величину зношення, в той час, як в секторах 1, 9 і 10 ця величина була значно більшою. Таким чином, отримані результати вимірювання величини зношення робочої поверхні валків і бігової доріжки з використанням шаблонів не дають реального значення величини і форми їх зношення, що не дозволяє встановити зв'язок величини зношення з характеристиками вібраційних процесів, що супроводжують роботу валкового млина і можуть бути використані як діагностична ознака його стану – зношення робочих поверхонь валків і бігової доріжки.

З метою встановлення реальної величини зношення робочих органів було використано метод масового вимірювання величини їх зношення. Даний метод хоча є досить трудомістким і тривалим за часом проведення, однак дозволяє встановити співвідношення між традиційним і отримати вірогідну оцінку величини зносу. Таке вимірювання величини масового зношення робочих органів достатньо провести один раз. Суть даного методу полягає в тому, що помольний валок по периметру поділяють на 16 секторів (рис.3.17). Поверхня кожного сектору очищається від зношених частинок поверхні, бруду і змащується соляркою. Далі поверхня сектора валка покривається гіпсовим розчином декілька разів з тим, щоб після застигання розчину і отримання відбитку він не розломився. Змащення поверхні валка соляркою дозволяє легко зняти отриманий відбиток. Отриманий відбиток дає можливість візуально побачити ту частину поверхні, яка була зношена. На рис. 3.19 приведені фотографії відбитків 6-го, 7-го і 2-го секторів «правого» валка, а обведені випуклі зони 2.1, 2.2 і 2.3 для сектора 2 та аналогічні зони 6.1, 6.2, 6.3 і зона 7.1 є фактично зношеним матеріалом робочої поверхні валка. Аналогічну процедуру проводили і для бігової доріжки помольної чаші. З метою отримання кількісної величини зношеного матеріалу валків та бігової доріжки проводили зрізання випуклих зон по кожному із секторів до основи поверхні валка чи бігової доріжки, а потім їх зважування. Далі проводили перерахунок питомої ваги гіпсу на питому вагу матеріалу хромкус і отримували вагову величину зношення робочих поверхонь валків і бігової доріжки помольної чаші.

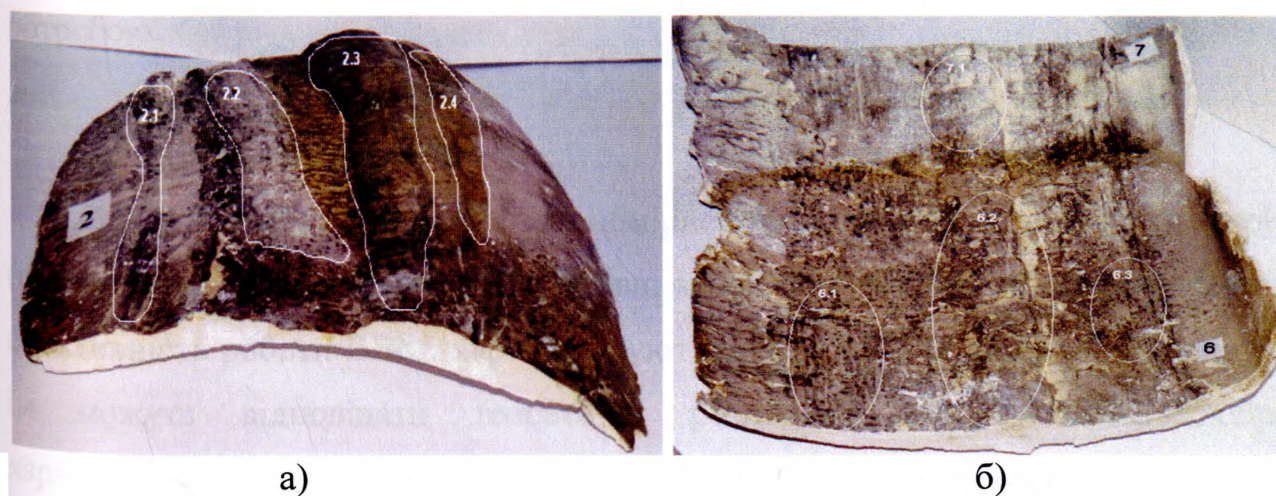


Рис. 3.19 Гіпсові відбитки секторів правого валка: а – сектор 2; б – сектор 6 і 7

Так, вагова величина зношення БД склала 48,6кг, «лівого» ПВ – 59,4кг, «правого» ПВ – 73,2кг і «заднього» – 117,8кг. Значне зношення «заднього» ПВ обумовлюється не лишень його заклинюванням, що відмічалось вище, але і інтенсивним процесом викришування наплавленого матеріалу, що можна пояснити або бракованим наплавочним дротом, або відхиленням в технології наплавки. Проведений аналіз результатів вимірювання лінійної і вагової величин зношення поверхонь ПВ та БД показав, що різниця результатів вимірювання лінійної і вагової величини зношення БД складає від 28,6% до 34,5 %, а для ПВ ця різниця є дещо більшою і складає для «лівого» ПВ до 33,8%, «правого» – 43,6% і для «заднього» ПВ до 65,0%.

Вимірювання лінійної величини зношення ПВ та БД ПЧ дає занижені результати по відношенню до реального його значення. Підвищення точності вимірювання величини зношення можливе шляхом її вимірювання в різних площинах по периметру ПВ, або БД, що технологічно неможливо здійснити.

Вимірювання вагової величини зношення робочих органів з використанням запропонованого методу відбитків дає реальні результати, однак вимагає тривалої і трудомікої процедури.

Отримані результати вагового зношення робочих поверхонь ПВ та БД при встановленні його взаємозв'язку з характеристиками вібраційних процесів, що супроводжують роботу ВВМ дозволять розробити метод діагностування його стану і тим самим автоматизувати процес контролю величини зносу робочих органів і проводити процедуру наплавки чи їх заміни за фактичною потребою.

Висновки до розділу 3

1. Проведені дослідження закономірностей розподілу впливових факторів (параметрів і показників), які є випадковими процесами і визначають ефективність роботи ВВМ, характеризуються нормальним законом розподілу і їм можуть відповідати теоретичні розподіли, які достатньо добре характеризуються першим та другим початковим та центральними моментами розподілу випадкових величин.

Досліджені випадкові процеси є стаціонарними у широкому розумінні, що дозволяє достатньо коректно використати математичний апарат ергодичних випадкових процесів при їх подальшому дослідженні.

2. Проведений факторний аналіз показав, що найбільш суттєвим параметром впливу на технічний стан ВВМ є його вібрація, оскільки його кореляція з параметрами $P_n(t)$, $S_n(t)$, $T_P(t)$, $N_C(t)$, $Q_{VS}(t)$, $V_{VS}(t)$ є високою (0,803-0,905), що дозволило уточнити діагностичну модель ВВМ.

3. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень на ВВМ, що передбачає п'ять етапів проведення досліджень, два із яких є підготовчими, а інші передбачають проведення вимірювання вібрації у вибраних контрольних точках ВВМ, зняття його ПХ та вимірювання величини зношування поверхонь ПВ та БД, результати яких послугують основою розробки методів контролю технічного стану робочих органів ВВМ.

4. Розроблено технічне і програмне забезпечення експериментальних досліджень, використання якого дозволяє провести комплекс запланованих експериментів та провести оперативну обробку отриманих даних.

5. Розроблена методика визначення масового зносу поверхонь робочих органів ВВМ, яка показала, що різниця результатів вимірювання лінійної величини зносу в перерахунку на масову для БД складає в середньому від 28,6% до 34,5 %, а для помольних валків ця різниця є дещо більшою і складає для «лівого» валка до 33,8%, «правого» валка – 43,6% і для «заднього» валка до 65,0%. Вказане дозволяє врахувати похибку традиційного методу вимірювання величини зносу з тим, щоб в процесі подальших експериментів при проведенні вимірювання величини зносу робочих органів її врахувати.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВВМ

4.1. Характеристика експериментального матеріалу

В результаті проведених на протязі двох років досліджень на діючому ВВМ був отриманий значний об'єм експериментального матеріалу. Проаналізуємо його з точки зору вирішення поставлених в роботі задач.

Однією з таких задач було встановлення взаємозв'язку характеристик вібраційних процесів, що супроводжують роботу ВВМ із зміною його технічного стану. Відповідно до розробленої методики експериментальних досліджень і вибраних вібродавачів проводилося вимірювання віброактивності ПЧ як з використанням давача вібрації AP21, так і штатного давача Shenck VS-069, встановленого на корпусі підшипника редуктора. Приклади запису вібрації наведені в Додатку В.

Вимірювання віброактивності гідроциліндрів проводили в контрольній точці на його корпусі. Результати проведеного запису вібростану наведені на рис. 4.1.

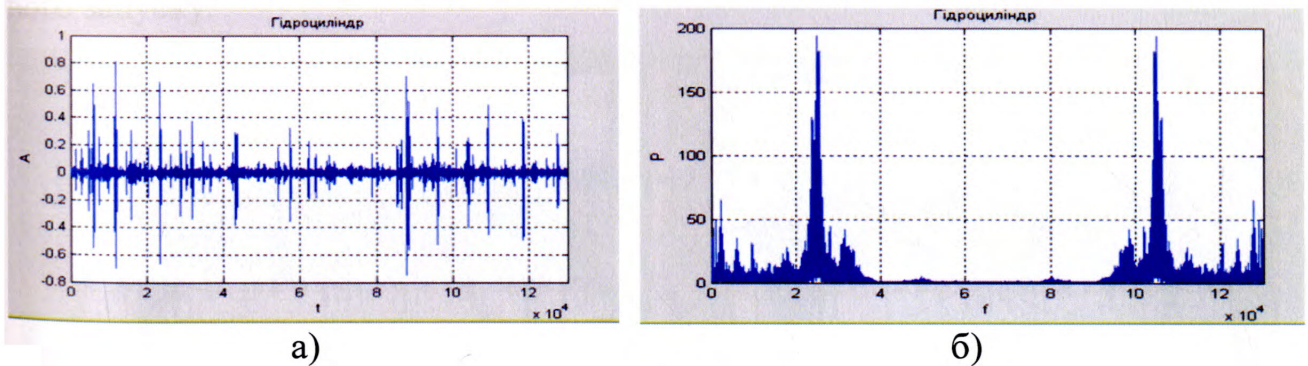


Рис. 4.1 Сигнал з гідроциліндра: а) віброприскорення; б) спектр віброприскорення

Результати вимірювання вібростану підшипника привідного електродвигуна наведені на рис. 4.2.

Було отримано більше тридцяти реалізацій віброприскорень вказаних вузлів ВВМ. Проведений аналіз їх частотних спектрів не дозволив виявити відповідних гармонічних, субгармонічних чи просто спектральних складових,

зміна яких корелювала б зі зміною технічного стану робочих органів ВВМ. Що стосується вібростану помольної чаші, то вибір частотної смуги, в якій зміна спектральних складових характеризує зміну технічного стану робочих органів, слід проводити з використанням отриманих результатів аналітичних досліджень, проведених в розд. 2.2-2.3.

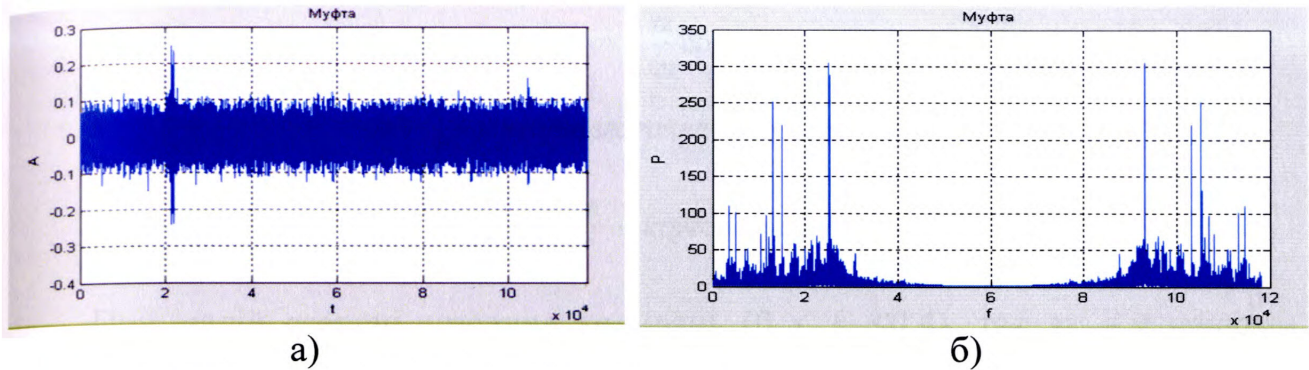


Рис. 4.2 Сигнал з підшипника: а) віброприскорення; б) спектр віброприскорення

Зупинимося більш детально на можливості використання як розгінної (ПХ) ВВМ зміну віброприскорення в часі при його запуску, за допомогою якої в подальшому можна буде провести ідентифікацію ВВМ та визначити його технічний стан. На рис.4.3 наведено віброграму віброприскорення ВВМ при його запуску.

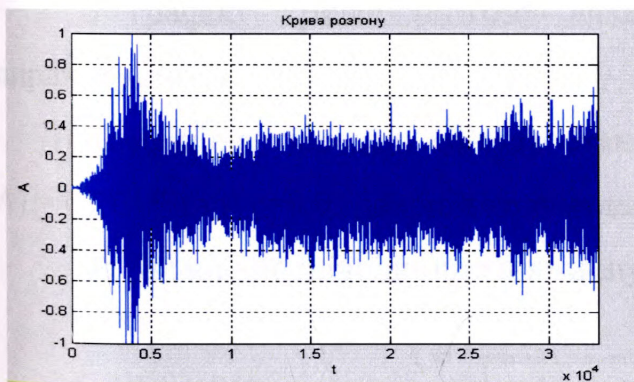


Рис. 4.3 Віброграма віброприскорення запуску ВВМ

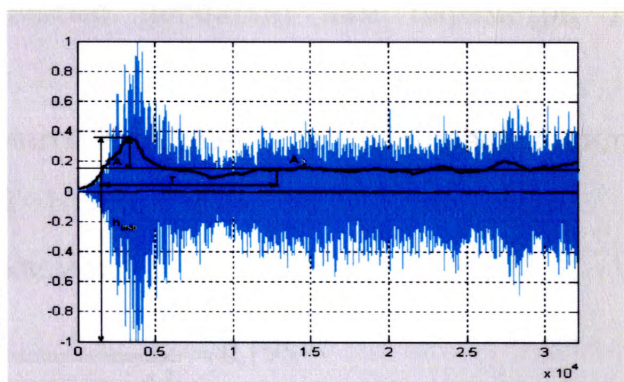


Рис. 4.4 Крива розгону: середньоквадратичне відхилення, математичне очікування

Оскільки вібросигнал є значно зашумленим (рис. 4.3), була проведена його обробка за допомогою Matlab R2006a [53] та виділена його огинаюча (рис. 4.4).

Оскільки наша експериментальна перехідна характеристика має коливний

характер, функцію передачі ВВМ шукаємо у наступному вигляді:

$$W(s) = \frac{K}{T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1}, \quad (4.1)$$

де T_0 – постійна часу об'єкту; ξ – коефіцієнт демпфування.

ПХ подібного об'єкту визначається наступним виразом [53,56]:

$$h(t)/K = 1 - \left(\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right);$$

$$\alpha = \frac{\xi}{T} - \text{ступінь згасання};$$

$$\omega = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T_0} = \frac{2\pi}{T} - \text{кругова частота коливань}.$$

При малій степені згасання коливань ($0 < \xi < 0.4$), так як і у нашому випадку, експериментальна крива розгону має декілька максимальних відхилень. В цьому випадку зазвичай знімають з кривої розгону два послідовних викиди A_1 та A_2 і період коливань T .

Шукані параметри об'єкту визначаються за наступними співвідношеннями:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\ln(A_1/A_2)} \right)^2}}; \quad T_0 = \frac{T \sqrt{1 - \xi^2}}{2\pi}.$$

З графіку кривої розгону визначаємо необхідні нам параметри та вираховуємо їх.

Коефіцієнт передачі об'єкту становить $K=0,1634$, два послідовні викиди $A_1=0,2015$ та $A_2=0,02$, період коливань $T=10300$.

За заданими співвідношеннями шукаємо:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\ln(0,2015/0,02)} \right)^2}} = 0,195$$

$$T_0 = \frac{T \sqrt{1 - \xi^2}}{2\pi} = 1138,9.$$

Підставляємо знайдені параметри у формулу функції передачі об'єкту:

$$W(s) = \frac{0,1634}{1299600s^2 + 444,6s + 1}. \quad (4.2)$$

Оцінюємо точність відновлення параметрів теоретичної функції передачі побудовою відновленого перехідного процесу за допомогою Matlab.

Як видно з рис. 4.5 відновлений перехідний процес наближений до отриманого експериментальним шляхом. Неточності відновлення виникають внаслідок похибки вібродавача та збурюючих факторів.

Знайдемо похибку відновлення ПП. Для цього за допомогою Matlab виділимо шум відновлення шляхом віднімання двох кривих та знайдемо середньоквадратичне відхилення шуму (рис.4.6).

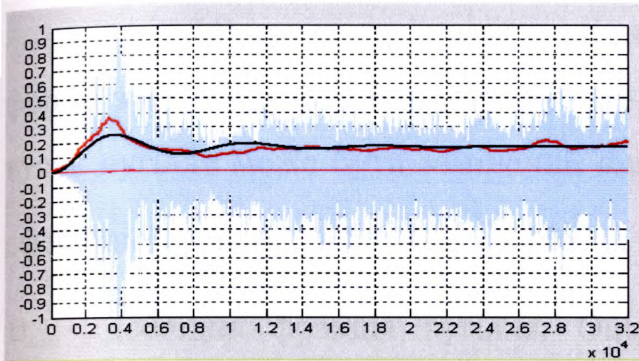


Рис. 4.5 Крива розгону ВВМ та відновлений ПП.

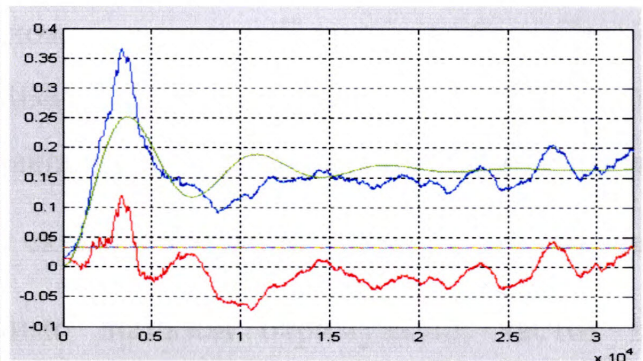


Рис. 4.6 Графіки визначення похибки вимірювання ПП

Воно становить від 0,05 до 0,11, тобто похибка ідентифікації складає 5,0-10%, що не дозволяє використовувати зміну віброприскорення при запуску ВВМ за його ПХ. Таким чином в подальших експериментах за ПХ ВВМ використовували швидкість обертання ПЧ, процедура зняття якої детально описана в розд.3.4. Приклади графіків ПХ наведені в Додатку В.

Всього за два роки експериментальних досліджень було знято 46 перехідних характеристик. Як видно з рис. 3.16, на якому наведена типова ПХ, вона має значні збурення, обумовлені випадковим характером зміни моменту опору двигуна, що виникає під час помолу. Крім того, ділянка характеристики, що представляє процес виходу на режим значно відрізняється від звичайної форми, яка для лінійної системи повинна бути сумою експонент. Це пояснюється тим, що привідний асинхронний двигун валу має велику потужність (250 кВт) і тому не може бути миттєво включений на номінальну напругу. Для плавного виводу на режим таких двигунів застосовуються спеціальні пускові пристрої, які здійснюють повільне збільшення струму.

Таким чином, крива, наведена на рис. 3.16, строго не є ПХ, оскільки остання повинна представляти собою реакцію двигуна на ступінчате збудження. Тому для цілей ідентифікації в подальшому будемо розглядати як ділянку характеристики, що представляє процес виходу на режим, так і ділянку встановленого режиму, яка може бути представлена випадковим процесом.

4.2. Розроблення методу контролю технічного стану ВВМ за його вібраційними характеристиками

В [67,70] розглянуті теоретичні положення взаємодії кусків вугілля різної форми з ПЧ в процесі їх руйнування у ВВМ. Прийmemo, що кожний довільний кусок вугілля може бути замінений однаковим по масі ідеальним фрагментом сферичної форми (п.6 табл. 1 з [767]), з еквівалентним радіусом $R_{екв} = \frac{D_{фракц}}{2}$, де $D_{фракц}$ - дослідна фракція вугілля. Оцінимо діапазон отримуваних частот в залежності від $R_{екв}$ [91]. З аналізу початкових параметрів вугілля, на основі яких проектувалась замкнута схема виробництва пилевугільної суміші, встановлено, що типовий діапазон $R_{екв}$ для різних кусків вугілля становить від 0 до 25 мм, при цьому основна частина зразків (95% від загальної маси, згідно технічної документації на ВВМ [92]) лежить в межах від 0 до 17,5мм. Реально використовуване вугілля може дещо відрізнитись від прийнятих під час проектування млина норм. Оцінимо мінімально діагностований вплив вугільних фракцій на формування вібромеханічних коливань виходячи з точності перетворення п'єзоелектричних перетворювачів. Похибка вимірювання вібрації помольної чаші за допомогою штатного приладу VibroControl 1100, згідно паспортних даних складає 2% від повної шкали приладу. Виходячи з того, що фрагменти вугілля мінімального еквівалентного радіусу спричиняють коливання найбільшої частоти і найменшої амплітуди, визначимо цей мінімальний еквівалентний радіус: $R_{min} = 0,02 \cdot R_{max} = 0,02 \cdot 25 = 0,5$ мм. Коливання утворені від частинок менших за даний радіус формують амплітуду коливань, що знаходиться нижче точності вимірювання давача. Крім того, аналіз високочастотних коливань, які виникають при взаємодії частинок з

радіусом меншим за R_{\min} , є недоцільним, оскільки містять джерела природних шумів і завад, притаманних самому процесу функціонування ВВМ.

Удари, які виникають при перекочуванні ПВ через поверхню робочої речовини, утвореною різними за розмірами фрагментами вугілля, мають найбільшу амплітуду, оскільки спричинені значним тиском ПВ на робочу поверхню БД ПЧ, і, отже, мають найбільший вплив на процес зношування ПВ та БД. Оскільки вугільний робочий шар має випадкову структуру, зумовлену випадковими розмірами окремих його фрагментів, та їх випадковим розташуванням на поверхні бігової доріжки ПЧ, то одержаний сигнал буде шумовим в діапазоні $f_{\min} \dots f_{\max}$. Для визначення значень граничних частот, визначимо швидкості руху крайніх точок бігової доріжки A_1 і A_2 (див. рис.4.7).

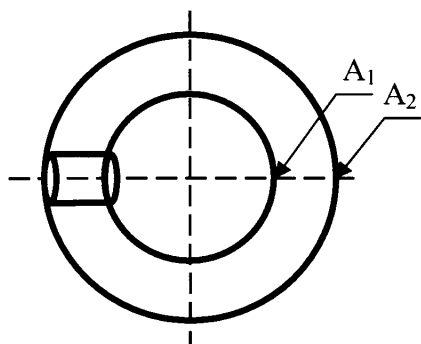


Рис. 4.7 Схема руху помольного валка відносно бігової доріжки помольної чаші

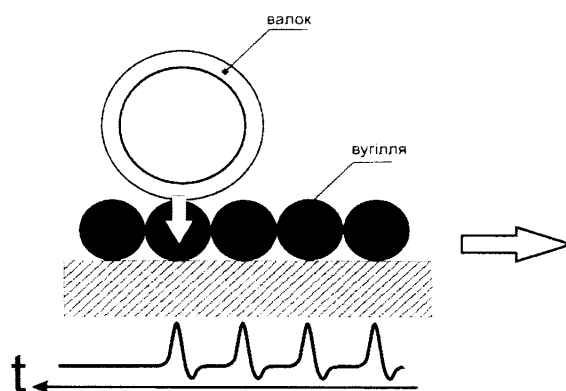


Рис. 4.8 Схема процесу формування імпульсів в процесі роботи помольної чаші вертикального валкового млина

Згідно технічної документації, діаметр внутрішнього кола бігової доріжки помольної чаші (див.т.А₁) $D_1 = 1\text{ м.}$, діаметр зовнішнього кола $D_2 = 1,8\text{ м.}$ Кількість обертів бігової доріжки за хвилину складає $n = 38$. За один оберт бігова доріжка проходить шлях відносно точки A_1 : $s_1 = \pi D_1 = 3,142 \cdot 1 = 3,142\text{ м.}$ відносно точки A_2 : $s_2 = \pi D_2 = 3,142 \cdot 1,8 = 5,654\text{ м.}$ Швидкість бігової доріжки помольної чаші відносно точки A_1 : $g_1 = \frac{ns_1}{60} = \frac{38 \cdot 3,142}{60} = 1,989 \approx 2\text{ м/с.}$ Швидкість бігової доріжки відносно точки A_2 : $g_2 = \frac{ns_2}{60} = \frac{38 \cdot 5,655}{60} = 3,581\text{ м/с.}$ Визначимо частоти, які можуть утворюватись при максимальному розмірі фрагментів вугілля.

За умови, що робоча поверхня складається з вугілля максимально допустимого розміру (5% випадків), кількість шматків з $R_{екв} = 25$ мм, які можна викласти по внутрішньому колу A_1 становитиме: $n_{A1}^{25} = \frac{s_1}{2R_{екв}} = \frac{3,142}{2 \cdot 25} \approx 63$. У

випадку $R_{екв} = 17,5$ мм. (95%), які можна викласти по внутрішньому колу A_1 становитиме: $n_{A1}^{17,5} = \frac{s_1}{2R_{екв}} = \frac{3,142}{2 \cdot 17,5} = 89,759 \approx 90$.

Процес генерації імпульсів при роботі помольної чаші вертикального валкового млина ілюстрований на рис.4.8.

Основне припущення при формуванні імпульсів полягає в тому, що імпульси формуються внаслідок розколювання фрагментів вугілля при їх проходженні через валок. При цьому руйнування робочих поверхонь вузлів помольної чаші відбувається як внаслідок вдавлювання шматків вугілля в метал перед розколюванням, так і внаслідок співударів (через середовище вугільного шару, що складається з фрагментів меншого еквівалентного радіусу) робочих поверхонь після стрибкоподібного усунення розколотих фрагментів вугілля з робочої зони. Часові періоди між імпульсами та частота їх слідування в цьому випадку можуть бути розраховані наступним чином.

$$\text{Для радіусу } R_{екв} = 25 \text{ мм: } T_1^{25} = \frac{T_{\Sigma}}{n_{A1}^{25}} = \frac{1,579}{63} = 0,025 \text{ с. } f_1^{25} = \frac{1}{T_1^{25}} = 39,89 \approx 40 \text{ Гц.}$$

$$\text{Аналогічно для радіусу } R_{екв} = 17,5 \text{ мм: } f_1^{17,5} = \frac{1}{T_1^{17,5}} = 56,998 \approx 57 \text{ Гц.}$$

Якщо робоча поверхня складається з вугілля максимально допустимого розміру (5% випадків), кількість шматків з $R_{екв} = 25$ мм, які можна викласти по зовнішньому колу БД A_2 становитиме: $n_{A2}^{25} = \frac{s_2}{2R_{екв}} = \frac{5,654}{2 \cdot 25} = 113,08 \approx 113$. У

випадку $R_{екв} = 17,5$ мм. (95%), які можна викласти по зовнішньому колу A_2 становитиме: $n_{A2}^{17,5} = \frac{s_2}{2R_{екв}} = \frac{5,654}{2 \cdot 17,5} = 161,54 \approx 162$. Часові періоди між імпульсами

та частота їх слідування для радіусу $R_{екв} = 25$ мм. $f_2^{25} = \frac{1}{T_2^{25}} = 71,564 \approx 72$ Гц. Для

радіусу $R_{екв} = 17,5$ мм: $f_2^{17,5} = \frac{1}{T_2^{17,5}} = 102,3 \approx 102$ Гц.

Враховуючи те, що основним джерелом віброакустичних завад є привідний електродвигун млина потужністю 250кВт, то згідно з [93] з розгляду слід усунути діапазон частот [100...4000] Гц, оскільки в цьому діапазоні сконцентровані основні завади від електродвигуна та повітрорудки. Внаслідок значних притискних зусиль, фрагменти вугілля руйнують робочі поверхні ПВ та БД. Оцінити ступінь зносу ПВ та БД можна, знаючи твердість сплаву, з якого вони виготовлені. Згідно технічної документації, робочі поверхні ПВ та БД виготовлені з сплаву Ni – Hard 4, твердість якого складає HB=600 (по Брінелю). Число HB дорівнює відношенню сили F , що вдавлює мірну кульку діаметру D до площі одержаного відбитка з діаметром d (див рис. 4.9):

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4.3) [94]$$

звідси

$$d = \sqrt{D^2 - \left[D - \frac{2F}{\pi D \cdot HB} \right]^2}. \quad (4.4)$$

Глибина вдавлювання кульки:

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} = \frac{1}{2} \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]. \quad (4.5) [95]$$

Об'єм, що видавлюється кулькою:

$$V = \frac{1}{3} \pi h^2 \left(\frac{3D}{2} - h \right). \quad (4.6) [95]$$

Знаючи значення HB, розміри кульок еквівалентних розмірам вугільних фрагментів, та силу притиску F можна визначити глибину вдавлювання фрагменту h в робочу поверхню БД ПЧ. В такому разі процес розмелювання можна представити наступним чином, як показано на рис. 4.10.

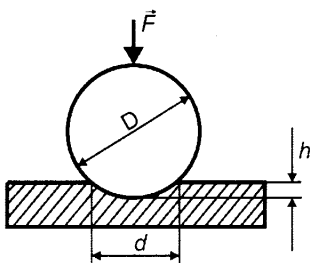


Рис. 4.9 Схема позначень для дослідження вдавлювання мірної кульки



Рис. 4.10 Схема моделі оптимального помолу вугілля у ВВМ

Ширина контактної зони буде визначатись найбільшим еквівалентним радіусом вугільного фрагмента, що контактує з поверхнями ПВ та БД ПЧ. Визначимо ширину контактної зони ПВ на основі геометричних співвідношень (див. рис.4.11).

Прийmemo позначення $b = R + r$ та $X = R - r$, де R - радіус валка і r - еквівалентний радіус розмелюваного фрагмента. Тоді із рівняння $X^2 + Z^2 = b^2$ визначимо, що $Z = \sqrt{b^2 - X^2} = \sqrt{(R+r)^2 - (R-r)^2}$. При цьому $\cos\alpha = \frac{Z}{b}$. Звідси визначимо ширину контактної зони:

$$Z' = R \cos\alpha = \frac{RZ}{b} = \frac{R\sqrt{(R+r)^2 - (R-r)^2}}{R+r}. \quad (4.7)$$

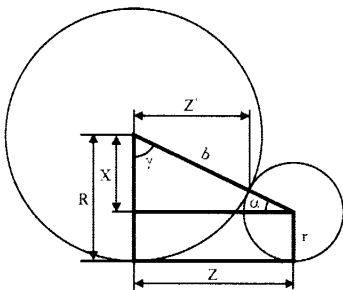


Рис. 4.11 Геометричні

співвідношення до визначення ширини контактної зони валка Z' та бігової доріжки Z

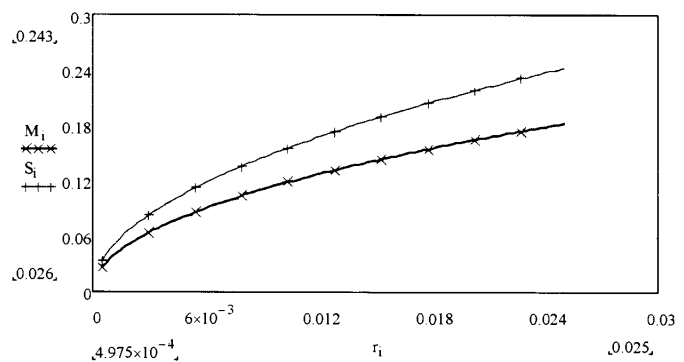


Рис. 4.12 Залежність контактних площ $M(r)$ і $S(r)$ від радіусів r максимальних вугільних фрагментів

Звідси контактна площа циліндричної поверхні ПВ може бути визначена наступним чином:

$$M = \gamma R Q = R Q \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{2\sqrt{Rr}}{R+r} \right) \right), \quad (4.8)$$

де Q - висота циліндра валка ($Q=0,36$ м).

Контактна площа на поверхні БД наближено, без врахування її кривизни, може бути визначена так:

$$S \approx ZQ = Q\sqrt{(R+r)^2 - (R-r)^2} = 2 \cdot Q\sqrt{Rr}. \quad (4.9)$$

Для розглянутих радіусів вугільних фрагментів (0,25...25мм) зміна контактних площ $M(r)$ та $S(r)$ [м²] може бути представлена у графічному вигляді (див. рис.4.12).

Слід зауважити, що при роботі контактні площі квазівипадково змінюються, внаслідок неупорядкованої наявності вугільних фрагментів довільного розміру, однак процес має системність внаслідок клиноподібної контактної зони, представленої на рис 4.11.

Сила притиску ПВ визначається так:

$$\vec{F} = mg + \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot P_g, \quad (4.10)$$

де $m = 2110$ кг - маса валка, $d_c = 150$ мм – діаметр поршня гідравлічної притискної системи, $P_g = 80 \dots 90$ Бар = 8..9 МПа. Підставивши дані в (4.10), отримаємо

мінімальну притискну силу : $\vec{F}_{\min} = mg + \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot P_g = 1,621 \cdot 10^5$ Н $\approx 16,2$ т.

Максимальна притискна сила: $\vec{F}_{\max} = 1,797 \cdot 10^5$ н $\approx 18,0$ т.

Одержані розрахункові дані дозволяють остаточно сформулювати алгоритм вібродіагностування технічного стану робочих органів – ПВ та БД, який має наступний вигляд:

1. За допомогою аналізу частотного діапазону 60-100Гц визначаємо питому кількість і орієнтовні розміри фрагментів робочої речовини еквівалентного радіусу 17,5-25мм.

2. Знаючи статистичний розподіл розмірів фрагментів робочої речовини (вугілля), визначаємо питому кількість всіх значимих фрагментів робочої речовини, що впливає на процес зношування поверхонь ПВ та БД шляхом вдавлювання.

3. Визначаємо контактну площу робочої зони на основі розмірів і кількості обчислених фрагментів робочої речовини.

4. Визначаємо питомий об'єм за одиницю часу зруйнованої поверхні ПВ та БД, знаючи силу притиску і контактну площу.

5. Інтегруємо одержаний об'єм в часі і у випадку перевищення ним допустимих границь сигналізуємо про необхідність зупинки ВВМ.

6. Сигналізуємо про необхідність зупинки при появі періодичних ударів, що виходять за допустимі межі, що може свідчити про руйнування одного з робочих секторів БД.

7. Повторюємо п.1-6 постійно.

Наявні вихідні дані, дозволяють реалізувати даний алгоритм на ЕОМ.

Таким чином, наведений алгоритм дозволить оцінити рівень зношеності робочих поверхонь ПВ та БД ВВМ на основі вимірювання та аналізу його вібраційних характеристик.

4.3. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ за його розгінною характеристикою

В [96] було висловлено гіпотезу про зміну характеру розгінної характеристики ВВМ в залежності від величини зносу його робочих органів (близько 300 кг [17]) і може сягати 600кг. Оскільки знос призводить до деякого зменшення маси ПВ та БД, можна припустити, що при цьому змінюються динамічні характеристики ВВМ, що може виявлятися у зміні ПХ.

Знаючи ПХ, можна оцінити параметри об'єкта (наприклад, коефіцієнти поліномів або значення нулів і полюсів дробово-раціональної функції передачі) одним із відомих методів. Таким чином, необхідно вирішити задачу ідентифікації лінійної системи за ПХ і встановити наявність та характер залежності між величиною зношування робочих органів ВВМ, чи часом їх напрацювання, з одного боку, та значеннями параметрів його і функції передачі – з іншого.

Для систем невисокого порядку (1,2) було розроблено ряд методів (ідентифікація систем другого порядку, ідентифікація методом кратних коренів та ідентифікація дискретних систем довільного порядку [57]), які дозволяють безпосередньо за виглядом ПХ оцінити значення коефіцієнтів функції передачі системи. Ідентифікація лінійних динамічних систем переліченими методами може бути реалізована в середовищі Matlab у пакеті System Identification Toolbox [58,59].

Для визначення найбільш доцільного методу ідентифікації із зазначених

вище, проаналізуємо вигляд типових ПХ ВВМ та систему в цілому з точки зору її аналітичного опису.

Деякі ПХ для прикладу наведено на рис. 4.13, з якого видно, що вони мають дещо складніший вигляд, ніж типова перехідна характеристика системи другого порядку, що вже було відмічено в роз. 4.1. Зокрема, на ній можна нарахувати не менше трьох точок перегину, причому кількість таких точок та точність визначення їх положення буде залежати від вибраного способу та якості згладжування. Таким чином, спрощені методи ідентифікації, зазначені вище, непридатні для аналізу об'єкту ідентифікації, оскільки порядок системи є більшим ніж 2.

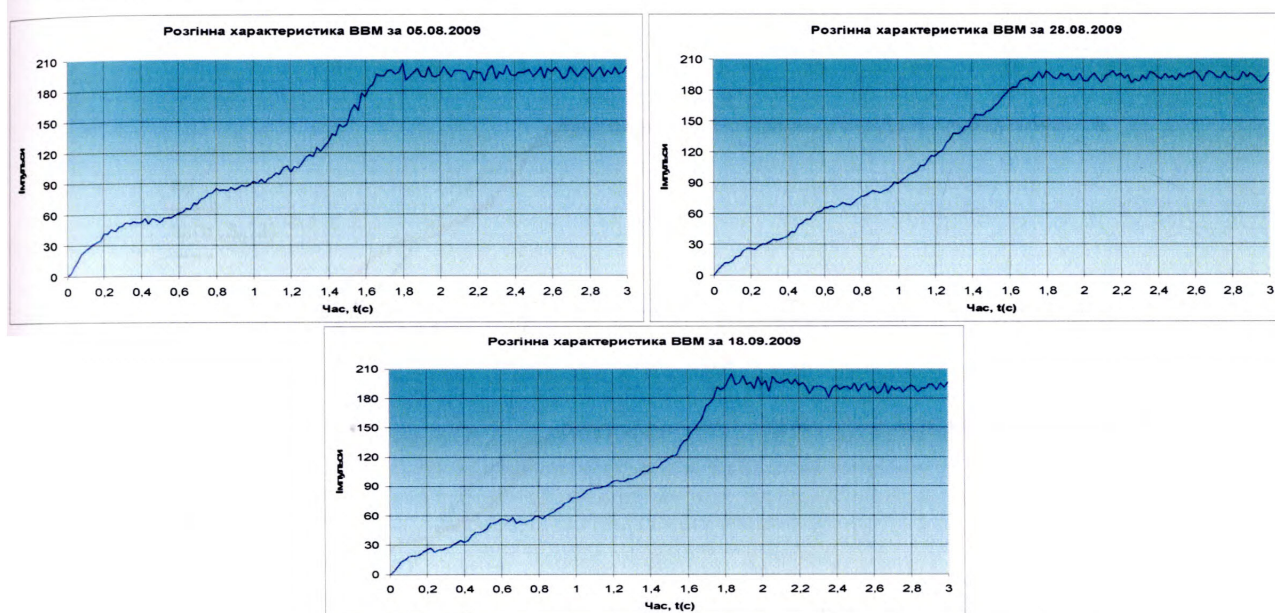


Рис. 4.13 Експериментальні ПХ ВВМ

Розглянемо можливість застосування методу кратних коренів. Як видно з рис.4.14, характер ПХ у випадку кратних полюсів функції передачі також не дозволяє відтворити особливості експериментальної ПХ, оскільки також має всього одну точку перегину.

Тим не менше, даний метод можна застосувати для наближеного визначення постійної часу, яку можна розглядати як інформативний параметр ПХ, що може бути застосований в цілях діагностування. Для перевірки цього припущення було реалізовано алгоритм, описаний в [57] в середовищі MathCad та проведено обчислення оптимального порядку і постійної часу досліджуваної системи для всіх ПХ, отриманих в період 05.08.2009-27.11.2009р (всього 27

дослідів). На рис.4.15 показано значення визначених оптимальних порядків (по осі абсцис відкладено час напрацювання в добах, який для першого досліду прийнято рівним 0). Оптимальний порядок в більшості випадків складав 2 (для 17 дослідів) або 3 (для 8 дослідів). Як видно з рис.4.16, ПХ для системи другого та третього порядку по формі суттєво відрізняються від експериментальної кривої, але тривалість ПП (час встановлення усталеного значення) визначається приблизно правильно.

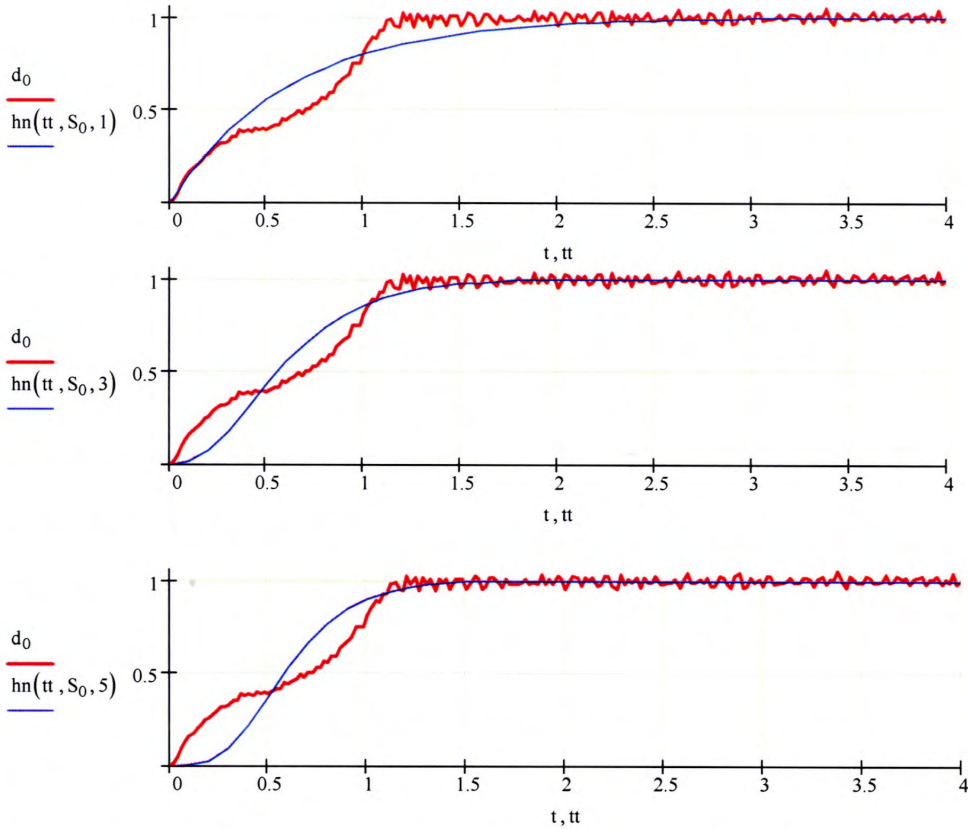


Рис. 4.14 Вигляд ПХ у випадку кратних коренів порядків 1, 3 та 5 в порівнянні з експериментальною ПХ

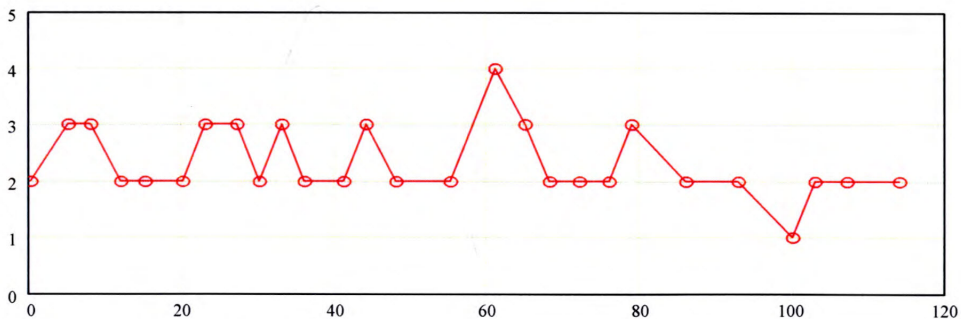


Рис. 4.15 Порядок системи, визначений методом кратних коренів

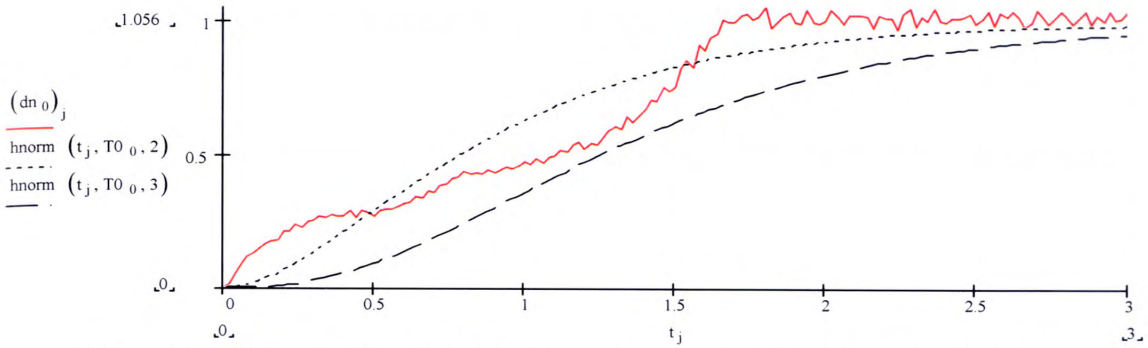


Рис. 4.16 Результат ідентифікації методом кратних коренів

Слід зауважити, що оскільки постійна часу визначається як $T=S/N$, де S – площа між нормованою ПХ та ustalеним значенням, а N – порядок системи, то для того, щоб можна було порівнювати постійні часу, визначені для різних дослідів, треба обрати для всіх дослідів одне і те ж значення порядку. Приймаючи $N=2$, отримуємо результат, представлений на рис. 4.17.

Значення постійної часу змінюється по мірі напрацювання достатньо випадковим чином. Втім, згладжування результату методом ковзного середнього з Гаусівським вікном шириною 20 днів (штрихова лінія на рис.4.17) показує незначну тенденцію до зменшення сталої часу із напрацюванням. Однак величина такого зменшення (0,165 – різниця між значеннями постійної часу для першого та останнього дослідів) є навіть меншою, ніж, наприклад, різниця між постійними часу для деяких послідовних дослідів (0,206 для дослідів за 15 вересня та 18 вересня). Випадковий характер зміни постійної часу із напрацюванням не дозволяє використати цей показник за ДО. В той же час наявність слабого низхідного тренду вказує на те, що застосування моделей вищих порядків, що більш адекватно описують експериментальні дані, може дати позитивний результат.

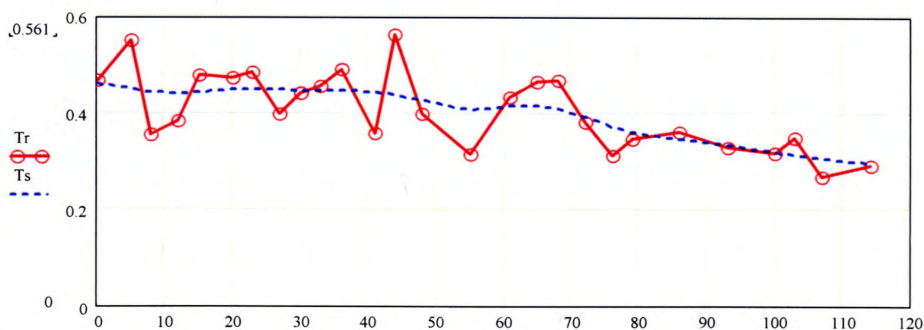


Рис. 4.17 Постійна часу ПХ в залежності від часу напрацювання

Для визначення орієнтовного порядку моделі розглянемо структурну схему об'єкта дослідження (рис. 4.18, а).

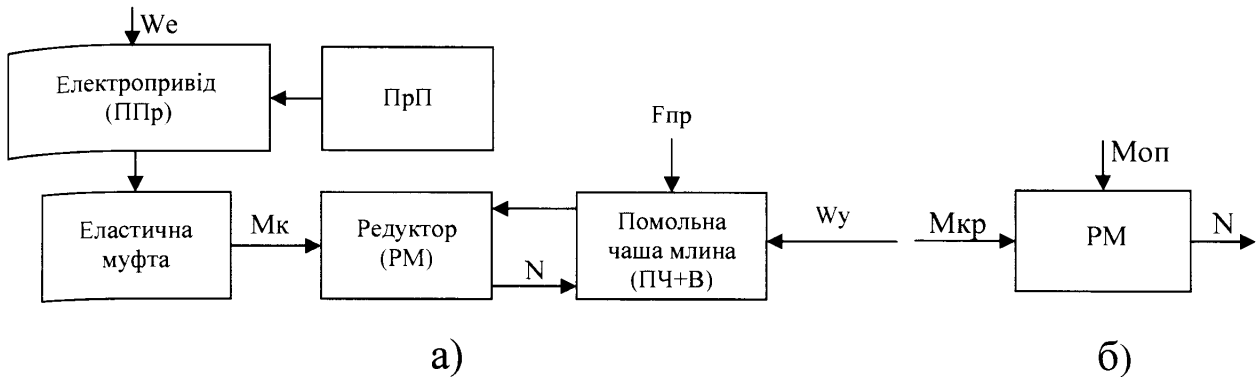


Рис. 4.18 Структурна схема ВВМ (а) та спрощена схема ідентифікації (б)

Вихідним сигналом системи є швидкість обертання ПЧ. Чаша приводиться у рух за допомогою електроприводу. Роботу ВВМ супроводжують випадкові збурення, зумовлені головним чином ударними навантаженнями і вібрацією, що виникають в процесі помолу вугілля.

АД в найпростішому випадку описується функцією передачі другого порядку відносно швидкості [97]:

$$K(p) = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1},$$

де T_1 , T_2 - відповідно електромеханічна постійна часу АД та електрична постійна часу обмотки керування. Крім того, статична характеристика АД характеризується нелінійністю на краях інтервалу допустимих значень та зоною нечутливості в околі нуля, однак для широкого діапазону робочих значень ці ефекти можна не враховувати.

В середовищі Matlab (бібліотека SimPowerSystems) електрична частина АД описується моделлю четвертого порядку, а механічна – моделлю другого порядку відносно кута обертання. Відповідно, відносно швидкості обертання порядок моделі дорівнює п'яти.

На рис. 4.19 наведена ПХ АД, побудована в середовищі Matlab з використанням бібліотечної моделі АД з характеристиками, найбільш близькими до того, що використовується в об'єкті дослідження.

Еластична муфта може бути змодельована як ланка першого або другого порядку [97]. Редуктор в більшості випадків описують як підсилювальну ланку, коефіцієнт передачі якої дорівнює передавальному числу редуктора. Якщо враховувати інерційні властивості зубчатих коліс редуктора, його також слід описувати як ланку першого порядку відносно швидкості. Рух ПЧ також описується лінійним диференціальним рівнянням другого порядку відносно кута обертання.

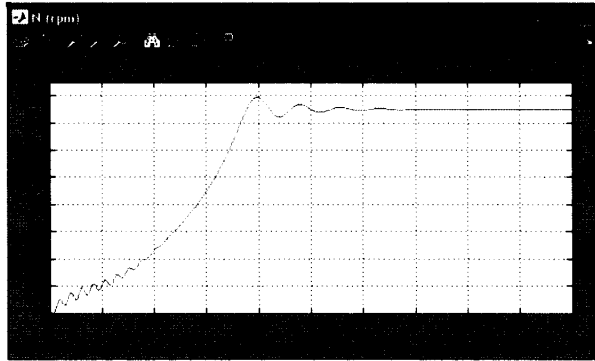


Рис. 4.19 Перехідна характеристика АД

Таким чином, загальний порядок системи в залежності від ступеня прийнятих спрощень може складати від 4 до 10. Ідентифікацію такої системи найбільш доцільно проводити з використанням існуючих пакетів математичної обробки, наприклад Matlab System Identification Toolbox.

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено наявність залежності між зносом ПВ та БД ВВМ та його ПХ. Використаний в дослідженні простий метод ідентифікації не дозволяє виділити адекватну ДО для визначення технічного стану об'єкта, тому для практичного використання даної залежності необхідно застосувати складніші методи ідентифікації лінійних динамічних систем, використовуючи моделі вищих порядків.

4.4. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ за уточненою перехідною характеристикою

Отримані в розд. 4.3 результати досліджень по визначенню ДО технічного стану робочих органів ВВМ на основі його ПХ не дозволяють дати однозначної відповіді стосовно розробки на її основі методу контролю стану

ПВ та БД ВВМ в процесі його експлуатації. Останнє пояснюється спрощенням задачі ідентифікації у припущенні про вхідний сигнал системи у вигляді функції Хевісайда в поєднанні із складністю ідентифікації системи високого порядку, в якій робочі органи ВВМ створюють, очевидно, недостатньо значний вклад у функцію передачі системи в цілому.

Розглянемо процедуру вибору ДО стану ПВ та БД ВВМ на основі методу його параметричної ідентифікації за уточненою ПХ, отриманою за рахунок додаткового і одночасного вимірювання сигналу швидкості обертання на привідному валу АД [98]. Це дозволить, по перше, точно знати вхідний сигнал системи, яка підлягає ідентифікації, та, по-друге, виконувати ідентифікацію системи нижчого порядку, оскільки, як уже вказувалось раніше [96], лише АД описується ланкою 2...5 порядку, в той час як загальний порядок системи складає 7..10.

Приклад одночасно виміряних ПХ АД та ПЧ приведено на рис.4.20.

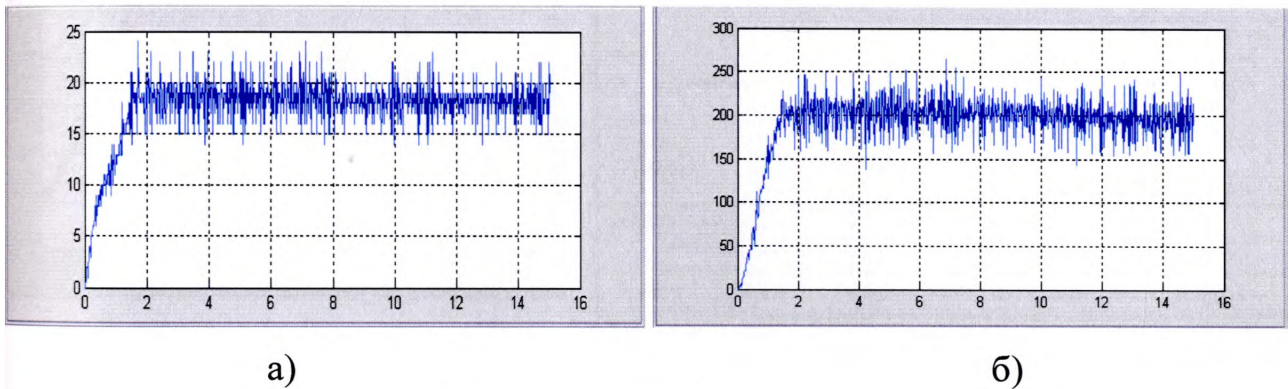


Рис. 4.20 Одночасні виміряні ПХ АД (а) та ПЧ (б)

Для отриманих наборів даних було проведено параметричну ідентифікацію за методикою, аналогічною до викладеної в розд. 4.5. На першому етапі було визначено орієнтовний порядок моделі та її оптимальний тип. Серед моделей ARX, ARMAX, OE, BJ, як і в [96], оптимальною виявилась модель Output-Error. На рис.4.21 наведено приклад результату симуляції виходу моделі, де для кожної моделі показано лише результат симуляції для мінімальних порядків, які забезпечують достатню ступінь співпадіння. Наприклад, вихід моделі OE з порядками $nb=3$, $nf=3$, $nk=2$ та з порядками $nb=7$, $nf=7$, $nk=2$ відрізняються на величину порядку 2%, але кількість параметрів, які

підлягають ідентифікації, суттєво нижча, в зв'язку з чим за оптимальний прийнято перший набір порядків.

З аналогічних міркувань даній моделі надається перевага перед моделлю Бокса-Дженкінса з порядками $nb=3$, $nf=5$, $nk=2$, $nd=3$, $nc=3$. Результат вибору моделі для всіх п'яти експериментів наведено в табл. 4.1.

Дані результати свідчать, що порядок системи, яка підлягає ідентифікації, можна обрати рівним 3. В зв'язку з цим для виконання параметричної ідентифікації можна застосувати також засіб ідентифікації моделей низького порядку (1...3) систем неперервного часу (Low-Order, Continuous-Time Process Models) середовища Matlab, де модель представляється у вигляді неперервної передавальної функції та оцінюються її параметри, такі як коефіцієнт підсилення, запізнення та постійні часу (рис. 4.22).

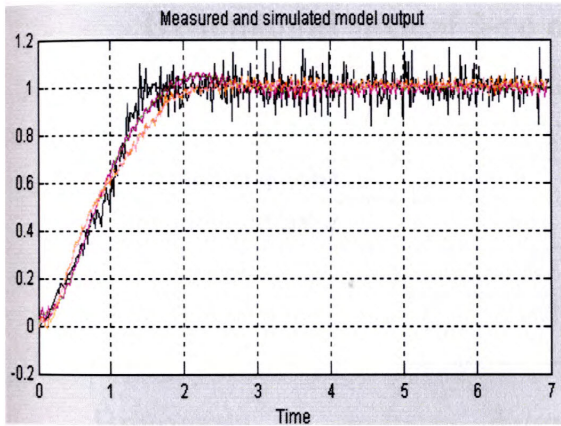


Рис. 4.21 Результат симуляції

знайденими моделями для розгінних характеристик за 09.04.10

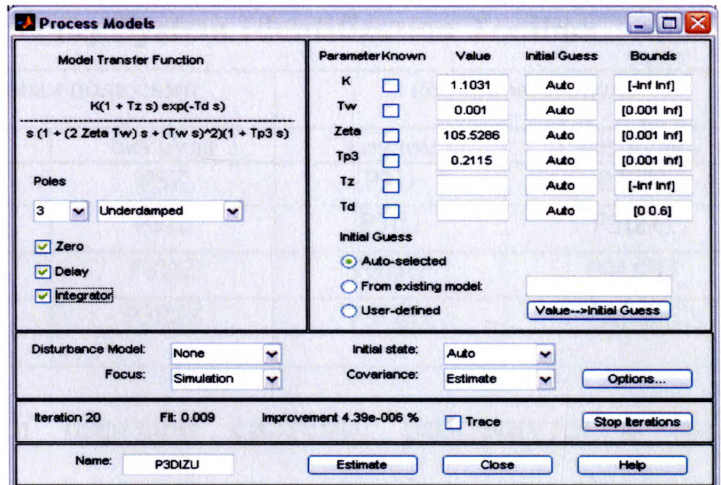


Рис. 4.22 Вікно ідентифікації неперервних моделей

Таблиця 4.1

Результат вибору оптимальної моделі

Дата експерименту	Модель, що забезпечує оптимальний результат	Степінь подібності, %
09.04.10	OE, $nb=3$, $nf=3$, $nk=2$	76.17
23.04.10	OE, $nb=3$, $nf=3$, $nk=1$	62.83
30.04.10	OE, $nb=3$, $nf=3$, $nk=1$	60.04
11.05.10	OE, $nb=3$, $nf=1$, $nk=2$	68.92
18.05.10	OE, $nb=3$, $nf=2$, $nk=1$	69.25

Доступні для оцінювання моделі 3-го порядку включають:

- модель з усіма дійсними полюсами:

$$K(s) = \frac{K}{(1 + T_{p1} \cdot s)(1 + T_{p2} \cdot s)(1 + T_{p3} \cdot s)} ; \quad (4.11)$$

- модель з коливною ланкою (underdamped):

$$K(s) = \frac{K}{(1 + 2 \cdot Zeta \cdot T_w \cdot s + (T_w \cdot s)^2)(1 + T_{p3} \cdot s)} ; \quad (4.12)$$

а також комбінації обох вказаних моделей з інтегратором (Integrator, додається множник s у знаменнику), запізненням (Delay, додається множник $e^{-T_d \cdot s}$ у чисельнику) та одним нулем (Zero, додається множник $(1 + T_z \cdot s)$ у чисельнику).

Умовні позначення всіх можливих моделей наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Неперервні моделі 3-го порядку System Identification Toolbox

	з дійсними полюсами		з коливною ланкою	
	з нулем	без нуля	з нулем	без нуля
основна форма	P3	P3Z	P3U	P3ZU
з інтегратором	P3I	P3IZ	P3IU	P3IZU
з затримкою	P3D	P3DZ	P3DU	P3DZU
з інтегратором і затримкою	P3DI	P3DIZ	P3DIU	P3DIZU

Виходячи із аналізу функції передачі системи, розглянутої в [96], недоцільним є розгляд моделей з інтегратором (оскільки вимірюваним параметром є швидкість, а не переміщення), а також з усіма дійсними полюсами, оскільки ПЧ описується коливною ланкою.

При спробі застосування моделі з усіма дійсними полюсами на основі аналізу даних системою Matlab видається попередження про наявність коливної ланки:

There is an indication that the poles may be underdamped.

Consider the possibility to use an underdamped model.

(Include 'U' in the model definition.)

Втім, як видно із вигляду ПХ, коливання у встановленому режимі є досить незначними, тому застосування моделі з усіма дійсними полюсами дозволяє досягти не менших, а іноді і більших значень степені подібності результату

симуляції виходу моделі порівняно з експериментальними даними. Так, на рис. 4.23 наведено результати симуляції виходу моделі для набору даних за результатами експерименту від 09.04.10 для всіх можливих 16 неперервних моделей. Найвищий показник співпадіння забезпечує модель з усіма дійсними полюсами з нулем та затримкою (77.47%), однак розкид між степенями співпадіння для різних моделей складає всього 5%.

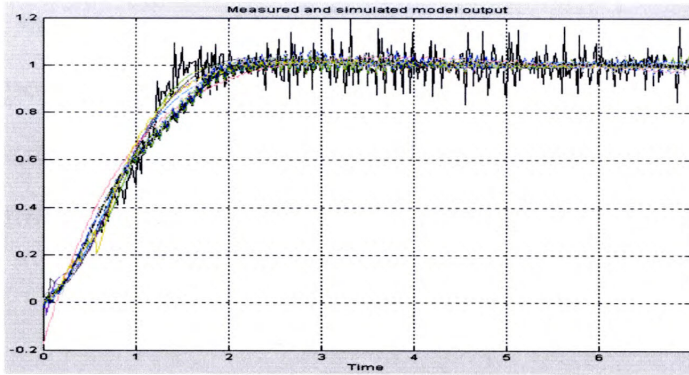


Рис. 4.23 Результати симуляції виходу моделі для неперервних моделей

При виконанні параметричної ідентифікації на основі даних сигналів без будь-якої попередньої їх обробки отримані значення ступеня подібності знаходяться в межах 60...77%. Це пояснюється значною зашумленістю сигналів, зокрема, в зв'язку із особливостями використаної системи вимірювання. Повний діапазон зміни сигналу швидкості привідного АД складає всього 20-25 одиниць, що призводить до наявності шуму квантування з середньоквадратичним відхиленням порядку 1.2...1.4% від діапазону зміни сигналу, а для невеликих значень швидкості, характерних для початкової ділянки ПХ, відносна похибка квантування суттєво зростає.

В зв'язку з цим було прийнято рішення про згладжування експериментальних даних. Середовище Matlab забезпечує різні способи згладжування [103], наприклад:

- методом ковзного середнього;
- методом локальної поліноміальної регресії (першого та другого порядку);
- фільтрація Савіцького-Голя(Savitzky-Golay filtering, поліноміальний згладжуючий фільтр);

- медіанна фільтрація;
- фільтрація з використанням згладжуючих сплайнів.

Для методів локальної регресії існують також так звані «робастні» версії, які дозволяють усунути вплив випадкових локальних викидів високої амплітуди.

Метод локальної регресії [99] (англ. locally weighted scatterplot smoothing, скорочено LOWESS або LOESS) передбачає, що кожен відлік згладженого сигналу шукається як значення функції регресії, що оцінюється в околі даного відліку. Крива регресії являє собою умовне математичне очікування вихідної величини як функцію однієї або декількох вхідних величин. Параметри цієї функції зазвичай оцінюють методом найменших квадратів, мінімізуючи величину

$$\sum_{i=0}^{N-1} (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \rightarrow \min ; \quad (4.13)$$

де Y_i - виміряні значення вихідної величини, \hat{Y}_i - оцінка значень за допомогою функції регресії. Найчастіше застосовують лінійну або квадратичну функцію регресії, значно рідше застосовують поліноміальні функції вищих порядків. По точках, які оточують поточний відлік, будується апроксимована функція (пряма або парабола), і в якості згладженого значення береться значення цієї функції у поточній точці.

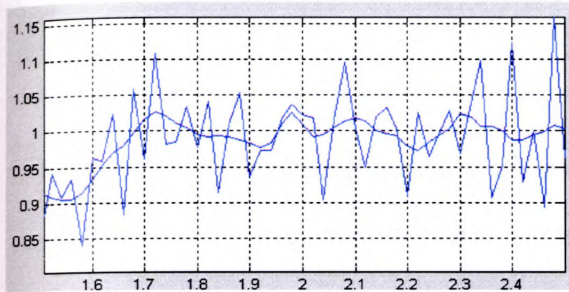
Щоб досягти кращої якості згладжування, використовують зважування. Традиційною ваговою функцією є наступна:

$$w_i = \left(1 - \left| \frac{x - x_i}{d(x)} \right|^3 \right)^3 ; \quad (4.14)$$

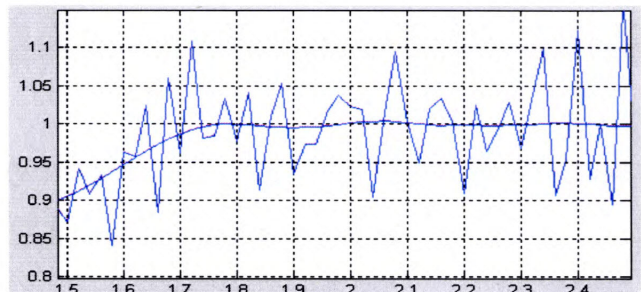
де x - точка, в якій оцінюється функція регресії, x_i - точка, для якої обчислюється вагова функція, $d(x)$ - половина ширини інтервалу, на якому оцінюється регресія.

Параметром методів згладжування, що визначає якість і характеристики згладженого сигналу, є так звана ширина вікна, тобто кількість відліків сигналу в околі деякого відліку, які використовуються для обчислення його згладженого значення. В загальному випадку, чим більша довжина вікна, тим більше високочастотних складових і особливостей сигналу усувається в результаті згладжування.

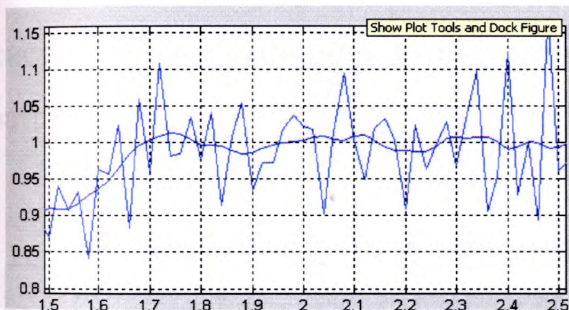
Для прикладу на рис.4.24 наведено фрагмент сигналу швидкості привідного АД в момент досягнення ПП усталеного значення, згладжений методом локальної регресії першого та другого порядку. Для рис.4.24,а та рис. 4.24,в використано вікно довжиною 10 відліків, для рис.4.24,б та рис. 4.24,г – довжиною 20 відліків. Квадратична регресія, як видно з рис.4.24, забезпечує краще відтворення інформативної складової сигналу та усунення шуму. Оптимальна ширина вікна, визначена на основі аналізу вигляду згладжених сигналів для різної ширини вікна, складає 20-30 відліків.



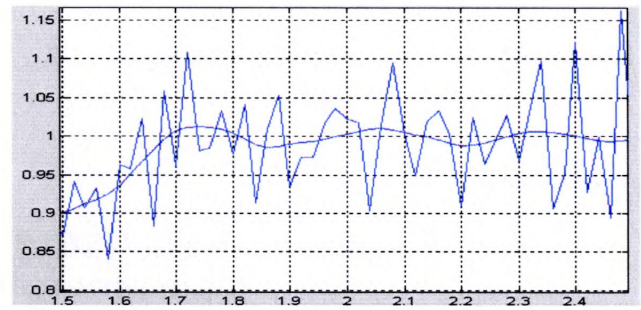
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.24 Приклад згладжування фрагменту сигналу методом локальної поліноміальної регресії 1-го (а,б) та 2-го (в,г) порядку для ширини вікна 10 (а,в) та 20 (б,г) відліків

На рис. 4.25 приведено порівняльні результати симуляції виходу моделі для незгладжених даних та з використанням згладжування методом локальної регресії другого порядку. Степінь співпадіння підвищується в результаті від 60...77% до 90...97%, що вказує на підвищення достовірності визначення параметрів моделі при використанні згладжування.

Для виявлення залежності між параметрами функції передачі та ступінню зносу ПВ та БД було проведено ідентифікацію параметрів неперервних моделей для 5 експериментів. Для досліджень було обрано моделі P3DU, P3DZU та P3ZU.

Виконувалось попереднє згладжування даних методом локальної регресії другого порядку з шириною вікна, рівною 30. Результати розрахунків представлено в табл. 4.3-4.5

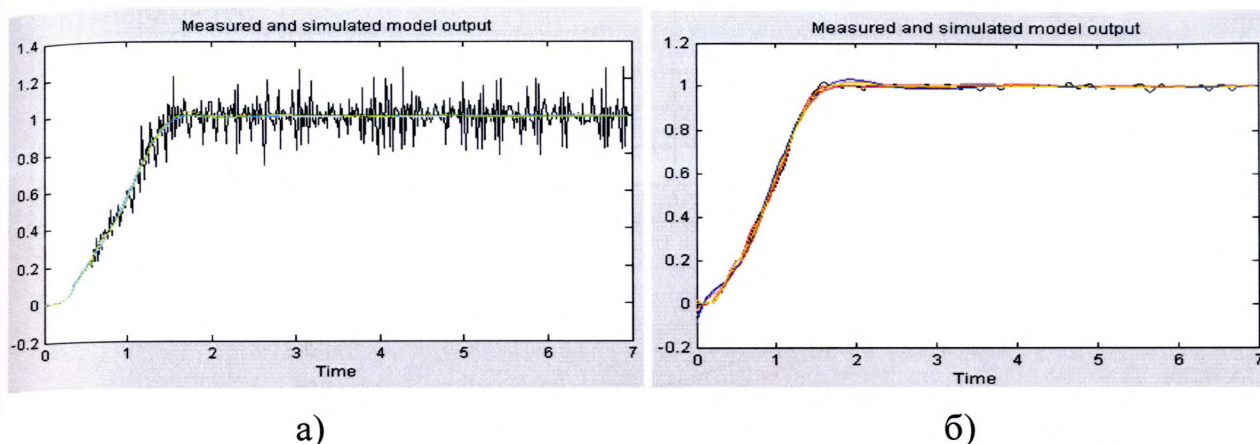


Рис. 4.25 Результати симуляції виходу моделі для даних за 18.05.10: а – для незгладжених даних; б – для згладжених даних

Як видно із результатів розрахунків, один із параметрів ($Tp3$) (рис.4.26) систематично змінюється від менших до більших значень для моделей із затримкою.

Таблиця 4.3

Значення параметрів моделі P3DZU для всіх наборів даних

Дата проведення експерименту	Параметри моделі					
	Kp	Tw	Zeta	$Tp3$	Td	Tz
09.04.10	1.0006	0.3026	0.0109	0.0592	0	-0.2277
23.04.10	1.0544	0.4680	0.0010	0.1023	0.4145	0.1774
30.04.10	1.0923	0.6413	0.0117	0.2366	0.1314	-0.5176
11.05.10	1.0210	0.1399	0.6143	0.5529	0	0.6423
18.05.10	1.0336	0.3318	0.5088	5.4478	0	5.3706

Таблиця 4.4

Значення параметрів моделі P3DU для всіх наборів даних

Дата проведення експерименту	Параметри моделі				
	Kp	Tw	Zeta	$Tp3$	Td
09.04.10	1.0008	0.2997	0.0658	0.0010	0.2180
23.04.10	1.0551	0.3909	0.0010	0.1319	0.0801
30.04.10	1.0929	0.6807	0.2427	0.1356	0.6000
11.05.10	1.0214	0.2018	0.1726	0.2642	0
18.05.10	1.0349	0.4768	0.1857	0.2775	0.2203

Значення параметрів моделі P3ZU для всіх наборів даних

Дата проведення експерименту	Параметри моделі				
	Kp	Tw	Zeta	Tr3	Tz
09.04.10	1.0004	0.3021	0.0361	0.0652	-0.1899
23.04.10	1.0552	0.3877	0.0010	0.1691	-0.0412
30.04.10	1.0901	0.3320	0.0614	0.3893	0.1257
11.05.10	1.0216	0.1426	0.4653	0.5900	0.6654
18.05.10	1.0333	0.3117	0.0010	0.1580	-0.2547

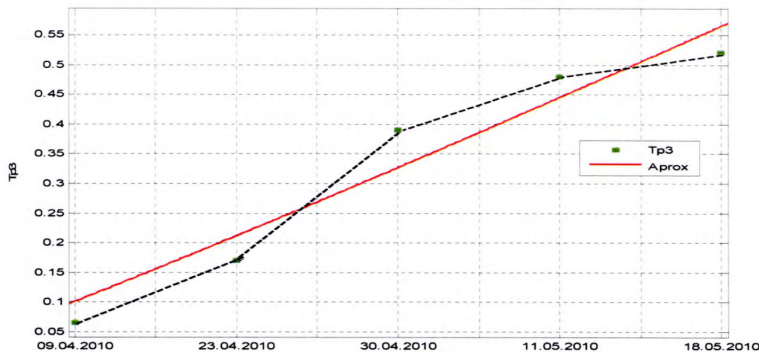


Рис. 4.26 Графіки зміни діагностичної ознаки $Tr3$ в часі t

З розглянутих 16 моделей найбільш прийнятною з точки зору поставленої задачі є модель P3DZU, оскільки один із її параметрів ($Tr3$) збільшується із збільшенням величини зношування робочих органів млина.

На рис. 4.26 наведено графіки зміни ДО $Tr3$, побудовані за експериментальними даними та за результатами їх апроксимації залежністю

$$\theta = 0,0997T_p z^{1,077}$$

де θ - параметр, що характеризує зміну технічного стану робочих органів ВВМ.

Для визначення граничного значення зміни ДО, після якого процес експлуатації ВВМ є недопустимим, необхідно зібрати значний статистичний матеріал, що вимагає тривалого часу.

4.5. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ за методом Симою

В процесі обробки ПХ було встановлено, що динамічні параметри ВВМ в значній мірі залежать від такого параметра, як величина зусилля притискання ПВ до БД, що не вимірювався. Це призвело до значних неконтрольованих коливань

параметрів ідентифікації. Однак відносно велике число отриманих ПХ (Додаток В) дозволило відібрати серед них такі, що характеризувалися майже постійним значенням вказаного параметра.

На рис. 4.27 наведені середні кутові швидкості усталеного режиму для 29 перехідних характеристик, які можна розбити на дві зони: нижню (192..194 імп.) та верхню (194..196 імп.). Оскільки у верхню зону не входить жодна з перехідних характеристик отриманих після заміни робочих органів обумовлених їх зносом, у подальших дослідженнях використовуються лише перехідні характеристики нижньої зони.

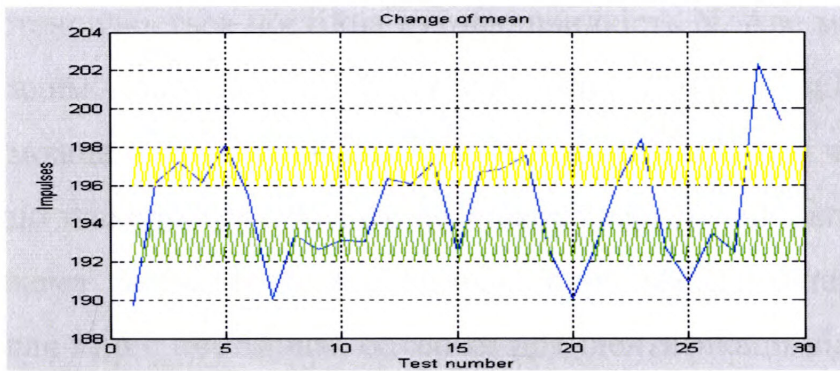


Рис. 4.27 Зміна середніх значень кутових швидкостей для усталеного режиму ПХ

MatLab програма побудови рисунку 4.27 та визначення номерів тестів 1-ої групи розташована у Додатку В.

Вибір моделі, що представляє досліджуваний процес, є однією з основних задач ідентифікації. Загальна рекомендація при такому виборі полягає в тому, щоб «починати з простого». До більш складних структур слід переходити тільки тоді, коли більш прості моделі не пройшли тестів на відповідність.

Найбільш простим класом моделей динамічних систем вважається клас лінійних стаціонарних систем. Стаціонарні лінійні системи, безперечно, представляють собою найбільш важливий тип динамічних систем завдяки порівняно простому і ясному математичному апарату, що застосовується для їх опису. Необхідно розуміти, що такі системи відповідають ідеалізованому представленню реальних систем, які у більшості випадків є нестаціонарними та нелінійними. Не дивлячись на це, таке наближення виправдане, а проектні рішення, що базуються на лінійній теорії, у багатьох випадках є успішними.

На рис. 4.18,а подані впливи, що діють на ВВМ, вихідною величиною якого є кутова швидкість N редуктора млина РМ. Редуктор знаходиться під дією двох енергетичних впливів – енергії електричної мережі We , яка забезпечує крутний момент $M_{кр}$, та реакції розмеленого вугілля $Wу$, що змінює момент опору ротору млина $M_{оп}$. Останній також залежить від зусилля притискання ПВ до БД $F_{пр}$. БД ПЧ та ПВ позначені як ПМ+В. Млин має пусковий пристрій ППр, який запускається при вмиканні електроенергії We і починає діяти за програмою пуску ПрП, з метою обмеження пускового струму потужного електродвигуна. У встановленому режимі крутний момент $M_{кр}$ зрівноважений моментом опору $M_{оп}$, у результаті чого встановлюється постійна кутова швидкість N . Але момент опору не залишається сталим – він є функцією повільно змінної величини $F_{пр}$ та опору вугілля $Wу$, який можна представити випадковим процесом. Таким чином, маємо складний об'єкт, що знаходиться під дією декількох енергетичних впливів.

Наведена схема може бути радикально спрощена. По-перше, можна вважати, що зусилля $F_{пр}$ є постійним, оскільки для ідентифікації відібрані лише ПХ нижньої зони (рис. 4.27). У цьому випадку його можна віднести до постійних параметрів РМ. При цьому слід вважати $M_{оп}$ випадковим процесом з нулевим середнім. По-друге, можна знехтувати наявністю ППр та ПрП і вважати, що реакція N отримана в результаті ступінчатої зміни не We , а моменту $M_{кр}$. Останнє припущення значно змінює реальне становище. Але залишається надія, що часові зміни динамічних параметрів підчас зносу робочих органів ВВМ є значними і будуть впливати на форму ПП і в цьому випадку Нова схема наведена на рис. 4.18,б.

Оскільки модель передбачається лінійною, подальше спрощення задачі можливе завдяки застосування принципу суперпозиції. Завдання розкладається на дві окремі задачі ідентифікації:

1- полягає у визначенні параметрів РМ при ступінчатій дії лише $M_{кр}$; при цьому вихідним сигналом вважають початкову ділянку ПХ $N1$, де сигнал наростає, це детермінована задача ідентифікації;

2 - полягає у визначенні параметрів РМ при дії випадкового сигналу $M_{оп}$. При цьому вихідним сигналом вважають ділянку встановленого режиму $N2$, де

сигнал змінюється лише за рахунок статистичного збудження - це задача спектрального аналізу, що уже відмічалось в розд.4.1

Накладання сигналів N_1 та N_2 дає, очевидно, сигнал N . Накладання визначених параметрів моделей PM_1 та PM_2 повинно давати повну модель PM . Але в останньому накладанні немає сенсу: параметри моделей PM_1 та PM_2 доцільно використовувати як окремі діагностичні ознаки. У викладеній схемі принцип суперпозиції не реалізується ідеально. Дійсно, при розв'язку задачі 1 вихід не є вільним від дії випадкової складової $M_{оп}$, а при розв'язку задачі 2 – від дії ступінчатого імпульсу $M_{кр}$. Але майже ідеальний випадок може бути досягнутий за допомогою фільтрації. У задачі 1 це можливо зробити за допомогою інтегрування – наприклад, застосування ідентифікаційного методу площ Симою, який пов'язаний з багаторазовим інтегруванням сигналу N_1 . У задачі 2 це просто виконується за рахунок видалення з сигналу N_2 його середнього значення.

Таким чином, у подальшому необхідно розв'язати дві окремі задачі. Перша з них є детермінованою і для її розв'язку рекомендується метод площ Симою [53]. Друга відноситься до задач спектрального аналізу [100]. Вона може бути розв'язана як непараметричними, так і параметричними методами. Непараметричні методи дозволяють отримати спектр вібрацій кутової швидкості валу, який несе інформацію про розбалансування ротора та механічні пошкодження робочих органів. Застосування параметричних методів дозволяє знайти параметри системи за допомогою простішого алгоритму авторегресії.

Нижче вказана перша задача сформульована математично та приводиться її числовий розв'язок за допомогою програмного середовища MatLab 6.5.

Метод М.П. Симою [53] – один з найстаріших методів ідентифікації, який не втратив практичного значення і зараз, завдяки високій завадостійкості. Математичні основи методу приводяться нижче відповідно до [100].

Нехай функція передачі моделі описується виразом

$$W(s) = K \frac{1 + b_1 s + \dots + b_m s^m}{1 + a_1 s + \dots + a_n s^n},$$

де $a_i, b_j, i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$, – коефіцієнти, K – коефіцієнт підсилення, причому $m < n$ для моделі, що має фізичну реалізацію.

Метод дозволяє знайти коефіцієнти a_i , b_i для системи з приведеною передатною функцією $\bar{W}(s)$, що має одиничний коефіцієнт підсилення $K=1$. Останнє не обмежує області застосування методу, оскільки коефіцієнт K завжди може бути обчислений в усталеному (статичному) режимі.

Розкладемо у ряд Маклорена функцію, обернену до передатної функції $\bar{W}(s)$:

$$\bar{W}^{-1}(s) = \frac{1 + a_1 s + \dots + a_n s^n}{1 + b_1 s + \dots + b_m s^m} = 1 + S_1 s + \dots + S_k s^k + \dots = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k s^k. \quad (4.15)$$

Коефіцієнти S_k , $k=1, 2, \dots$ названі М.П. Симою «площами», оскільки вони визначались графоаналітично за ПХ системи. Позбавляючись від знаменника в (4.15), розкриваючи дужки та прирівнюючи члени з однаковими степенями комплексної змінної s , отримуємо наступні формули зв'язку коефіцієнтів функції передачі з площами Симою:

$$a_k = b_k + S_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i S_{k-i}, \quad k=1, 2, \dots, N. \quad (4.16)$$

Як слідує з (4.16), дуже просто коефіцієнти визначаються для моделі типу авторегресії (AR-моделі), коли коефіцієнти b_j рівні нулю. У цьому випадку відповідно до (4.16) $a_i = S_i$.

Для визначення всіх коефіцієнтів (1) достатньо $N=m+n$ рівнянь і стільки ж площ. Тому у (4.16) і далі k обмежено числом N . Зазвичай $N \leq 5$, завдяки швидкому накопиченню похибки, обумовленою обмеженням ряду (4.15). Це обмежує порядок моделі, який на практиці не перевищує третього ($n \leq 3$).

Нині доступність обчислювальної техніки дозволила замінити графоаналітичні методи числовими. Знайдемо, як можна визначити площі з ПХ, яку називають ще перехідною функцією системи $h(t)$, тобто її реакції на одиничне ступінчате збудження при нульових початкових умовах. Саме таку функцію ми вважаємо заданою, якщо відома пускова характеристика ВВМ. Для застосування методу потрібна дещо інша функція

$$\varphi(t) = 1 - \bar{h}(t), \quad (4.17)$$

де $\bar{h}(t) = h(t)/h_0$, h_0 – встановлене значення перехідної функції $h(t)$.

Запишемо та представимо рядом Макларена перетворення функції $\varphi(t)$ за Лапласом:

$$\Phi(s) = \frac{1 - \bar{W}(s)}{s} = \sum_{k=0}^{N-1} \mu_k s^k, \quad (4.18)$$

де коефіцієнти μ_k , що називають моментами, визначаються виразом

$$\mu_k = \frac{1}{k!} \Phi^{(k)}(0), \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (4.19)$$

Тут $\Phi^{(k)}(s)$ є похідною від $\Phi(s)$ порядку k .

Пряме перетворення $\varphi(t)$ за Лапласом складає:

$$\Phi(s) = \int_0^{\infty} \varphi(t) e^{-st} dt. \quad (4.20)$$

Диференціюючи (6) k разів та підставляючи результат у (5), отримаємо

$$\mu_k = \frac{1}{k!} \int_0^{\infty} (-t)^k \varphi(t) dt, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (4.21)$$

Формула (4.21) дозволяє визначити невідомі коефіцієнти розкладу (4.18) через функцію (4.17) шляхом інтегрування у часі.

Тепер можна визначити і площі. З (4.18) маємо $s\Phi(s) = 1 - \bar{W}(s)$, звідки $[1 - s\Phi(s)]\bar{W}^{-1}(s) = 1$. Підставляючи сюди вираз $\Phi(s)$ через коефіцієнти μ_k з (4.18), а також вираз $\bar{W}^{-1}(s)$ через коефіцієнти S_k з (4.15), відкриваючи дужки і прирівнюючи всі коефіцієнти при s в правій частині нулю, отримаємо

$$.S_k = \mu_{k-1} + \sum_{i=0}^{k-2} \mu_i S_{k-i-1}, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (4.22)$$

Формула (4.22) дозволяє обчислити площі через відповідні моменти, визначені раніше.

Таким чином, обчислювальний процес алгоритму ідентифікації складається з чотирьох етапів:

- формування вихідної функції часу $\varphi(t)$ відповідно до (4.17);
- обчислення моментів за формулами (4.21);
- обчислення площ за формулами (4.22);
- обчислення коефіцієнтів передатної функції за формулами (4.16).

Застосування наведеного алгоритму обумовлюється вибором порядку моделі. Як вже згадувалось, повинно бути $N \leq 5$. Подальше уточнення порядку можливо з урахуванням числа обумовленості матриць, що описують лінійну

систему рівнянь (4.16) [53]. Але в нашому випадку, завдяки великому рівню завад, матриці погано обумовлені. Тому більш простим і ефективним є використання критерію стійкості моделі. Так за критерієм Стодоли всі площі S_k повинні бути додатними. Число N вибирають настільки великим, щоби всі площі моделі ще були додатними, а при $N+1$ з'являлася хоча би одна від'ємна площа. В цьому випадку модель можливо виготовити фізично.

Наведений алгоритм був реалізований в програмному середовищі MatLab 6.5 (Додаток В). Особливостями програми є:

- використання глобальної змінної для збереження площ;
- використання у SWITCH не всіх дат, а лише дат проведення тестів 1-ої групи;
- встановлення однакової довжини всіх файлів даних;
- попереднє застосування фільтрів ковзаючого середнього;
- застосування AR-моделі першого порядку;
- перевірка моделі на стійкість за критерієм Стодоли;
- друк результатів з використанням їх оптимальної апроксимації за допомогою поліному 3-го порядку.

Отриманий графік залежності полюса моделі від терміну експлуатації ВВМ приведено на рис. 4.28.

З графіку (рис.4.28) видно, що не дивлячись на значний розкид результатів коефіцієнт перекривання діапазону (відношення найбільшого та найменшого значень), який обчислений за кривою апроксимації, складає приблизно 1,6. Це може бути достатнім для формування на такій основі ДО стану ПВ та БД ВВМ.

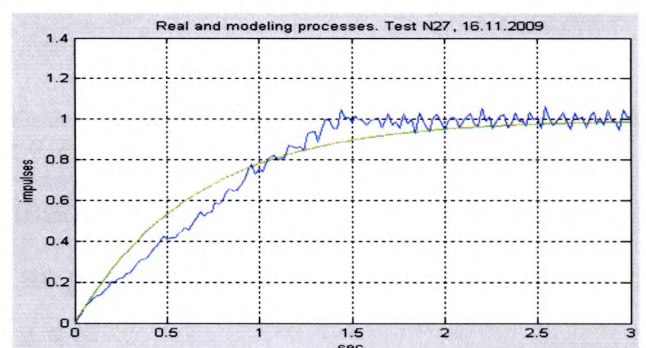
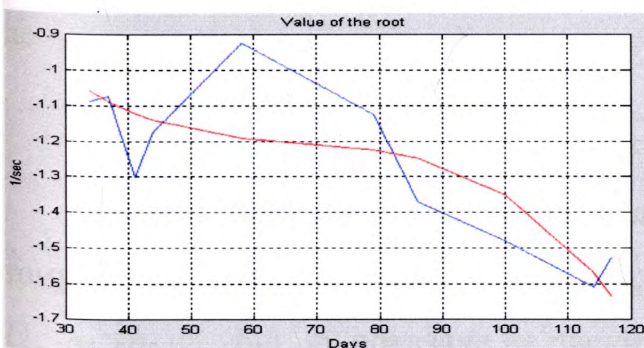


Рис. 4.28 Графік залежність полюса AR-моделі від терміну експлуатації ВВМ

Рис. 4.29 Графіки реальної та змодельованої перехідних характеристик ВВМ

На рис. 4.29 наведено порівняння реальної ПХ ВВМ (від 16.11.2009) з отриманою ПХ в результаті моделювання. З рис.4.29 видно, що моделювання пуску ВВМ ланкою першого порядку є відносно задовільним.

4.6. Визначення діагностичної ознаки технічного стану робочих органів ВВМ з використанням моделі авторегресії

Застосування параметричних методів опирається на деяку модель аналізованого випадкового процесу. При цьому розв'язується задача оптимізації, тобто шукають такі параметри моделі, при яких вона забезпечує вихідний сигнал, найбільш близький до реального. Таку модель можна застосувати і для спектрального аналізу. У такому випадку говорять про параметричний спектральний аналіз. Але ми обмежимося лише обчисленням параметрів моделі, які самі доцільно використовувати для діагностування.

Авторегресія є простішою ідентифікаційною моделлю, яка отримала найбільше поширення. Це обумовлено простотою такої моделі, зручністю проведення розрахунків і тим, що вона добре відповідає багатьом реальним задачам. Подальший математичний опис цієї моделі базується на [101].

Згідно з моделлю авторегресії, сигнал $\{x(k)\}$ формується шляхом пропускання дискретного білого шуму $\{n(k)\}$ через чисто рекурсивний фільтр порядку N , як це показано на рис. 4.30. Тут блоки z^{-1} здійснюють затримку дискретного сигналу на одну позицію, що рівносильне диференціюванню в аналоговій області. При цьому

$$A(z)x(k) = n(k), \quad (4.23)$$

де

$$A(z) = \frac{1}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \dots - a_N z^{-N}}. \quad (4.24)$$

Модель побудована за методом лінійного передбачення. Метод полягає у тому, що сигнал $\{x(k)\}$ пропускають через не рекурсивний фільтр з коефіцієнтами $\{1, -b_1, -b_2, \dots, -b_N\}$, як показане на рисунку 4.31.

Зважену суму попередніх відліків вхідного сигналу називають лінійним передбаченням наступного відліку, а вихідний сигнал – помилкою лінійного

передбачення $\{y(k)\}$. Враховуючи, що сигнал $\{x(k)\}$ визначається виразами (4.23) та (4.24), Z-перетворення помилки лінійного передбачення можна записати таким чином:

$$Y(z) = N(z) \frac{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - \dots - b_N z^{-N}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - \dots - a_N z^{-N}} . \quad (4.25)$$

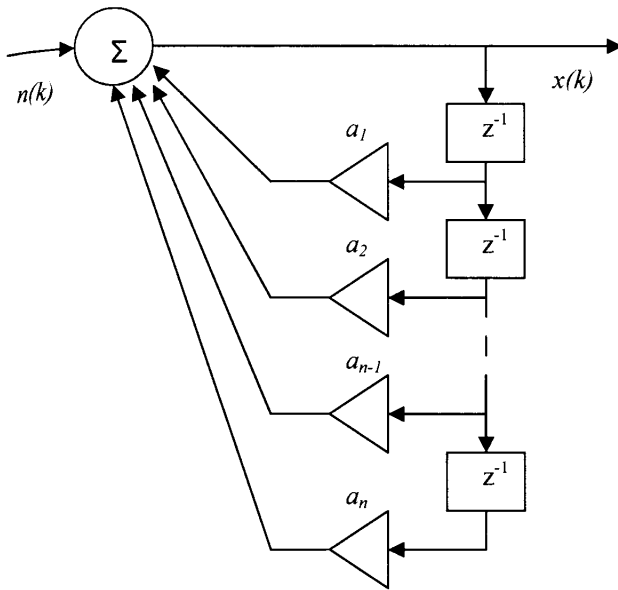


Рис. 4.30 Авторегресійна модель формування сигналу

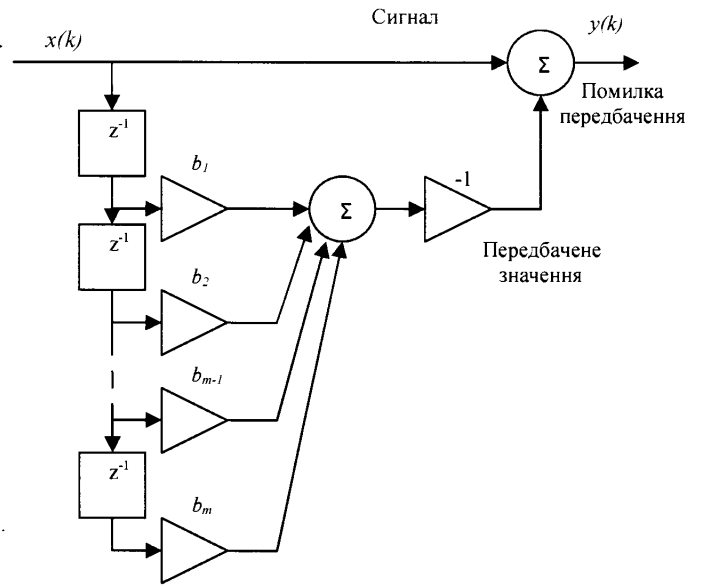


Рис. 4.31 Лінійне передбачення сигналу

Відношення двох поліномів (4.25) можна у загальному випадку записати як

$$Y(z) = N(z)(1 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots) . \quad (4.26)$$

Сам вихідний сигнал відповідно до (4.26) буде представляти собою результат перетворення білого шуму $\{n(k)\}$ еквівалентним фільтром з коефіцієнтами $\{1, h_1, h_2, \dots\}$:

$$y(k) = n(k) + h_1 n(k-1) + h_2 n(k-2) + \dots .$$

Оскільки відліки білого шуму є незалежними, дисперсія сигналу $\{y(k)\}$ розраховується таким чином:

$$\sigma_y^2 = \sigma_n^2 (1 + h_1^2 + h_2^2 + \dots) .$$

Звідси випливає, що $\sigma_y^2 \geq \sigma_n^2$ і рівність досягається тільки коли $h_i=0$ для всіх i . Це можливо, якщо набори коефіцієнтів $\{a_i\}$ та $\{b_i\}$ співпадають.

Таким чином, коефіцієнти фільтра, що мінімізують дисперсію помилки передбачення співпадають з коефіцієнтами авторегресійної моделі формування сигналу.

Процедура розрахунку коефіцієнтів $\{b_i\}$ за відліками сигналу $\{x(k)\}$ зводиться до мінімізації помилки

$$y(k) = x(k) - b_1x(k-1) - b_2x(k-2) - \dots - b_Nx(k-N) = x(k) - \sum_{m=1}^N b_m x(k-m). \quad (4.27)$$

Піднесення (4.27) до квадрату і осереднення за ансамблем, дозволяє отримати вираз (4.27) через кореляційні функції. Після того прирівнюємо до нуля похідну від помилки передбачення і кінцево отримуємо:

$$R_x \mathbf{b} = \mathbf{p}. \quad (4.28)$$

Тут R_x – кореляційна матриця сигналу $\{x(k)\}$, \mathbf{b} – стовпчик коефіцієнтів, \mathbf{p} – стовпчик значень кореляційної функції $R_x(k)$ для k від 1 до N .

Відповідно до (4.28) шуканий розв'язок:

$$\mathbf{b} = R_x^{-1} \mathbf{p}. \quad (4.29)$$

Підстановка знайденого вектора \mathbf{b} у вираз для помилки дає мінімальне значення помилки передбачення

$$(\sigma_y^2)_{\min} = \sigma_x^2 - \mathbf{p}^T R_x^{-1} \mathbf{p}. \quad (4.30)$$

Тут $\sigma_x^2 = R_x(0)$ – дисперсія сигналу $\{x(k)\}$.

Вирази (4.29) і (4.30) дозволяють обчислити коефіцієнти фільтра лінійного передбачення та оцінити похибку методу.

У MatLab реалізовано багато методів авто регресійного аналізу, таких як, наприклад, методи коваріації, модифікований метод коваріації, автокореляційний метод Юла-Уоркера інші. Вони відрізняються, в основному, засобами оцінки матриці кореляції. У нашому випадку доцільно застосувати метод Берга (Burg), який відрізняється високою роздільною здатністю при аналізі коротких сигналів і гарантованою стабільністю розрахованого формуючого фільтру. Майже всі ці методи доступні з функції AR, причому метод та інші властивості задаються вибором її аргументів.

Програма, що реалізує ідентифікацію параметрів млина методом авторегресії, приведена у Додатку В.

Графік, що видається програмою, поданий на рисунку 4.32.3 графіка видно, що за майже 90 днів експлуатації значення полюса зменшується у 2,8 раз. Зменшення полюсу відповідає фізичним представленням про процес помелу – руйнування бігової доріжки і валків збільшує кількість часток вугілля, які не приймають участі у помелі. Тому реакція робочих органів млина на помольне вугілля стає більш швидкою. Про це і свідчить значне збільшення відстані полюса від осі уявних.

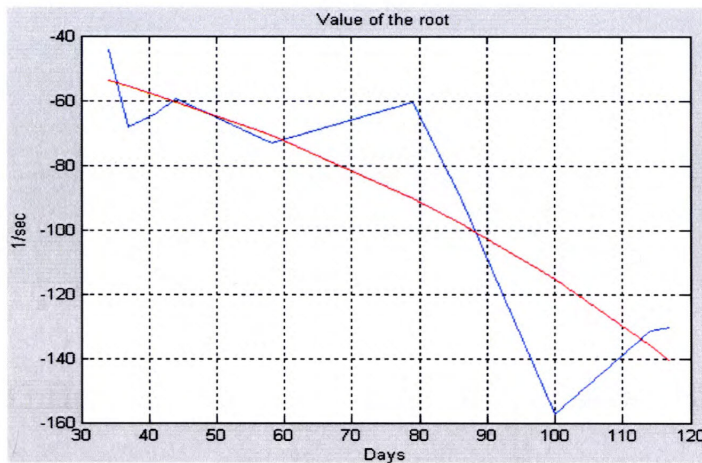


Рис. 4.32 Залежність полюса від часу безремонтної експлуатації

Відмітимо, що полюси, знайдені за методом Симою значно менші, ніж полюси AR моделі. Це також знаходить пояснення – більша інерційність валу млина під час його пуску обумовлена значною інерційністю пускового пристрою, який і призначений для уповільнення пускового режиму.

4.7. Контроль технічного стану робочих органів ВВМ методом непараметричної ідентифікації

Для ідентифікації обрана ділянка встановленого режиму (рис. 4.33), яка може бути представлена випадковим процесом. У цьому випадку ідентифікацію можна здійснити за допомогою апарату аналізу часових рядів, наприклад шляхом застосування спектрального аналізу [102,103].

У спектральному аналізі розрізняють дві групи методів [101]: непараметричні і параметричні. У непараметричних методах для розрахунку спектру використовується лише інформація, зосереджена у відліках сигналу, без будь-яких додаткових припущень. Більш сучасні параметричні методи засновані

на застосуванні деякої математичної моделі випадкового процесу. Спочатку вирішується задача оптимізації, тобто знаходження таких значень параметрів моделі, які забезпечують найкраще наближення виходу моделі до реального сигналу. На другому етапі виконується спектральне перетворення сигналу моделі.

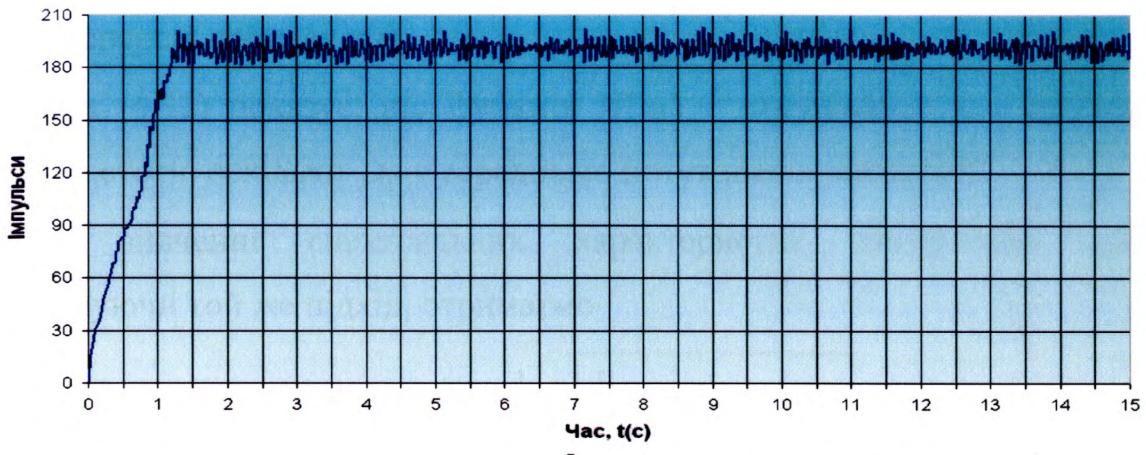


Рис. 4.33 Перехідна (розгінна) характеристика ВВМ

Перевагами параметричних методів є більш точні оцінки спектрів потужності, а також більш високий ступень розрізнення спектрів. Параметричні методи застосовні при наявності білого шуму. При цьому бажаний нормальний закон розподілу шуму. До того ж, сигнал має бути стаціонарним. Ці умови рідко виконуються одночасно. Тому використання параметричних методів зазвичай вимагає попередньої фільтрації сигналу. Непараметричні методи не мають переваг параметричних, але значно простіші у реалізації. Тому була зроблена спроба застосувати і ці методи, яка виявила цікаві особливості спектру [102]. Низький рівень відношення сигнал/шум при цьому не мав значення, оскільки «завади» можуть розглядатися як корисний сигнал, що несе інформацію про стан об'єкту. Нехай одна з реалізацій центрованого випадкового аналогового сигналу $x(t)$ має тривалість, обмежену кінцевим інтервалом часу $[-T/2; T/2]$. Спектральна щільність середньої потужності цієї реалізації $W(\omega)$ складає

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|\dot{X}_T(\omega)|^2}{T}, \quad (4.31)$$

де $\dot{X}_T(\omega)$ - спектральна щільність реалізації, що знайдена шляхом прямого перетворення Фур'є.

У загальному випадку спектральну щільність (4.31) необхідно осереднити за множиною реалізацій. Але для ергодичних процесів можна здійснити це осереднення за часом використовуючи лише одну реалізацію. Можна показати, що при цьому

$$D_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) d\omega, \quad (4.32)$$

де D_x – дисперсія процесу $x(t)$.

Вираз (4.32) показує, що функція $W(\omega)$ є потужністю, що припадає на одиницю частоти, оскільки D_x є середньою потужністю реалізації.

При вивченні спектральних характеристик дискретних сигналів, використовуючи той же підхід, отримаємо

$$W(\omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2n+1} \overline{\left| \sum_{k=-n}^n x(k) \exp(-j\omega kT) \right|^2}, \quad (4.33)$$

Риска зверху у виразі (4.33) означає осереднення за ансамблем реалізацій. Для ергодичних процесів маємо

$$W(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R_x(k) \exp(-j\omega kT), \quad (4.34)$$

де $R_x(k)$ – кореляційна функція реалізації.

Співвідношення (4.34) відомо як дискретний аналог теореми Вінера – Хінчина.

Параметричні методи зазвичай використовують обчислення кореляційної функції. Непараметричні – засновані на осередненні формули (4.33). Зокрема періодограма є оцінкою спектральної щільності, отриманої за N відліками реалізації випадкового процесу згідно з (4.33) шляхом осереднення кінцевого числа доданків:

$$\hat{W}(\omega) = \frac{1}{Nf_d} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-j\omega kT) \right|^2. \quad (4.35)$$

Періодограма (4.35) не є змістовною оцінкою спектральної щільності. Тому доцільно здійснити подальше осереднення шляхом введення, наприклад, вагової функції (вікна) з коефіцієнтами $w(k)$. При цьому отримаємо:

$$\hat{W}(\omega) = \frac{1}{f_A} \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) w(k) \exp(-j\omega kT) \right|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |w(k)|^2}. \quad (4.36)$$

Отримана оцінка (4.36) називається модифікованою періодограмою.

Уелч (Welch) запропонував поділити N відліків початкового сигналу на декілька сегментів, що перекриваються, з метою збільшити їх число i , відповідно, зменшити дисперсію оцінки при осередненні результатів за окремими сегментами. Алгоритм, що отримав назву метода осереднення модифікованих періодограм, містить наступні кроки:

- сигнал розбивається на сегменти, що перекриваються;
- кожен сегмент сигналу помножується на вагову функцію (вводиться вікно);
- для зважених сегментів обчислюються модифіковані періодограми;
- періодограми осереднюються.

За допомогою функції PSD MatLab 6.5, яка реалізує метод Уелча, були визначені спектри потужності [104]. Використовувалось вікно Хемінга, довжина якого вибрана так, що з урахуванням перекриття 50 % сигнал розділяється на 8 фрагментів.

Вихідні дані представляли собою 20 ПХ ВВМ. У кожній з характеристик використовувався лише усталений процес («хвіст» характеристики).

Спектр, що відповідає ПХ ВВМ (рис.4.33), приведено на рис. 4.34.

Як видно з рис.4.34, амплітуди спектральних складових на частоті 12 Гц і 25 Гц дорівнюють 32 дБ/Гц і 27 дБ/Гц і суттєво виділяються на загальному фоні. Були визначені амплітуди цих складових на всіх отриманих 20 спектрах. Графіки зміни амплітуд вказаних гармонік від періоду зняття ПХ (час напрацювання ВВМ) показані на рис.4.35-4.36. При цьому логарифмічний масштаб замінений на звичайний.

Як видно з графіків, значне збільшення амплітуди спектру на частоті 12 Гц і 25 Гц обумовлене швидким зношенням ПВ та БД ВВМ. Після зняття останньої ПХ він був зупинений і проведена наплавка робочих органів – ПВ та БД.

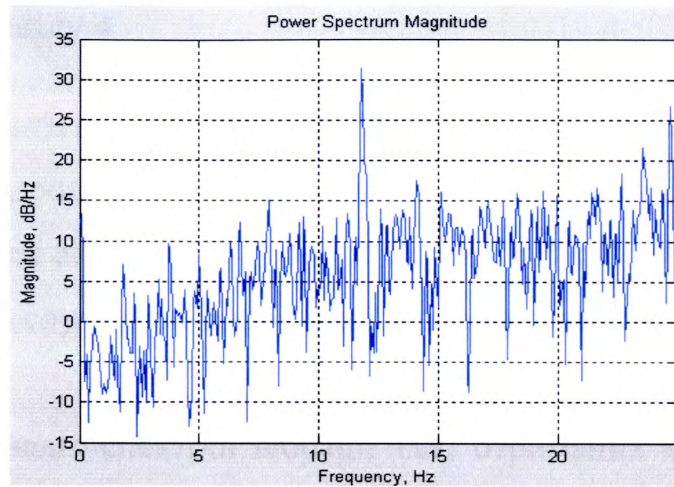


Рис. 4.34 Спектр перехідної характеристики ВВМ

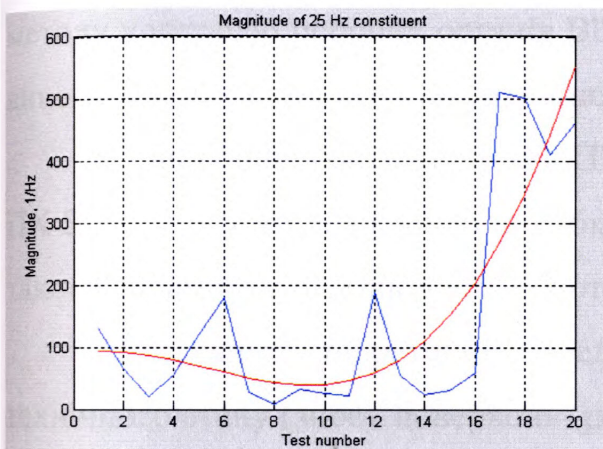


Рис. 4.35 Графіки зміни амплітуди спектральних складових на частоті

12 Гц від періоду напрацювання млина

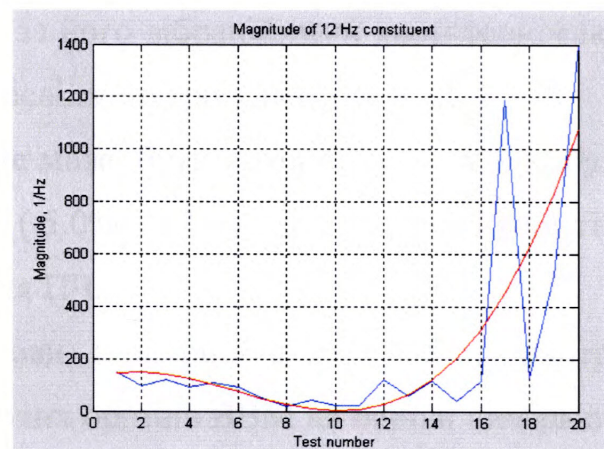


Рис. 4.36 Графіки зміни амплітуди спектральних складових на частоті

25 Гц від періоду напрацювання млина

Проведені дослідження показали, що застосовуючи непараметричний метод ідентифікації до ПХ ВВМ шляхом визначення потужності спектру її «хвоста» методом Уелча, за ДО технічного стану робочих органів млина можуть бути використані амплітуди спектру на частоті 12 Гц і 25 Гц, зміна яких відповідає зміні стану ВВМ – величині зношування його робочих органів. Для розробки методу діагностування технічного стану ВВМ з використання вказаної ознаки необхідно провести комплекс цілеспрямованих експериментальних досліджень з метою встановлення відповідності зміни амплітуди спектру на частоті 12 Гц і 25 Гц величині зміни структурного параметру ВВМ – величині зношування ПА та БД ПЧ у кількісному виразі.

Висновки до розділу 4

1 Проведений аналіз експериментального матеріалу показав, що:

- вібростан гідроциліндрів та опорних підшипників (1-го і 2-го) привідного АД на період експлуатації робочих органів ВВМ до повної їх заміни є незмінним і не може слугувати інформаційним параметром технічного стану останніх;

- візуальних аналіз спектрів вібрації ПЧ, отриманих в різний період її експлуатації, не дозволяє виявити зміни гармонійних, субгармонійних чи просто спектральних складових в аналізованій смузі частот, що вимагає при розробці методу контролю робочих органів ВВМ за його вібраційними характеристиками, використання результатів аналітичних досліджень, розглянутих в 2.2-2.3;

- віброшвидкість коливань ПЧ не може бути використання для побудови ПХ ВВМ у зв'язку зі значною похибкою (5.0%-10.3%), що вимагає використання такого параметра, як швидкість обертання ПЧ.

2 Розглянуті теоретичні передумови і запропоновано метод контролю технічного стану (зносу поверхонь) робочих органів ВВМ на основі вимірювання та аналізу вібраційних характеристик процесу помолу вугілля, а також практичний алгоритм для його реалізації.

3 Встановлено наявність залежності між зносом ПВ, БД ВВМ та його ПХ, однак використаний в дослідженні простий метод ідентифікації (кратних коренів) не дозволяє виділити адекватну ДО, що вимагає застосування складніших методів ідентифікації ВВМ з використанням моделей вищих порядків.

4 Аналіз розглянутих 16 моделей при встановленні залежності між зносом робочих органів ВВМ та його ПХ показав, що параметр Tr_3 моделі P3DZU збільшується із збільшенням величини зношування робочих органів, на основі чого встановлена її емпірична залежність від вказаного параметру, яка покладена в основу методу контролю технічного стану робочих органів.

5. Встановлено, що при використанні методу Симою і моделі автогрегесії для визначення ДО технічного стану робочих органів, остання є більш

ефективною, оскільки значення ДО – полюса зменшується у 2,8 раз за 90 днів експлуатації ВВМ, в той час як за методом Симою воно є значно меншим.

6. Показано, що використання методів непараметричної діагностики для оцінки технічного стану робочих органів ВВМ також дозволяє виявити ДО, якими в результаті проведених досліджень вибрані амплітуди спектру на частоті 12 Гц і 25 Гц, зміна яких відповідає зміні величини зношування його робочих органів.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ВВМ

5.1. Розроблення апаратної частини мікроконтролерної системи діагностування ВВМ

Як було встановлено в результаті досліджень, процес перемелювання паливного вугілля за допомогою промислового млина супроводжується вібраційними процесами, частотний аналіз яких дозволяє визначити ступінь зносу його робочих поверхонь [91].

Вимірювальний діапазон частот може бути розбитий на смуги, які залежать від розмірів вугільних фрагментів:

Таблиця 5.1

Залежність кількості фрагментів вугілля від їх діаметрів

Діаметр фрагментів [мм]	Усереднений діаметр [мм]	Кількість фрагментів
3-5	4	29737
5-10	7.5	4295
10-15	12.5	1498
15-20	17.5	643
20-25	22.5	229
25-30	27.5	153
30-35	32.5	24
35-45	40	5
45-55	50	8

У графічному вигляді описана залежність наведена на рис.5.1.

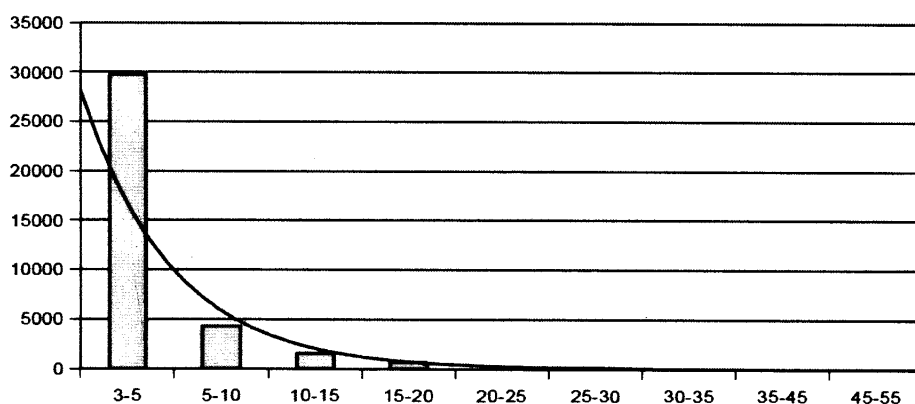


Рис. 5.1 Залежність кількості фрагментів вугілля від їх діаметрів

Графічна залежність кількості фрагментів вугілля від їх діаметрів може бути аналітично апроксимована експоненціальною функцією [105]:

$$n(d) = a \cdot e^{(b \cdot d)} + c \cdot e^{(d \cdot x)},$$

де коефіцієнти функції: $a = 1194000$, $b = -0,9852$, $c = 13060$, $d = -0,1733$

Розраховані частоти для робочого віброакустичного сигналу становлять від 40Гц до 100Гц. Інші частоти містять інформаційні завади, тому повинні бути відфільтровані за допомогою аналогового фільтра. Аналогова фільтрація застосовується в даному пристрої, оскільки це дозволяє уникнути застосування затратних при проектуванні, цифрових сигнальних процесорів. Необхідна частота смуги пропускання смугопропускного фільтра визначається

як: $f_0 = \frac{f_g + f_n}{2} = \frac{100 + 40}{2} = 70$ Гц. Виходячи з можливості фізичної реалізації [106],

сформульовані вимоги до аналогового фільтра:

- Тип характеристики фільтра : поліном Чебишева;
- Центральна частота $f_0 = 70$ Гц;
- Коефіцієнт підсилення фільтра $K = 0$ дБ;
- Ширина смуги пропускання $\Delta f = 60$ Гц;
- Порядок фільтра $n = 6$;
- Максимальна нерівномірність в смузі пропускання 3дБ.

Реалізація фільтра з використанням ланок Саллена-Кі, дозволяє мінімізувати апаратні витрати на проектування. Принципова схема фільтра синтезована з використанням системи проектування електронних схем MicroCAP [107] і наведена на рис.5.2.

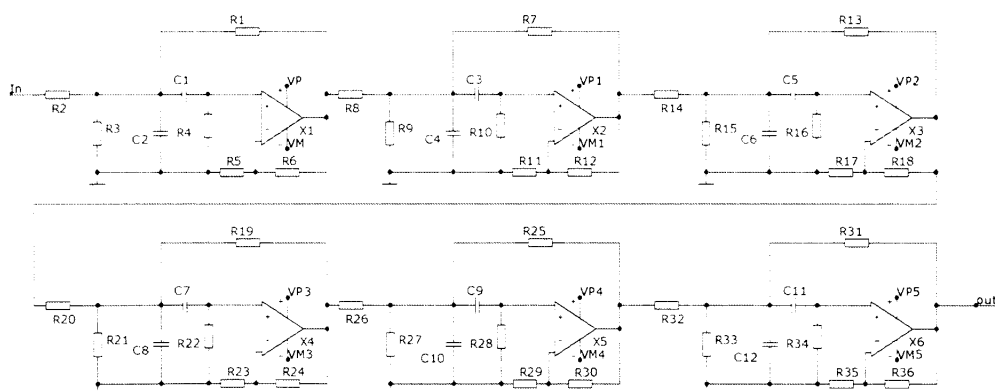


Рис. 5.2 Смугопропускний фільтр. Схема електрична принципова

Симуляція роботи схеми активного фільтра за допомогою MicroCAP-а дозволяє побудувати його АЧХ:

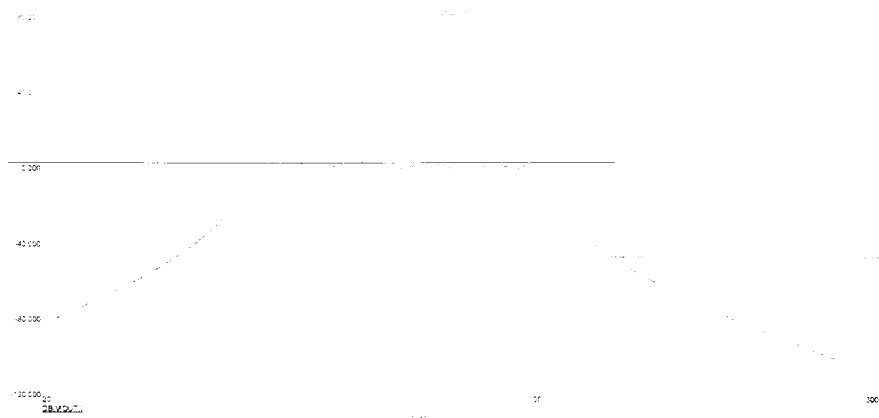


Рис. 5.3 Смугопропускний фільтр. Амплітудно-частотна характеристика

Як видно з рис. 5.3 АЧХ, одержана за допомогою машинного моделювання схеми фільтра, повністю відповідає поставленим вимогам.

Структурна схема розроблюваної мікроконтролерної системи діагностування наведена на рис 5.4.

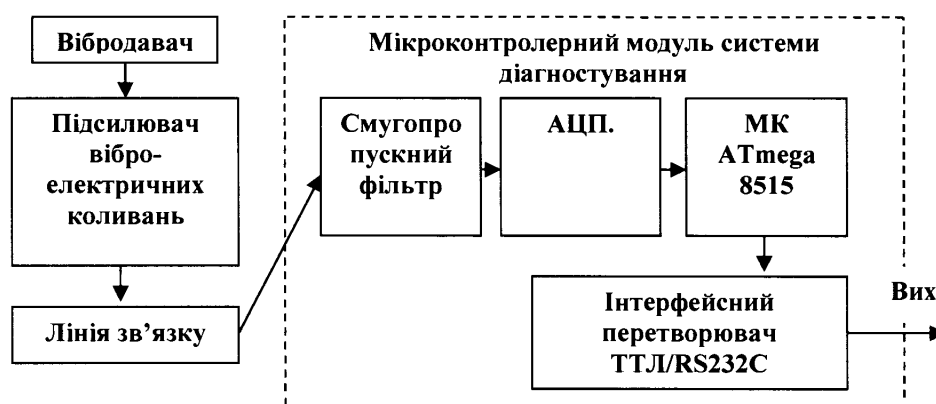


Рис. 5.4 Структурна схема мікроконтролерної системи діагностування

Працює розроблювана система наступним чином: Електричний сигнал від вібратора підсилюється в окремому модулі підсилювача віброелектричних коливань, який фізично міститься в безпосередній близькості від вібратора. Підсилений сигнал через лінію зв'язку довжиною 10м надходить на вхід смугопропускного фільтра (СПФ) мікроконтролерного модуля системи діагностування. Така схема дозволяє зменшити вплив наведених сторонніх електромагнітних завад на корисний сигнал. СПФ виділяє з загального віброелектричного сигналу інформаційну смугу, яка і аналізується за допомогою мікроконтролера ATmega8515 [108], що працює на тактовій частоті 11,0592МГц, яка дозволяє узгоджувати швидкість передачі даних на всіх стандартних частотах

COM-порта. Для перетворення до цифрового вигляду використовується 12-розрядне АЦП LTC1860 [109]. Основні технічні характеристики цієї мікросхеми:

- Швидкість перетворень – 250 тис. виборок/сек;
- Розрядність – 12біт;
- Струм споживання – 850мкА;
- Автоматичне зменшення струму споживання до 2мкА при частоті перетворень меншій 1 тис. виборок/сек;
- Повністю диференціальний вхід;
- Синхронний послідовний інтерфейс, сумісний зі стандартами SPI/MICROWARE.

Мікросхема АЦП застосовується для побудови високошвидкісних систем збору даних, портативних вимірювальних інструментів, що можуть живитись від автономних хімічних джерел живлення, тощо.

Програма мікроконтролера за розробленим алгоритмом діагностування підраховує питому кількість частинок, які створюють значні віброколювання та оцінює ступінь зносу робочих поверхонь млина. Мікроконтролер під'єднується до зовнішнього промислового контролера управління млином типу Simatic S7-400 фірми Siemens, за допомогою інтерфейсу RS-232C [110]. За запитом зовнішнього контролера система діагностування повертає оціночну величину зносу робочих поверхонь млина.

Остаточна принципова електрична схема мікроконтролерного модуля системи діагностування валкового млина наведена на рисунку Додатку Г. Трасування друкованої плати виконано в системі Pcad 2004 [111].

Друкована плата мікроконтролерної системи діагностування наведена на рисунках Додатку Г.

5.2. Розроблення програмного забезпечення для системи діагностування вугільного млина

Алгоритм функціонування програмного забезпечення системи діагностування вугільного млина наведений на рис.5.5 .

Робота алгоритму діагностування побудована на використанні системних таймерів мікроконтролера AtMega8515 [112], які задають часові інтервали, на основі яких здійснюється аналіз даних з АЦП, де визначається кількість фрагментів усередненого радіусу 22,5мм, та обчислюється загальний поточний знос робочих поверхонь млина. Обмін даними із зовнішніми управляючими пристроями здійснюється за допомогою RS232C, який у вигляді послідовного інтерфейсу реалізований в мікроконтролері з використанням системи переривань. Тому всі операції по вводу даних, необхідних для обчислень та виводу результатів розрахунків, здійснюються в підпрограмі обробки переривань послідовного інтерфейсу мікроконтролера AtMega8515.

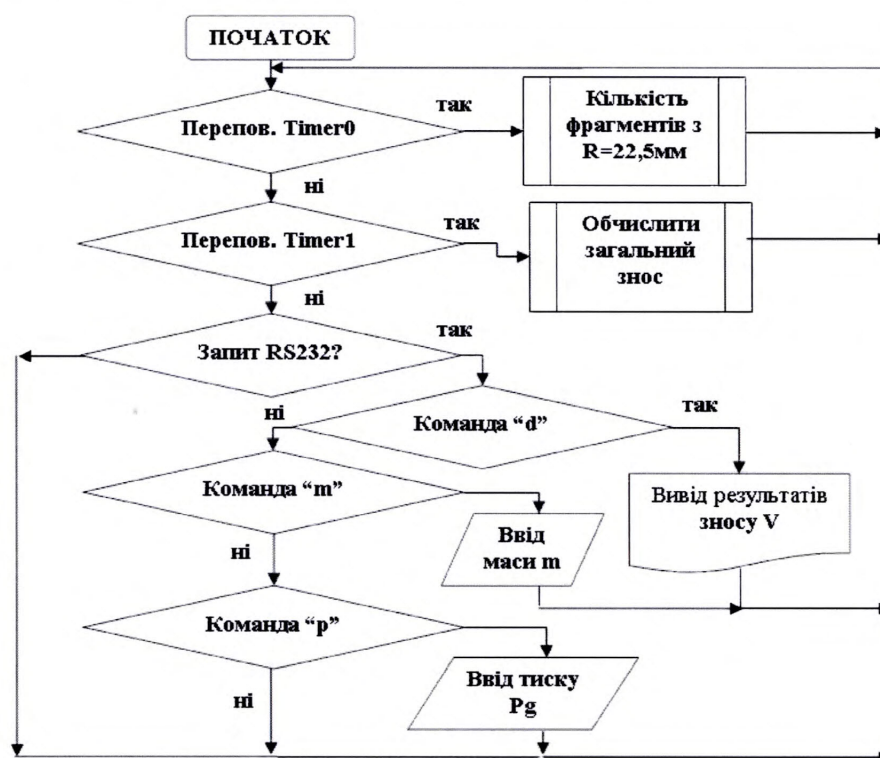


Рис. 5.5 Блок-схема програмного забезпечення мікроконтролерної системи діагностування

При розробленні програмного забезпечення використані стандартні Сі-бібліотеки, та спеціалізовані AVR-бібліотеки, що входять до складу CodeVision [113,114]:

```

#include <mega8515.h>
#include <spi.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <delay.h>

```

Константи, що необхідні для забезпечення встановлення з'єднання за допомогою універсального асинхронного послідовного інтерфейсу, та шини SPI:

```
// Constants - Configuration SPI
#define SRAMSIZE 32000
#define SAMPLEFREQ 8000
//Constants - Configuration UART
#define UPE 2
#define OVR 3
#define FE 4
#define UDRE 5
#define FRAMING_ERROR (1<<FE)
#define PARITY_ERROR (1<<UPE)
#define DATA_OVERRUN (1<<OVR)
```

Константи, що необхідні для проведення основних обчислень згідно до програмованого алгоритму:

```
#define a (1194000)
#define b (-0.9852)
#define c (13060)
#define d (-0.1733)
#define dc 0.15
#define g 9.8105
#define pi 3.14159265
#define HB 600.00
```

Для збереження даних про розраховану кількість вугільних частинок створена структура, що визначає число вугільних фрагментів, їх кількість, та об'єм зруйнованої речовини, що визначає знос робочих поверхонь.

```
struct
{
float number;
float size;
float volume;
} coal[9]; // Main structure of program
```

В змінних `current_number` зберігаються поточні кількості вугільних фрагментів, які потрібні для накопичення цих даних:

```
float current_number[116];
```

В змінній `total_volume` зберігається загальне значення об'єму зруйнованої речовини робочих поверхонь млина, накопичене від початку процесу моніторингу.

```
float total_volume ;
```

В змінній `current_number_of_225` зберігається поточне число вугільних фрагментів радіусу 22,5мм, яке надходить з лічильника імпульсів:

```
float current_number_of_225;
```


Змінні m та P_g використовуються при розрахунку притискового зусилля, що є невід'ємною складовою розрахунку об'єму зруйнованого матеріалу робочих поверхонь млина:

```
float m;
float Pg;
```

Початкова ініціалізація змінних потрібна при першому запуску програми, при цьому структура `coal.size` ініціалізується рядом значень типових середніх радіусів вугілля, які використовуються при обчисленнях, інші змінні ініціалізуються нулями:

```
coal[0].size = 4;
coal[1].size = 7.5;
coal[2].size = 12.5;
coal[3].size = 17.5;
coal[4].size = 22.5;
coal[5].size = 27.5;
coal[6].size = 32.5;
coal[7].size = 40;
coal[8].size = 50;
for(i=0;i<9;i++)
{
coal[i].number=0;
coal[i].volume=0;
current_number[i]=0;
}
total_volume=0;          // initial value of total_volume = 0
current_number_of_225=0; // initial value of current number of coal with
radius 22,5 = 0
m=0;
Pg=0;
```

Конфігурування таймера №0 мікроконтролера здійснюється виходячи з умов його функціонування. `TIMER0` відповідає за відлік часу для зчитування даних від АЦП. Обчислюємо значення, яке необхідно занести в регістр `TCNT0`, для того, щоб переповнення таймера відбувались за час $0,00001$ с. при заданій частоті роботи основного кварцового генератора мікроконтролера $f_{\max} = 11059200$ Гц.

$$\frac{1}{11059200} \cdot n = 0,00001 ; n=111_{10} \rightarrow 255-n = 14_{10} = 92_{16}.$$

Тому `TCNT0=0x92`;а частота $f = 1/0.00001$ sec

```
// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 11059,200 kHz
// Mode: Normal top=FFh
// OC0 output: Disconnected
// Computing number of impulses to count 0.00001 sec
// (1/11059200)*n=0.00001
// n=111(D) 255-n = 14(D) = 92(H)
```

```
// TCNT0=0x92;
TCCR0=0x01;
TCNT0=0x92;
OCR0=0x00;
```

Таймер 1 визначає періоди часу, в які здійснюється розрахунок загального об'єму зношених робочих поверхонь. Такий розрахунок проводиться після одного повного оберту помельного диску, за час 1,57сек. Переповнення таймера 1 здійснюється через кожні 0,01сек. і після 157 таких циклів функція розраховує загальний об'єм зруйнованого металу. Обчислюємо значення, яке необхідно занести в регістр TCNT1, для того, щоб переповнення таймера відбувались за час 0,01с. при заданій частоті роботи основного кварцового генератора мікроконтролера $f_{max} = 11059200\text{Гц}$, який працює з коефіцієнтом поділу 8:

$$\frac{1}{1382400} \cdot n = 0,01; n = 13824_{10} \rightarrow 65535 - n = 5171_{10} = C9FF_{16}.$$

```
// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 1382,400 kHz
// Mode: Normal top=FFFFh
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
// Input Capture on Falling Edge
// Timer 1 Overflow Interrupt: On
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
// Computing number of impulses to count 0.01 sec
// (1/1382400)*n=0.01
// n=13824(D) 65535-n = 5171=C9FF
// TCNT1H=0xC9;
// TCNT1L=0xFF;
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x02;
TCNT1H=0xC9;
TCNT1L=0xFF;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
```

Нормальна робота таймера вимагає використання переривань, що спрощує розроблення програми та зменшує навантаження на процесор. Ініціалізація переривань здійснюється наступним чином:

```
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x82;
```

Конфігурація універсального асинхронного прийомопередавача визначає параметри цифрового послідовного коду, за допомогою якого здійснюється передача даних до зовнішнього блоку системи управління валкового млина. Дані параметри необхідні для того, щоб успішно здійснити обмін даними із зовнішнім задаючим пристроєм. Параметри послідовного порту наступні: Формат даних – 8біт даних, 1стоповий біт без контролю на парність, повнодуплексний режим роботи, швидкість передачі – 57600 бод:

```
// Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity
// USART Receiver: On
// USART Transmitter: On
// USART Mode: Asynchronous
// USART Baud Rate: 57600
UCSRA=0x00;
UCSRB=0x98;
UCSRC=0x86;
UBRRH=0x00;
UBRRL=0x0B;
```

Конфігурування шини SPI на відміну від послідовного інтерфейсу менш критичне до вибору параметрів, оскільки це швидка та синхронна шина даних, яка з'єднує зовнішнє 12-розрядне АЦП з мікроконтролером. Швидкість передачі даних вибрана 2764,8 кбіт/сек:

```
// SPI initialization
// SPI Type: Master
// SPI Clock Rate: 2764,800 kHz
// SPI Clock Phase: Cycle Half
// SPI Clock Polarity: High
// SPI Data Order: MSB First
SPCR=0x58;
SPSR=0x00;
```

Процедура обробки переривання від таймера 0, необхідна для підрахунку кількості частинок середнього радіусу 22,5мм:

```
// Timer 0 overflow interrupt service routine
interrupt [TIM0_OVF] void timer0_ovf_isr(void)
{ // Reinitialize Timer 0 value
TCNT0=0x92;
if(m!=0&&Pg!=0)current_number_of_225 = count_coal();
}
```

Процедура обробки переривання від послідовного порту здійснює комунікативні функції між оператором або системою керування валкового млина та мікроконтролерною системою діагностування. При цьому стає можливим введення в систему діагностування даних, необхідних для розрахунків (маси валків, тиск встановлений оператором в гідропритискній системі - m, Pg), та

виведення значень облікованих вугільних фрагментів середнього радіусу 22,5мм. Операції обміну здійснюються за допомогою додаткових символічних команд ('d','m','p','c'), які визначають тип подальшого обміну:

```
// USART Receiver interrupt service routine
interrupt [USART_RXC] void usart_rx_isr(void)
{ char status,data,ch; // variable needed to read usart data
int tmp
status=UCSRA;
data=UDR;
if ((status & (FRAMING_ERROR | PARITY_ERROR | DATA_OVERRUN))==0)
{
ch=data;
if(ch= ='d')
{
ch='n'; //change sign to not repating sequence
printf("Total Destruction: %e",total_volume);
}
if(ch= ='m')
{
ch='n';
printf("Put value of m:");
scanf("%d",&tmp);
m=(float)tmp ;
printf("%f",m);
}
if(ch= ='p')
{
ch='n';
printf("Put value of Pg (kPa):");
scanf("%d",&tmp);
Pg=(float)tmp*1000;
printf("%f MPa",Pg);
}
if(ch= ='c')
{
ch='n';
printf("Current number of coal: %f",current_number_of_225 ); /
}
}
}
```

Наступна функція викликається з періодом 1,57сек, і після цього в ній здійснюються обчислення загального об'єму зруйнованого робочого матеріалу. Початково розраховуються загальна кількість вугільний фрагментів на основі підрахованих вхідних фрагментів середнього радіусу 22,5мм за допомогою виклику функції `get_number_of_coal`. Далі визначається різниця між попереднім значенням кількості фрагментів та тієї кількості, що визначена за один повний цикл обертання диску. Для одержаної різниці обчислюється значення об'єму зруйнованого робочого матеріалу:

```
interrupt [TIM1_OVF] void timer1_ovf_isr(void)
{
int i; //auxiliary variable
static int time; // storing number of impulses to count 1.57 sec
```

```

// Reinitialize Timer 1 value
TCNT1H=0xc9;
TCNT1L=0xFF;
time++;
if(time==157)
{
time=0;
for(i=0;i<9;i++)
{
//get whole number of coal
current_number[i] = floor(get_number_of_coal(coal[i].size,
current_number_of_225));
current_number[i] = current_number[i] - coal[i].number;
if(current_number[i]>0) // if difference is bigger than zero, compute volume
{
//add volume to main structure
coal[i].volume += get_volume(current_number[i], coal[i].size);
//add whole volumes to get total volume of destroyed material
total_volume +=coal[i].volume;
//add difference to whole number of coal
coal[i].number += current_number[i];
}
}
}
}

```

Наступна функція призначена для зчитування даних від зовнішнього 12-розрядного АЦП, під'єданого до мікроконтролера по шині SPI:

```

// Function get_result_of_adc
int get_result_of_adc(void)
{
int result;
PORTB.0=0;
PORTB.0=1;
delay_us(90);
PORTB.0=0;
result=(( int)spi(0))<<8;
result|=(( int)spi(0)>>3);
result=abs(result>>3);
result= 4096-result;
return result;
}

```

Функція `count_coal` обчислює кількість вугільних фрагментів за допомогою аналізу аналогового сигналу, що одержується від АЦП. Відлік одного імпульсу здійснюється за фактом переходу вхідної напруги послідовно через рівні $0.3U_{\max}$ та $0.7U_{\max}$. Напруга U_{\max} відповідає максимальному коду 12-розрядного АЦП, який складає 4096 відліків. Кількість підрахованих імпульсів відповідає кількості вугільних фрагментів, що були зафіксовані віброакустичним перетворювачем.

```

float count_coal(void)
{
static float count=0;
static int flag03=0;
if(get_result_of_adc()<=0.3*4096) flag03=1;
if((get_result_of_adc()>=0.7*4096)&&(flag03==1))
{

```

```

flag03=0;
count=count+1;
}
return count;
}

```

Наступна функція повертає загальне число фрагментів вугілля, що розраховується на основі попередньо створеної інтерполяційної залежності. Знаючи кількість підрахованих вугільних фрагментів усередненого радіусу 22,5мм, у вигляді кількості імпульсів, на основі відомої статистичної залежності розраховується загальна можлива кількість вугільних фрагментів інших радіусів:

```

float get_number_of_coal(float size_of_coal, float number_of_coal_225)
{
float number_of_coal = 0;
number_of_coal = ((number_of_coal_225/229)*
(a*exp(b*size_of_coal) + c*exp(d*size_of_coal)));
return number_of_coal;
}

```

Аналітичні залежності, які використовуються при розрахунках (сила притиску валка, діаметр відтиску, об'єм, що видавлюється кулькою) оформлені у вигляді Сі-функцій:

Сила притиску валка:

```

float get_F(float m, float Pg)
{
return m + ((pi*pow(dc,2))/4)*(Pg/g);
}
float get_Fr(float F, float D)
{
float r;
r=D*pow(10,-3)/2;
return F*pi*pow(r,2);
}

```

Діаметр відбитку кільки вугільного зразка під дією притискної сили:

```

float get_d( float D, float Fr)
{
return sqrt(pow(D,2)- pow( D - (2*Fr)/(3.14*D*HB) ,2 ));
}

```

Глибина вдавненого відбитка:

```

float get_h(float D, float d1)
{
return 0.5*(D-sqrt( pow(D,2)-pow(d1,2)));
}

```

Об'єм матеріалу видавненого кулькою:

```

float get_V(float h, float D)
{
return 0.33*pi*pow(h,2)*(3*(D/2)-h);
}

```

Загальний об'єм видавленого матеріалу :

```
float get_volume(float number, float size)
{
float D;
D=size;
return number*get_V(get_h(D, get_d(D, get_Fr(get_F(m, Pg), D))), D);
}
```

Перевірка роботи програмного забезпечення системи здійснена в системі ISIS Proteus. Симуляційна схема наведена на рис.5.6.

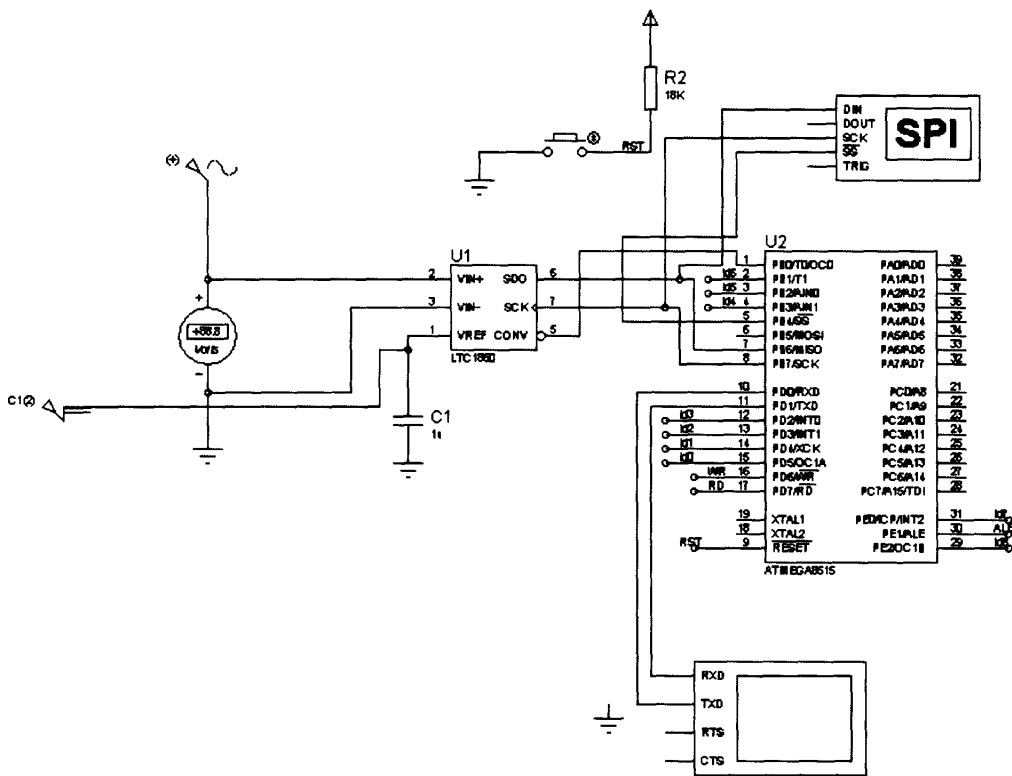


Рис. 5.6 Симуляційна схема в системі Proteus

В результаті проведених на протязі двох років досліджень на діючому ВВМ був отриманий значний об'єм експериментального матеріалу. Проаналізуємо його з точки зору вирішення поставлених в роботі задач.

5.3. Розроблення підсилювача до віброакустичного давача системи діагностування

Розроблення підсилювача було здійснене на основі низькошумливого спеціалізованого інструментального підсилювача INA163 [114] (ф-ми Burr-Brown/Texas Instruments, США). Основні технічні характеристики INA163:

Рівень шуму: $1\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ на 1кГц. Коефіцієнт гармонічних спотворень 0,002% на частоті 1кГц, при підсиленні $G=100$. Смуга пропускання: 800кГц, при $G=100$.

Діапазон напруг живлення $\pm 4,5 \dots \pm 18$ В. Коефіцієнт послаблення синфазної завади > 100 дБ.

Принципова електрична схема підсилювача наведена на рис.5.7. Схема працює наступним чином: вхідний диференціальний сигнал від віброакустичного давача надходить на вхід інструментального підсилювача INA163 і підсилюється там до необхідного значення.

Вхідний сигнал, що надходить від вібродавача фільтрується RC-ланками (C1, C2, R3, R4) від можливих радіочастотних завад, які можуть наводитись на з'єднувальних провідниках.

Коефіцієнт підсилення INA163 дискретно регулюється за допомогою резисторів R21, R22, R23, R24, які підключаються паралельно до входів (Res1, Res2) у відповідності до заданого двійкового коду і визначають коефіцієнт передачі підсилювача.

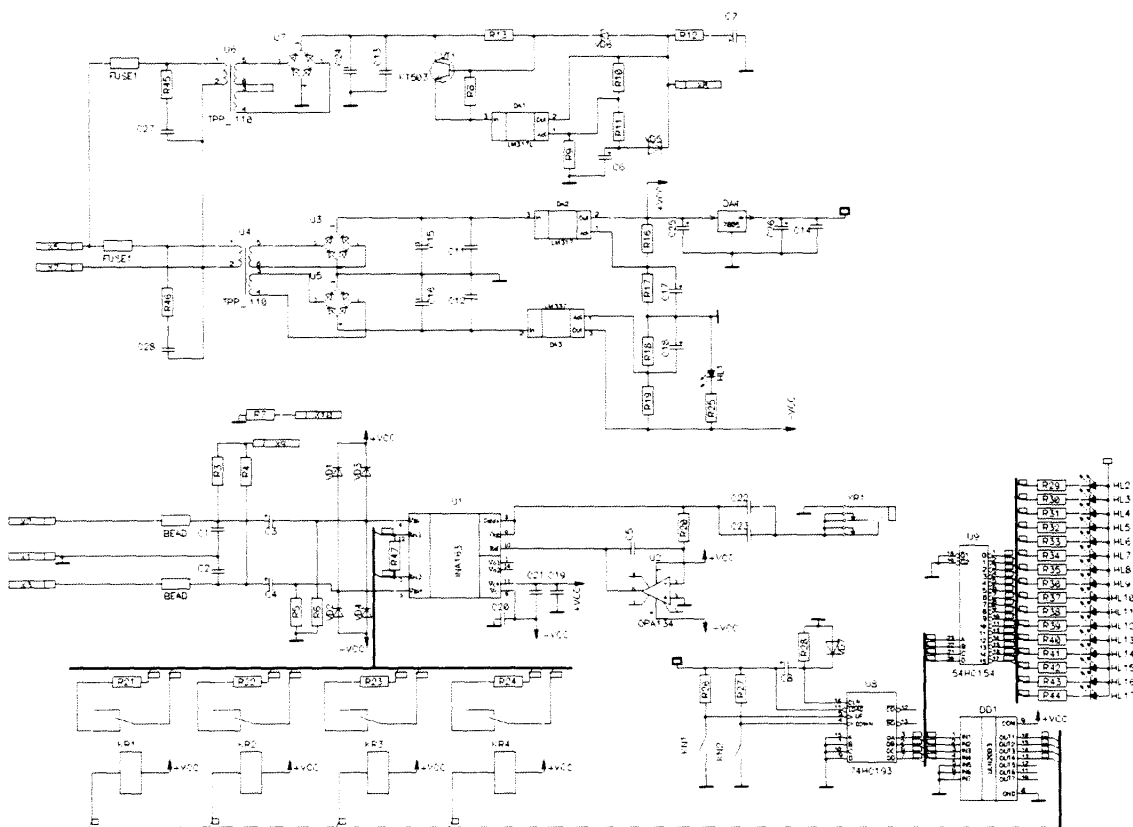


Рис. 5.7 Підсилювач віброакустичного перетворювача. Схема електрична принципова

Наявність дискретного регулювання дозволяє проводити вимірювання вібросигналу в абсолютних значеннях віброприскорення (м/сек^2). Підключення

резисторів, що визначають коефіцієнт передачі інструментального підсилювача, здійснюється за допомогою герконових реле РЭС-55А. Підключення реле реалізоване з використанням мікросхеми-набору транзисторних ключів типу ULN2003[115], яка забезпечує підсилення управляючого сигналу за струмом та захист усіх електронних елементів схеми від ЕРС самоіндукції, яка виникає при вимиканні електромагніта реле. Вхід інструментального підсилювача INA163 захищений від можливої перенапруги за допомогою діодів VD1-VD4, які вмикаються в разі коли вхідна напруга внаслідок зовнішніх паразитних наведень перевищує значення ± 15 В – напруги живлення інструментального підсилювача. Зміна коефіцієнта підсилення здійснюється дискретно, цифровим шляхом, за допомогою реверсивного лічильника КР1533ИЕ7 (аналог 74НС193), що дозволяє поступово збільшувати і зменшувати підсилення схеми. Відображення поточного значення коефіцієнта підсилення здійснюється за допомогою дешифратора 4-16 типу 54НС154 та 16 світлодіодів.

Розроблюваний підсилювач може працювати з вихідними розділювальними конденсаторами С22, С23 які відфільтровують постійну складову сигналу, або без них – при цьому автоматичне регулювання постійного зміщення вихідного сигналу відбувається за допомогою інтегратора, виконаного на операційному підсилювачі ОРА134 та конденсаторів С5. В такому разі замість конденсатора С23 вставляється перетинка.

Живлення схеми двополярне ± 15 В, стабілізоване, виконане на трансформаторі ТПП-110 та двох лінійних стабілізаторах типу LM317[116], LM337. Основне живлення використовується для роботи аналогових підсилювачів - мікросхем INA163 та ОРА134 [117] та електромагнітів управляючих реле РЭС-55А. Додаткова напруга живлення +5В використовується для роботи цифрових ТТЛ мікросхем (74НС193 та 54НС154) та світлодіодів індикації (HL2-HL17). Напруга +5В має окремий лінійний стабілізатор - мікросхему КРЕН5А(аналог LM7805) [118]. Окреме коло підвищеної напруги живлення виконане на додатковому трансформаторі ТПП-110, транзисторі VT1, та лінійному стабілізаторі напруги – мікросхемі LM317L. Таке коло дозволяє отримувати окрему фіксовану напругу в діапазоні від +24 до +45В. для живлення

віброакустичного перетворювача, в разі, якщо він цього потребує. RC-кола R45C27 та R46C28 включені в первинну обмотку трансформаторів живлення призначені для зменшення негативного впливу можливих перехідних процесів на лінії живлення [119].

Друкована плата розробленого підсилювача наведена на рисунках Додатку Г. Набір принципової схеми та компоновання елементів здійснений з використанням системи проектування PCAD2002. Проектування топології провідників для розробленої схеми здійснене за допомогою програми автоматичного трасування друкованих плат Cadence Spectra V15 [120]

5.4. Оцінка точності результатів вимірювань

Аналіз похибок засобів вимірювання системи діагностування зносу робочих органів ВВМ слід здійснювати на основі технічних даних компонентів, які використовуються в системі, а також із урахуванням алгоритмів обчислення необхідних величин.

Похибка каналів вимірювання вібрації включає наступні складові:

1) похибка робочого первинного віброперетворювача $\delta_{рп}$ – вібро-акселерометра ($\delta_{рп} = 1,5\%$)

2) похибка підсилювача віброакселерометра: похибка коефіцієнту підсилення $\delta_{кп} = 0,01\%$ та температурна похибка $\delta_{пт} = 0,01\%$;

3) похибка перетворення шестикаскадного аналогового фільтра, виконаного на операційних підсилювачах (ОП) одного типу, розраховується на основі того, що її складові похибки визначаються однотипними похибками ОП, що залежать від температури та старіння: $\delta_f = 6 \cdot 0,01 = 0,06\%$

3) похибка АЦП: адитивна $\pm 1,5$ біт та мультиплікативна ± 2 біт, що у відносних значеннях складає відповідно $\delta_{ацп1} = 0,05\%$ та $\delta_{ацп2} = 0,037\%$. [121]

Таким чином, похибка вимірювання у каналі віброелектричного сигналу, з врахуванням того, що її складові статистично некорельовані:

$$\begin{aligned} \delta_V &= \sqrt{\delta_{\delta r}^2 + \delta_{\delta e r}^2 + \delta_{\delta r \delta}^2 + \delta_{\delta \delta \delta r 1}^2 + \delta_{\delta \delta \delta r 2}^2 + \delta_f^2} = \\ &= \sqrt{1,5^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,05^2 + 0,037^2 + 0,06^2} = 1,503\% \end{aligned} \quad (5.1)$$

Результат вимірювання та обчислень – кількість вугільних фрагментів, пропорційна до зносу металічних поверхонь млина, усереднена на одному періоді частоти обертання помольного диску.

Для оцінки загальної похибки слід врахувати вплив статистичного розподілу розмірів фрагментів вхідної вугільної сировини. Експериментальні дані, наведені в табл. 5.1, можна апроксимувати певним теоретичним законом розподілу – показниковим, пуассонівським, нормальним та ін. [122].

Дані таблиці 5.1 можна подати у вигляді гістограми рис. 5.1.

При цьому проводяться вирівнювання статичного ряду за наступним принципом: за відомими з таблиці 5.1 величинами n_i , які характеризують кількість фрагментів, обчислюється оцінка математичного очікування \bar{X} :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K n_i D_i, \quad (5.2)$$

та оцінки дисперсії:

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K n_i (D_i - \bar{X})^2. \quad (5.3)$$

На основі, яких вибирається теоретичний закон розподілу випадкової величини D_i ,

На основі встановленого теоретичного закону розподілу визначається його щільність розподілу та та згладжені величини n_i^* , які дорівнюють:

$$n_i^* = p_i^* N, \quad (5.4)$$

де p_i^* - ймовірність попадання величини D_i в певний інтервал $[D_i, D_{i+1}]$, яких в даному випадку $\epsilon K=9$. Після проведення перерахунку величин n_i^* з дотриманням умови :

$$\sum_{i=1}^K n_i = \sum_{i=1}^K n_i^* = N, \quad (5.5)$$

де N – загальний об'єм вибірки, загальна величина зношування W може бути оцінена за наступною формулою:

$$W = \sum_{i=1}^K G V_i p_i^*. \quad (5.6)$$

При встановленій формулі 6 було прийнято наступні припущення:

- зношування W залежить від діаметру фрагмента вугілля D_i лінійно:

$$W_i = G_i D_i, \quad (5.7)$$

відмінність коефіцієнтів G_i та G зумовлено зв'язком (5.1), при чому в (5.7) відсутній вільний член суми, оскільки при $D_i=0$, очевидно, зношування також рівне 0;

- величина зношування також пропорційна кількості фрагментів вугілля, що попадають в певний діапазон $[D_i, D_{i+1}]$, вказана залежність оцінюється теоретичною ймовірністю p_i^* попадання фрагменту в даний інтервал.

В тому випадку, коли жоден з теоретичних законів не описує достатньо точно гістограму (рис.5.1), можна провести безпосередній розрахунок величини p_i^* на основі експериментального закону розподілу:

$$p_i^* = \frac{n_i}{N}. \quad (5.8)$$

При цьому величини N та n_i вибираються з таблиці 5.1. Для обчислення значення емпіричного коефіцієнта G необхідно провести серію експериментальних досліджень, з дотриманням розроблених в [91] методик.

Аналіз даних, наведених в таблиці 5.1, дозволяє зробити наступний висновок: оскільки за наведеними даними: $\bar{X} = 5.24$; $D\bar{X} \approx S^2 = 11.67$; $\sigma = \sqrt{S^2} = 3.14$, то для проведення обчислення величини зносу використання показникового закону розподілу можна привести до суттєвих погрішностей, оскільки даний закон розподілу має властивість: $Mx = \frac{1}{\lambda}$; $Dx = \frac{1}{\lambda^2}$; $\sigma = \frac{1}{\lambda}$, що в даному випадку використовується з великим наближенням. Тому доцільно використовувати методику оцінки p_i^* , що базується на залежності (5.7). Визначені для даного випадку величини p_i^* наведені в таблиці 5.1. Вірогідність одержаних оцінок величин зношування підвищиться, якщо провести дослідження різних вибірок фрагментів вугілля об'ємом N . В такому випадку, якщо дослідити N_1 вибірок, то похибка обчислень зменшиться в $\frac{1}{\sqrt{N_1}}$ разів [122]. Крім того, для попередньої оцінки величини зношування можна використати формулу (5.6). Записану в вигляді:

$$W = G \frac{1}{3} \pi h^2 \left(\frac{3\bar{X}}{2} - h \right), \quad (5.9)$$

де \bar{X} обчислюється за формулою (5.1). Оскільки величина вибірки N в даному випадку є достатньою величиною ($N=36592$), то довірчий інтервал математичного очікування за критерієм Студента з рівнем надійності $p=0,999$ визначається за формулою:

$$\left(\bar{X} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t_p; \bar{X} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t_p \right), \quad (5.10)$$

і дорівнює:

$$(5.24-0.0532, 5.24+0.0532), \quad (5.11)$$

тобто, похибка обчислення величини \bar{X} складає $\delta_s = 1.01\%$.

Остаточна загальна похибка визначення зносу робочих поверхонь млина визначається як:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_V^2 + \delta_s^2} = \sqrt{1,503^2 + 1,01^2} = 1.811\%.$$

5.5. Визначення оптимального періоду контролю технічного стану ВВМ

Враховуючи, що для ефективного використання розробленого методу контролю необхідно знати оптимальний період, через який необхідно проводити контроль технічного стану робочих органів млина, в роботі розглядається процедура визначення оптимального періоду його контролю.

Процедура визначення оптимального періоду контролю.

З точки зору об'єкту діагностування (контролю) (ОК) ВВМ можна віднести до об'єкту неперервного використання, який періодично діагностується в спеціальному режимі. Вибір періодичного режиму контролю обумовлений тим, що проведення діагностичної процедури вимагає зупинки млина та зняття розгінної (перехідної) характеристики. Технічні засоби контролю (ТЗК) (система діагностування), які реалізують розроблений метод контролю, володіють скінченною надійністю [123].

Розглянемо модель взаємодії ОК і ТЗК. При поступленні заявки на діагностування млин зупиняється (выводиться з робочого режиму). Перед

початком діагностування проводиться перевірка ТЗК на працездатність (самоконтроль ТЗК). Якщо ТЗК працездатні то проводиться контроль працездатності ОК. Якщо за результатами перевірки ТЗК встановлено їх не працездатність, то спочатку проводиться відновлення ТЗК, а лише потім контроль працездатності ОК. Причому на час відновлення ТЗК ОК повертається в робочий режим. Якщо за результатами перевірки встановлено, що ОК працездатний, то знову перевіряється працездатність ТЗК. Аналогічна перевірка ТЗК проводиться і при отриманні негативного діагнозу відносно ОК. Працездатний ОК переводиться в робочий режим після самоконтролю ТЗК, а непрацездатний – після відновлення працездатного стану [124]. Алгоритм діагностування ОК наведено на рис. 5.8.

Система діагностування може перебувати в 15 не сумісних станах, які описані в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Стани системи діагностування при періодичному діагностуванні ОК неперервного використання

Номер стану	Стан об'єкту діагностування	Стан технічних засобів контролю
1	2	3
1	Працездатний ОК в робочому режимі	Працездатні ТЗК виключені
2	Працездатний ОК в робочому режимі	Непрацездатні ТЗК виключені
3	Непрацездатний ОК в робочому режимі	Працездатні ТЗК виключені
4	Непрацездатний ОК в робочому режимі	Непрацездатні ТЗК виключені
5	Працездатний ОК в спеціальному режимі очікує діагностування	Перевірка працездатності ТЗК
6	Перевірка працездатності працездатного ОК	Працездатні ТЗК в робочому режимі
7	Працездатний ОК в спеціальному режимі очікує переведення в робочий режим	Повторна перевірка працездатності ТЗК
8	Працездатний ОК в спеціальному режимі очікує діагностування	Перевірка працездатності непрацездатних ТЗК
9	Працездатний ОК в спеціальному режимі очікує діагностування	Відновлення працездатності ТЗК
10	Непрацездатний ОК в спеціальному режимі очікує діагностування	Перевірка працездатності ТЗК
11	Перевірка працездатності непрацездатного ОК	Працездатні ТЗК в робочому режимі
12	Непрацездатний ТЗК в спеціальному режимі очікує відновлення	Повторна перевірка працездатності ТЗК
13	Аварійне відновлення непрацездатного ОК	Працездатні ТЗК в робочому режимі
14	Непрацездатний ТЗК в спеціальному режимі очікує діагностування	Перевірка працездатності непрацездатних ТЗК
15	Непрацездатний ТЗК в спеціальному режимі очікує діагностування	Відновлення непрацездатних ТЗК

Для кожного з 4-х початкових станів будемо циклограми взаємодії ОК і ТЗК (рис. 5.9).

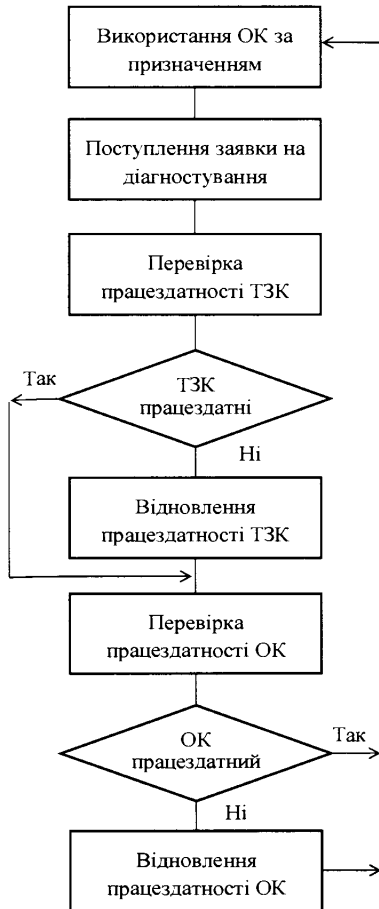


Рис. 5.8 Алгоритм діагностування млина

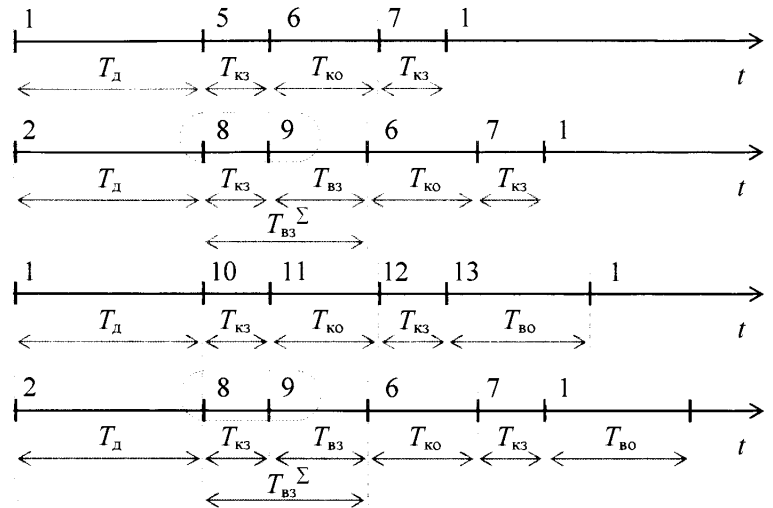


Рис. 5.9 Циклограми моделі взаємодії ОК і ТЗК:

T_d – період діагностування

$T_{ко}$ – час контролю об'єкту

$T_{кз}$ – час контролю засобів

$T_{во}$ – час відновлення об'єкту

$T_{вз}$ – час відновлення засобів

$T_{вз}^{\Sigma}$ – сумарний час відновлення засобів (час контролю + час відновлення)

Для побудови моделі взаємодії елементів СД стани 1,2,3,4 об'єднаємо в один стан (I), що відповідає перебуванню ОК, в якому може бути хоча б один дефект, в робочому режимі, ТЗК в яких також може бути дефект виключені. Стани 5,6 та 7 відповідно нумеруємо II, III, IV. Стани 8 та 9 об'єднуємо в один узагальнений стан (V), що відповідає стану в якому працездатний ОК в спеціальному режимі очікує діагностування, відбувається перевірка працездатності та відновлення ТЗК. Станам 10, 11, 12, та 13 присвоюємо відповідно номери VI, VII, VIII та IX. Стани 14 та 15 об'єднуємо в один узагальнений стан (X), що відповідає стану в якому непрацездатний ОК в спеціальному режимі очікує діагностування, відбувається перевірка працездатності та відновлення ТЗК. Таким чином, кількість узагальнених станів дорівнюватиме десяти.

На основі визначених станів будуємо граф взаємодії елементів СД (рис.5.10).

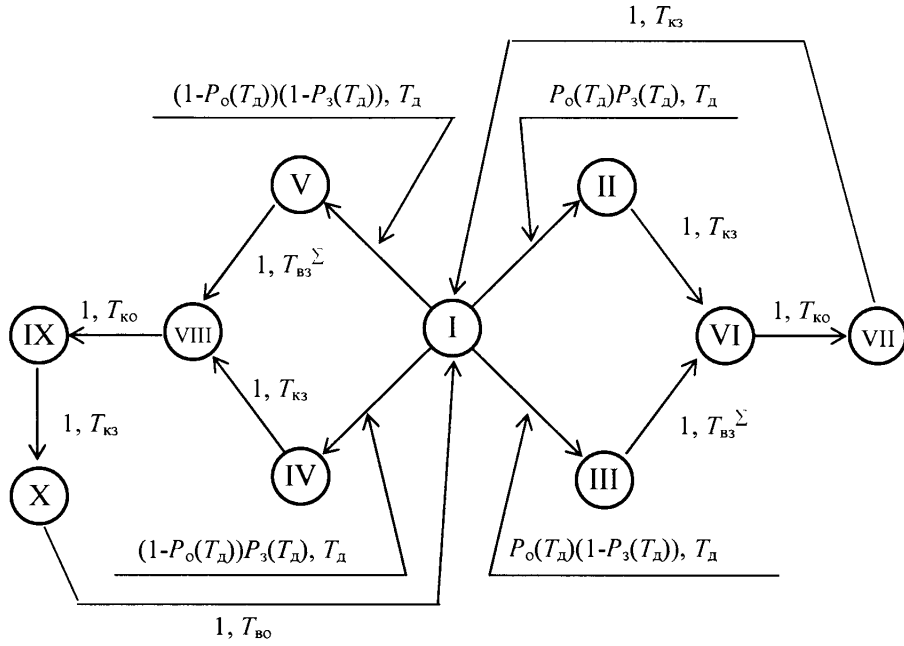


Рис. 5.10 Граф взаємодії елементів системи

Використовуючи граф (рис. 5.10) запишемо систему рівнянь на основі правила [128]

$$\pi_i = \sum_{j=1}^n \pi_j p_{ij}, \text{ при умові } \sum_{i=1}^n \pi_j = 1,$$

де π_i – стаціонарна ймовірність перебування СД в стані s_i без врахування середньої тривалості T_i перебування в цьому стані; p_{ij} – стаціонарна ймовірність перебування СД в стані s_i з врахуванням тривалості T_i перебування в цьому стані.

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \pi_7 + \pi_{10} \\ \pi_2 &= \pi_1 P_o(T_d) \cdot P_3(T_d) \\ \pi_3 &= \pi_1 P_o(T_d) \cdot [1 - P_3(T_d)] \\ \pi_4 &= \pi_1 [1 - P_o(T_d)] \cdot P_3(T_d) \\ \pi_5 &= \pi_1 [1 - P_o(T_d)] \cdot [1 - P_3(T_d)] \\ \pi_6 &= \pi_2 + \pi_3 \\ \pi_7 &= \pi_6 \\ \pi_8 &= \pi_5 + \pi_4 \\ \pi_9 &= \pi_8 \\ \pi_{10} &= \pi_9 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Вибираємо першу перевірку в якості базової ($\pi_6 = \pi_1$) та знаходимо безрозмірні коефіцієнти типу $A_j = \frac{\pi_j}{\pi_6}$.

$$\begin{aligned}
A_1 &= 1 \\
A_2 &= P_0(T_d) \cdot P_3(T_d) \\
A_3 &= P_0(T_d) \cdot [1 - P_3(T_d)] \\
A_4 &= [1 - P_0(T_d)] \cdot P_3(T_d) \\
A_5 &= [1 - P_0(T_d)] \cdot [1 - P_3(T_d)] \\
A_6 &= A_7 = P_0(T_d) \\
A_8 &= A_9 = A_{10} = 1 - P_0(T_d)
\end{aligned} \tag{5.13}$$

Визначаємо тривалості перебування системи діагностування в кожному із станів за формулою

$$T_i = \sum_{j=1}^l p_{ij} M(\tau_{ij}),$$

де $M(\tau_{ij})$ – умовна середня тривалість перебування СД в стані s_i до переходу в стан s_j при умові, що перехід здійснюється миттєво, p_{ij} – ймовірність переходу з i -го стану в j -й стан. Згідно графу представленого на рис.5.9 отримаємо

$$\begin{aligned}
T_1 &= T_d \\
T_2 &= T_4 = T_7 = T_9 = T_{кз} \\
T_3 &= T_5 = T_{вз}^{\Sigma} \\
T_6 &= T_8 = T_{ко} \\
T_{10} &= T_{во}
\end{aligned} \tag{5.14}$$

Оскільки з усіх десяти станів системи діагностування лише в першому ОК використовується за призначенням, то показник готовності буде визначатися за наступною формулою

$$\Pi_r = \frac{A_1 T_{01}}{\sum_{i=1}^{10} A_i T_i},$$

де T_{01} – середня тривалість безперервної бездефектної роботи на періоді діагностування, яку можна визначити, як

$$T_{01} = \int_0^{T_d} P_0(t) dt,$$

де $P_0(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи млина.

Враховуючи, що напрацювання до відмови млина розподілено за показниковим законом розподілу $P_0(t) = \exp(-\lambda_0 t)$, де λ_0 – інтенсивність відмов ОК, отримаємо

$$T_{01} = \frac{1}{\lambda_0} [1 - \exp(-\lambda_0 T_d)]$$

Таким чином,

$$\Pi_r = \frac{\frac{1}{\lambda_0} [1 - \exp(-\lambda_0 T_d)]}{T_d + P_3(T_d) \cdot T_{кз} + [1 - P_3(T_d)] \cdot T_{вз}^\Sigma + P_0(T_d) \cdot (T_{ко} + T_{кз}) + [1 - P_0(T_d)] \cdot (T_{ко} + T_{во} + T_{кз})} \quad (5.15)$$

З врахуванням того, що напрацювання до відмови ТЗК розподілені за показниковим законом, $P_3(t) = \exp(-\lambda_3 t)$, де λ_3 – інтенсивність відмов ТЗК, формулу (4) можна представити у вигляді

$$\Pi_r = \frac{\frac{1}{\lambda_0} [1 - \exp(-\lambda_0 T_d)]}{T_d + \exp(-\lambda_3 T_d) \cdot T_{кз} + [1 - \exp(-\lambda_3 T_d)] \cdot T_{вз}^\Sigma + \exp(-\lambda_0 T_d) \cdot (T_{ко} + T_{кз}) + [1 - \exp(-\lambda_0 T_d)] \cdot (T_{ко} + T_{во} + T_{кз})} \quad (5.16)$$

Згідно експлуатаційної інформації:

$$T_{ко} = 5 \text{ хв}$$

$$T_{кз} = 1 \text{ хв}$$

$$T_{во} = 72 \text{ год}$$

$$T_{вз} = 30 \text{ хв}$$

$$\lambda_0 = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год}$$

$$\lambda_3 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

Підставивши ці значення в формулу (5.16) отримаємо залежність показника готовності млина від періоду контролю. Графічне представлення, якої наведено на рис.5.11.

Як видно з рис. 5.11 максимальне значення показника готовності 0,97 досягається при періоді діагностування 24 год (один раз на добу), в той же час при періоді діагностування 96 год (4 доби) показник готовності становить 0,96, що гірше від максимального лише на 1%.

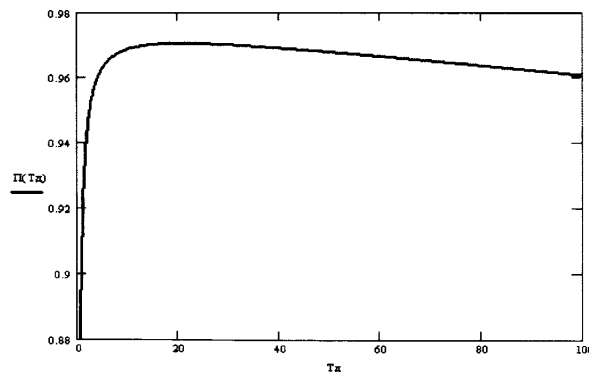


Рис. 5.11 Графік залежності показника готовності ВВМ від періоду контролю

5.6 Розрахунок достовірності контролю технічного стану робочих органів ВВМ

Достовірність контролю – це ступінь довіри до рішень, що приймаються в процесі контролю. Прийmemo за кількісну оцінку ДК ймовірність правильного визначення системою контролю технічного стану ПВ та БД ВВМ. ДК визначається правильністю вибору контрольованих параметрів і правильністю оцінки цих параметрів системою контролю.

ДК залежить від [123]:

– законів розподілу ймовірностей контрольованих величин та їх похибок вимірювання;

– кількості контрольованих величин та повноти контролю;

– часу контролю;

– способу вибору контрольованих величин та величини допуску на них;

– наявності методичних похибок;

– точності заданих вхідних впливів на ОК;

– точності врахування зовнішніх умов.

Правильність вибору контрольованих параметрів можна оцінити ймовірністю правильної оцінки технічного стану ВВМ за цими параметрами за умови, що оцінка параметрів здійснюється правильно. Цю ймовірність прийнято називати методичною достовірністю контролю (D_m), так як вона не залежить безпосередньо від системи контролю.

Правильність оцінки системою технічного стану ВВМ можна охарактеризувати ймовірністю правильної оцінки за умови, що параметри вибрано правильно. Цю ймовірність прийнято називати іструментальною достовірністю контролю (D_i) [123].

Таким чином, ДК визначається правильністю оцінки технічного стану ВВМ за контрольованими параметрами і правильністю оцінки технічного стану ВВМ засобами контролю за контрольованих параметрах.

Ці події є незалежними. Тому ДК можна визначити, як

$$D = D_m \cdot D_i. \quad (5.17)$$

Методична ДК дорівнює

$$D_M = 1 - \alpha_M - \beta_M, \quad (5.18)$$

де α_M – ймовірність визнати працездатним непрацездатний ОК за контрольованими параметрами, β_M – ймовірність визнати непрацездатним працездатний ОК за контрольованими параметрами.

Інструментальна ДК дорівнює

$$D_i = 1 - \alpha_i - \beta_i, \quad (5.19)$$

де α_i – ймовірність визнати працездатним непрацездатний ОК за рахунок похибки вимірювання, β_i – ймовірність визнати непрацездатним працездатний ОК за рахунок похибки вимірювання.

Отже $D = (1 - \alpha_M - \beta_M)(1 - \alpha_i - \beta_i)$.

Визначення методичної складової складової достовірності діагностування.

Всі параметри ВВМ можна поділити на три групи:

- 1) надлишкові контрольовані параметри, що не визначають технічний стан ОК
- 2) контрольовані параметри, що визначають технічний стан ОК
- 3) неконтрольовані параметри, що визначають технічний стан.

ВВМ, як об'єкт контролю, описується наступними параметрами (рис.1.3). Вказані на рис. 1.3 параметри визначають загальний технічний стан ВВМ, але, як показали дослідження, жоден з цих параметрів не дозволяє контролювати безпосередньо величину зносу робочої поверхні ПВ та БД. Таким чином, можна вважати, що методична похибка при контролі зносу робочих органів млина за аналізом ПХ відсутня.

Визначення інструментальної достовірності. Для контролю величиною зносу робочих поверхонь ПВ та БД використовується один параметр, що визначається за результатами обробки ПХ. Безпосередньо на ВВМ вимірюється зміна швидкості обертання ПЧ в момент пуску.

При визначенні (обчисленні) ДО зносу робочих поверхонь ПВ та БД можна виявити наступні події:

- 1) параметр в межах допуску (подія A), оцінюється системою контролю, як допустимий (подія B);
- 2) параметр в межах допуску (подія A), оцінюється системою контролю, як недопустимий (подія \bar{B});
- 3) параметр за межами допуску (подія \bar{A}), оцінюється системою контролю, як допустимий (подія B);
- 4) параметр за межами допуску (подія \bar{A}), оцінюється системою контролю, як недопустимий (подія \bar{B}).

Ймовірності даних подій утворюють повну групу подій, і отже

$$p(AB) + p(A\bar{B}) + p(\bar{A}B) + p(\bar{A}\bar{B}) = 1. \quad (5.20)$$

Хибний діагноз виникає у випадку подій $A\bar{B}$ та $\bar{A}B$, тоді інструментальна ДК параметру можна визначити, як

$$D_i = p(AB) + p(\bar{A}\bar{B}) = 1 - p(A\bar{B}) - p(\bar{A}B), \quad (5.21)$$

де $p(A\bar{B}) = \alpha_i$ – ймовірність виникнення помилки першого роду, $p(\bar{A}B) = \beta_i$ – ймовірність виникнення помилки другого роду.

$$\alpha = \int_a^b f(x) \left[\int_{-\infty}^{a-x} \phi(y) dy + \int_{b-x}^{\infty} \phi(y) dy \right] dx, \quad (5.22)$$

$$\beta = \int_{-\infty}^a f(x) \left[\int_{a-x}^{b-x} \phi(y) dy \right] dx + \int_b^{\infty} f(x) \left[\int_{a-x}^{b-x} \phi(y) dy \right] dx, \quad (5.23)$$

де $f(x)$ та $\phi(y)$ – щільності розподілу значень ДО та похибки його вимірювання.

$[a, b]$ – допуск на ДО.

Враховуючи, що виміряні значення швидкості обертання ПЧ розподілені за нормальним законом розподілу з параметрами $\mu=38$ об/хв і дисперсію 0.25 об/хв, а вимірювання здійснюється за допомогою енодера Autonics E40S з похибкою вимірювання $0,01\%$, яка також розподілена за нормальним законом розподілу з середнім значенням 0 та дисперсією $0,01$, можна визначити, що $\alpha=0,021$, $\beta=0,018$.

Звідси достовірність контролю $D=1-0,021-0,018=0,961$.

Визначення ДК з врахуванням помилок і збоїв. Вірогідність діагностування визначається як повна ймовірність того, що система діагностування оцінює саме той стан, в якому дійсно знаходиться ВВМ.

Слід враховувати, що при діагностуванні можуть бути два випадки вірного діагностування: позитивний D – ВВМ працездатний (ПВ та БД не зношені) та негативний \bar{D} – ВВМ непрацездатний (критичне зношення ПВ та БД ВВМ).

Ймовірності D і \bar{D} є апостеріорними ймовірностями працездатного та непрацездатного станів ВВМ.

Причинами невірної оцінки технічного стану ВВМ можуть бути:

- неповне охоплення об'єкту контролю – ПВ та БД ВВМ;
- неідеальність технічних засобів в частині їх безвідмовності з врахуванням збоїв в їх елементах;
- невірно вибрані співвідношення між допусками на діагностичні показники δ та похибками вимірювання ϵ .

Повноту діагностування можна визначити через ймовірності виявлення $q_{в.в.}$ і невиявлення $q_{н.в.}$ відмов, що пов'язані співвідношеннями

$$\begin{aligned} q_{в.в.} + q_{н.в.} &= 1 - P_0; \\ q_{в.в.} &= \sum_{i=1}^v q_i, \quad i: A(x_v); \quad q_{н.в.} = \sum_{j=1}^v q_j, \quad j: A(x_v); \\ Q_0 &= q_{в.в.} + q_{н.в.}, \end{aligned} \quad (5.24)$$

де q_i – приведена ймовірність відмови ВВМ з вини i -го елемента; $A(x_v)$ – предикат «дефект v -го елемента виявляється перевіркою вибраної сукупності ДО»; P_0 – ймовірність безвідмовної роботи ВВМ; Q_0 – ймовірність відмови ВВМ.

Згідно статистичних даних по відмовах ВВМ інтенсивність його відмов в середньому становить $\lambda_0 = 3,3 \cdot 10^{-4}$ 1/год (з розділу про оптимальний період контролю). Тоді ймовірність відмови ВВМ протягом періоду контролю (96 год) буде рівна $Q_0 = 0,031$.

Враховуючи, що даний метод призначений для виявлення поступових відмов, пов'язаних, із зносними явищами ПВ та БД ПЧ, що складає в сумі

близько 90% всіх відмов ВВМ, можна прийняти, що ймовірність виявлення відмови становитиме відповідно 90% від ймовірності відмови. Отже, ймовірність виявлення відмов становитиме $q_{\text{вв}}=0,0279$, а ймовірність невиявлення відмови – відповідно $q_{\text{нв}}=0,0031$ (згідно (5.24)).

Внаслідок різної фізичної природи і сильної залежності причин зниження достовірності від реальної структури системи діагностування доцільно виділити помилки, що виникають внаслідок скінченої безвідмовності складових елементів системи, і помилки, що виникають внаслідок похибки системи, причому в першому випадку помилки є наслідком збоїв і стійких відмов складових елементів системи діагностування, а в другому випадку визначаються законами розподілу, прийнятими допусками оцінюваних ДО і похибками її виміральної частини.

Наведені фактори мають стохастичну природу, тому кількісно оцінюються відповідними ймовірнісними характеристиками.

Під збоєм прийнято розуміти подію, яка приводить до неправильного функціонування системи, при цьому працездатність системи відновлюється без втручання ззовні. Основними причинами збоїв є внутрішні і зовнішні завади, розкид параметрів елементів принципової схеми елементів системи діагностування, а також їх вихід за межі допусків при зміні зовнішніх умов. Збої можна охарактеризувати:

– ймовірністю збою, що приводить до помилки типу «хибна відмова»: працездатний ВВМ визнається непрацездатним (при відсутності дефекту вважається, що дефект виник)

$$q_{\text{зб}}^x = \frac{N^x}{N}, \quad (5.25)$$

де N^x – кількість збоїв дослідної СД, що приводять до помилки типу «хибна відмова»;

N – загальна кількість випробувань працездатного ВВМ при значному збільшенні допусків на параметри, що перевіряються;

– ймовірністю збою, що приводить до помилки типу «невиявлена відмова»: ВВМ, що відмовив, визнається працездатним (при наявності дефекту вважається, що дефект відсутній)

$$q_{зб}^H = \frac{N^H}{N}, \quad (5.26)$$

де N^H – кількість збоїв дослідної СД, що приводять до помилки типу невиявлена відмова;

N – загальна кількість випробувань непрацездатного ВВМ при значному зменшенні допусків на параметри, що перевіряються.

При апробації системи діагностування було проведено близько 50 випробувань системи, в результаті чого була зафіксована лише одна помилка типу “хибна відмова” та дві помилки типу “невиявлена відмова”. Отже, шукані ймовірності будуть рівні $q_{зб}^X = 0,02$, та $q_{зб}^H = 0,04$.

Розглянемо можливість обліку приведених відмов, збоїв і помилок при оцінці ДК при позитивному D і негативному \bar{D} результаті контролю.

В процесі діагностування ВВМ може знаходитися в працездатному (подія A) і непрацездатному (подія \bar{A}) станах відповідно з ймовірностями P_0 і Q_0 . Стан ВВМ оцінюють технічні засоби контролю, які перед застосуванням або в процесі контролю можуть бути працездатними (подія B), або перед застосуванням чи в процесі контролю в технічному засобі може виникнути відмова (збій), що призводить до помилкової оцінки стану ВВМ (подія \bar{B}). Подія \bar{B} може виникнути разом з будь-якою з подій.

Позначимо через C і \bar{C} події, що полягають у визнанні ВВМ за результатами контролю відповідно працездатним і непрацездатним. Причому події A і C , \bar{A} і \bar{C} можуть не співпадати в силу вище наведених причин. Такий підхід дозволяє формально розділити фактори, що знижують достовірність оцінки стану ВВМ, розглянути вплив кожного з них на достовірність одержуваних від технічних засобів результатів контролю.

Тоді ймовірності D і \bar{D} можуть бути визначені по відомим з теорії ймовірності формулах Байеса:

$$D = \frac{P(A)P(C/A)}{P(A)P(C/A) + P(\bar{A})P(C/\bar{A})}; \quad (5.27)$$

$$\bar{D} = \frac{P(\bar{A})P(\bar{C}/\bar{A})}{P(\bar{A})P(\bar{C}/\bar{A}) + P(A)P(\bar{C}/A)}, \quad (5.28)$$

де $P(A)$ і $P(\bar{A})$ - безумовні ймовірності подій A і \bar{A} відповідно; $P(C/A)$, $P(C/\bar{A})$, $P(\bar{C}/A)$, $P(\bar{C}/\bar{A})$ - умовні ймовірності відповідних подій.

Для визначення умовних ймовірностей врахуємо, що події C і \bar{C} можуть з'явитися з однією з наступних попарно несумісних подій, що утворюють повну групу:

H_1 – достовірні події A і B ;

H_2 – достовірні події A і \bar{B} ;

H_3 – достовірні події \bar{A} і B ;

H_4 – достовірні події \bar{A} і \bar{B} .

Тоді шукані умовні ймовірності гіпотез можуть бути визначені за допомогою виразів:

$$P(C/A) = P(C/H_1) + P(C/H_2) = P(C_1) + P(C_2); \quad (5.29)$$

$$P(C/\bar{A}) = P(C/H_3) + P(C/H_4) = P(C_3) + P(C_4); \quad (5.30)$$

$$P(\bar{C}/A) = P(\bar{C}/H_1) + P(\bar{C}/H_2) = P(\bar{C}_2); \quad (5.31)$$

$$P(\bar{C}/\bar{A}) = P(\bar{C}/H_3) + P(\bar{C}/H_4) = P(\bar{C}_3) + P(\bar{C}_4). \quad (5.32)$$

Внаслідок того, що події \bar{C} і H_1 несумісні і $P(\bar{C}/H_1) = 0$, то у вираз (5.31) входить лише один доданок.

Для обчислення умовних ймовірностей, що входять у вирази (5.29)...(5.31), розглянемо модель формування діагнозу у вигляді ймовірнісного орієнтованого графа (рис.5.12). Вершини в графі відповідають стану ВВМ, технічні засоби і системи в цілому, а вітки характеризуються ймовірностями перебування елементів у вказаних станах.

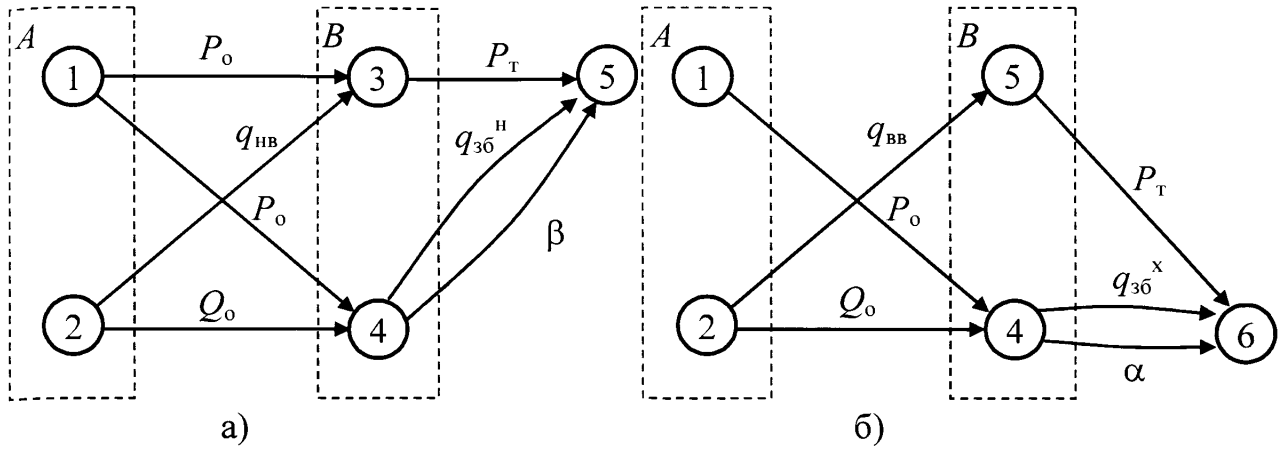


Рис. 5.12 Модель формування правильного діагнозу: а) при позитивному результаті, б) при негативному результаті

По ймовірнісному графу визначаємо умовні ймовірності:

$$P(C / A) = P_o P_T + P_o q_{36}^H;$$

$$P(C / \bar{A}) = Q_o q_{36}^H + Q_o \beta;$$

$$P(\bar{C} / A) = P_o q_{36}^x + P_o \alpha;$$

$$P(\bar{C} / \bar{A}) = q_{B,B} P_T + Q_o q_{36}^x.$$

Використовуючи вирази (5.27) та (5.28), з врахуванням одержаного знаходимо:

$$D = \frac{P_o^2 (P_T + q_{36}^H)}{P_o^2 (P_T + q_{36}^H) + Q_o [q_{H,B} P_T + Q_o (q_{36}^H + \beta)]}; \quad (5.33)$$

$$\bar{D} = \frac{Q_o [P_T q_{B,B} + Q_o q_{36}^H]}{Q_o [P_T q_{B,B} + Q_o q_{36}^x] + P_o^2 (q_{36}^x + \alpha)}. \quad (5.34)$$

Підставляючи в вирази (5.33) та (5.34) значення окремих складових, отримаємо, що на протязі періоду діагностування:

$D=0,999$, при фактичній ймовірності знаходження ВВМ в працездатному стані 0,969;

$\bar{D}=0,023$ при фактичній ймовірності знаходження ВВМ в непрацездатному стані 0,031.

Таким чином, можна прийняти, що в цілому ДК процесів зносу становить приблизно 90%.

5.7 Результати промислової апробації розроблених методів контролю технічного стану робочих органів ВВМ.

За результатами проведеного аналізу, окрім розробленого вібраційного методу, серед виявлених діагностичних ознак технічного стану робочих органів ВВМ – помольних валків і бігової доріжки для подальшої промислової апробації було вибрано наступні: за результатами параметричній ідентифікації ВВМ за перехідною характеристикою - параметр $Tr3$ моделі P3DZU та полюс моделі авторегресії P , а за результатами непараметричної ідентифікації – амплітуди спектральних складових на частоті 12 Гц – A_{f12} і 25 Гц - A_{f25} .

Апробація проводилася на вертикальному валковому млині типу типу MPS-180 ВК відповідно до розробленої, згідно договору з ВАТ «Івано-Франківськцемент» за № 13/2009 «Розроблення методики діагностування технічного стану вертикального валкового млина PFEIFFER AG-MPS 180BK», методикою. Методика передбачала:

- після проведення наплавлення зношених поверхонь робочих органів проводити періодичне зняття перехідних характеристик за допомогою розробленої мікроконтролерної системи діагностування з подальшим розрахунком значень вибраних діагностичних ознак в середовищі Matlab у пакеті System Identification Toolbox;
- проведення запису вібраційного процесу в діапазоні частот 40 – 120 Гц, його аналіз з подальшим розрахунком масової величини зносу робочих органів відповідно до розробленого в розд. 4.2 алгоритму вібродіагностування робочих органів ВВМ, який реалізується розробленою мікроконтролерною системою;
- періодичне вимірювання величини зносу робочих органів за стандартною методикою до моменту зупинки ВВМ для проведення наплавлення поверхонь робочих органів.

Апробація проводилася протягом шести місяців з 22 квітня по 09 вересня 2010 року. Перехідні характеристики знімалися за допомогою розробленої системи шляхом зупинки ВВМ з подальшим його пуском, після чого проводилося також отримання експериментальних даних для подальшого

розрахунку масового зносу робочих органів за їх вібраційними характеристиками.

Так, для прикладу на рис.5. 13 наведено загальний вигляд вхідного сигналу в часі.

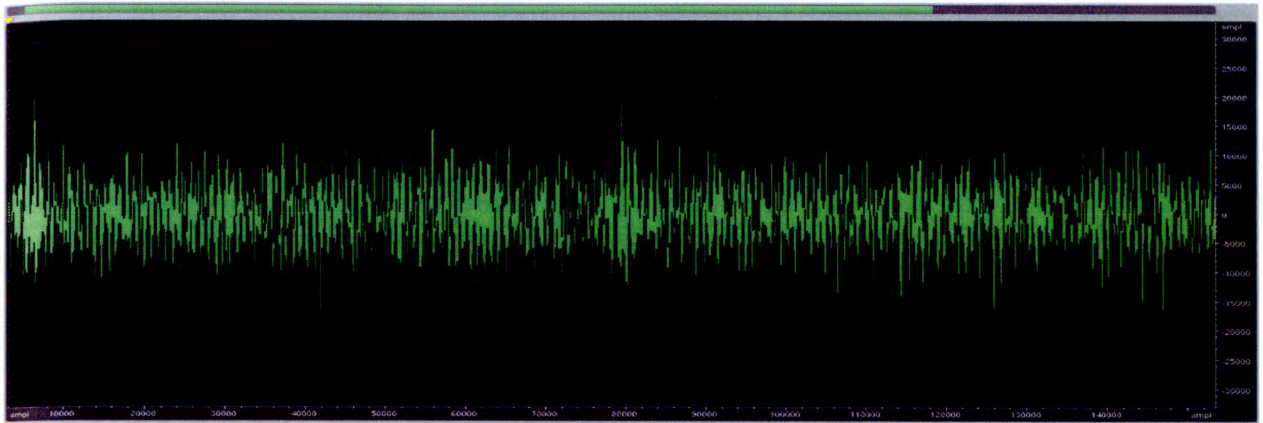


Рис. 5.13 Вигляд сигналу, що надходить на вхід мікроконтролерної системи діагностування

Загальний спектральний вигляд вхідного сигналу в часі, наведений на рис.5.14. Тут кольором позначена інтенсивність спектральних складових (світлий колір відповідає значній інтенсивності, темний – слабким спектральним складовим). В напрямку осі абсцис відкладений час, в напрямку осі ординат – частота.

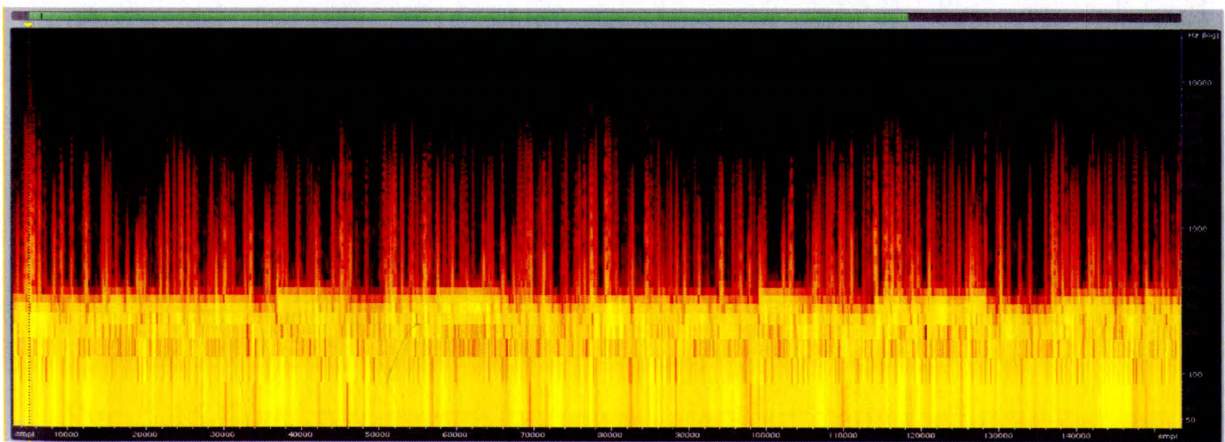


Рис. 5.14 Спектральний вигляд сигналу, що надходить на вхід мікроконтролерної системи діагностування

Детальний спектр робочого сигналу на вході системи діагностування має наступний вигляд (див.рис.5.15):

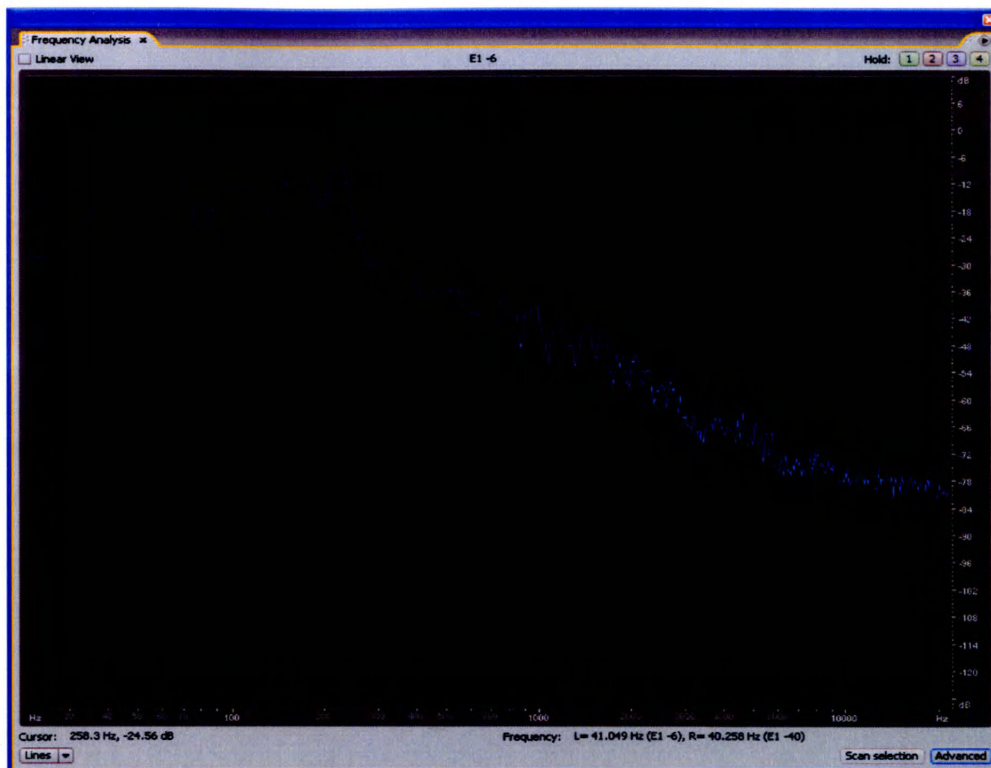


Рис. 5.15 Детальний спектр вхідного сигналу в логарифмічному масштабі

Після проходження аналогового фільтра в системі діагностування робочий сигнал набуває вигляду (див. рис.5.16):

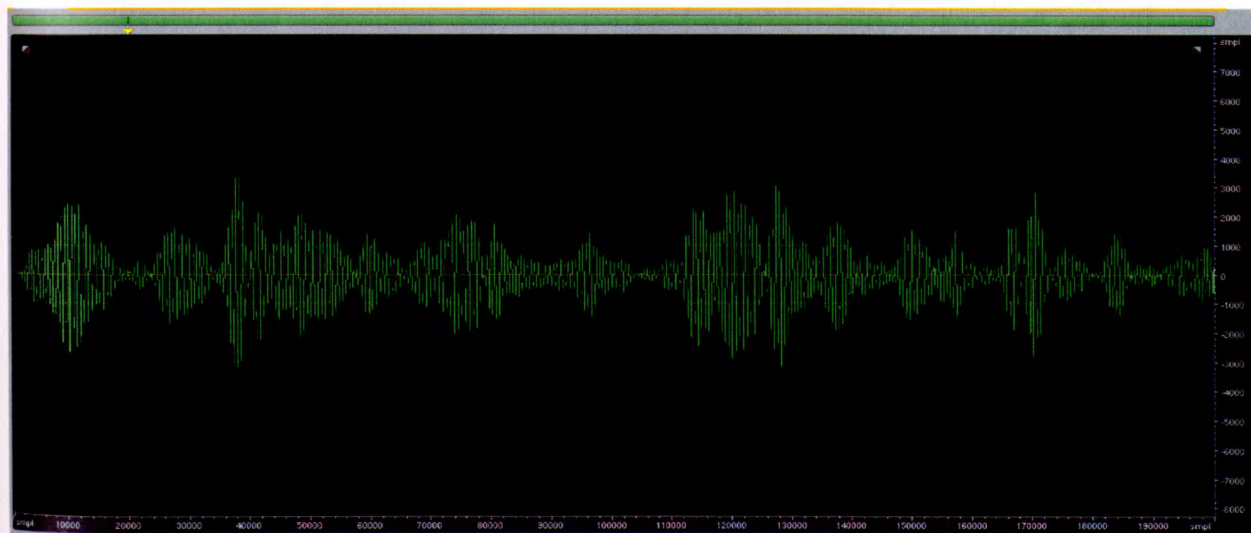


Рис. 5.16 Відфільтрований системою діагностування вхідний сигнал

Спектр отриманого відфільтрованого вхідного сигналу наведено на рис. 5.17.

Далі проводилась реалізація алгоритму визначення вагової величини зносу робочих поверхонь з використанням розробленої мікроконтролерної системи

діагностування. За отриманими через визначений період контролю, який в середньому складав один тиждень, даними будувався графік (рис. 5.18).

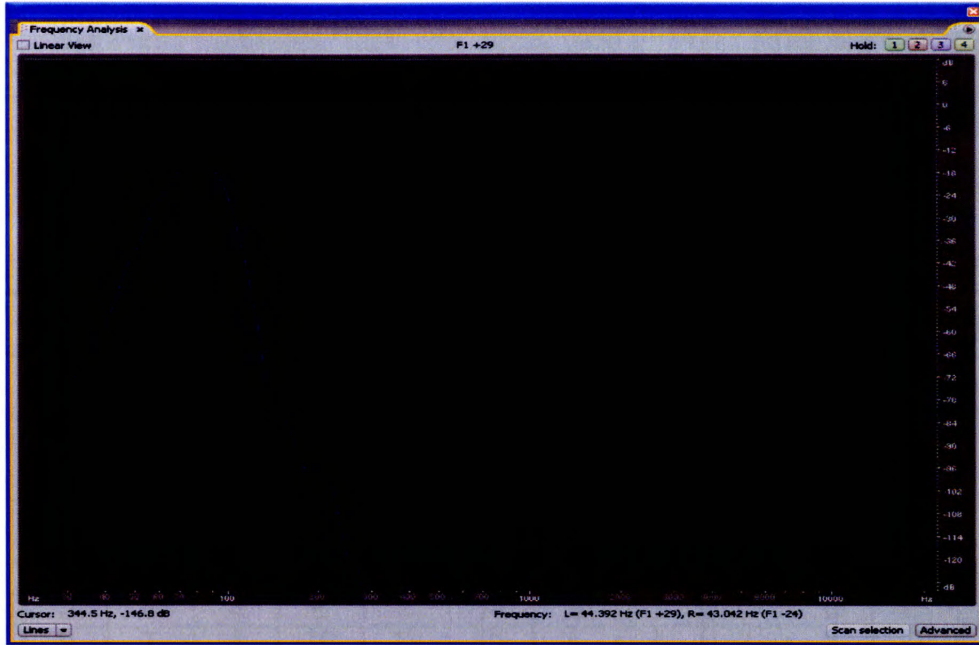


Рис. 5.17 Спектр фільтрованого сигналу в логарифмічному масштабі

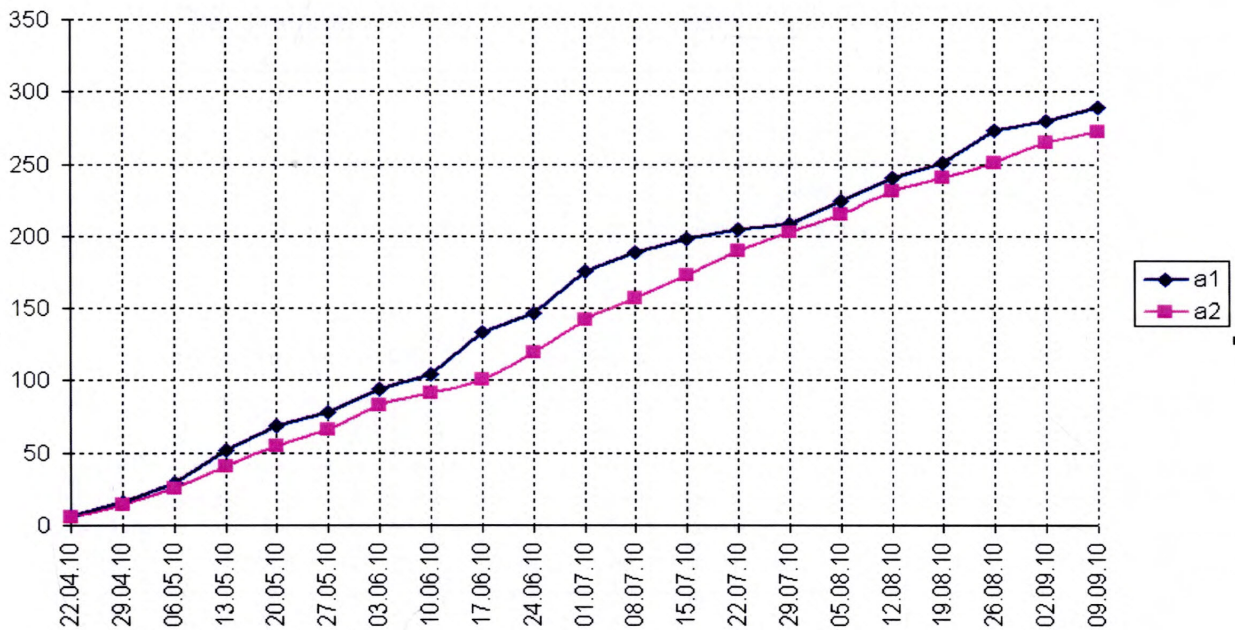


Рис. 5.18 Порівняльний аналіз масового зносу робочих поверхонь ВВМ:

a1- результати вимірювання за допомогою розробленої системи;

a2-результати вимірювань величини зносу за стандартною методикою

На цьому ж рис. 5.18, a2 наведено графік зміни величини зносу робочих органів ВВМ, отриманих за стандартною методикою (табл. 5.3) з врахуванням поправочних коефіцієнтів для визначення його масового величини.

Таблиця 5.3

Результати зношення валків і бігової доріжки помольної чаші ВВМ

Дата	Величина зношення "заднього" валка (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
20.04.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка валка
08.06.10	0	0	0	5	10	8	6	4	4	0	0	
02.07.10	0	0	3	8	19	13	8	9	6	3	0	
30.07.10	0	2	4	9	23	14	9	9	7	4	1	
01.09.10	0	4	5	11	25	16	11	10	8	8	3	
16.09.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка валка
Дата	Величина зношення "правого" валка (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
20.04.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка валка
08.06.10	0	0	0	6	5	5	2	2	0	0	0	
02.07.10	0	6	4	6	8	14	6	3	0	0	0	
30.07.10	0	1	4	10	19	15	6	4	2	0	0	
01.09.10	0	3	5	12	21	19	11	8	6	3	0	
16.09.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка валка
Дата	Величина зношення "лівого" валка (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
20.04.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка валка
08.06.10	0	0	0	5	10	0	6	3	3	2	0	
02.07.10	0	2	4	5	16	2	8	4	3	4	0	
30.07.10	1	4	5	10	24	12	13	6	6	4	0	
01.09.10	2	6	5	12	25	14	17	8	7	5	0	
16.09.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка валка
Дата	Величина зношення бігової доріжки помольної чаші (мм) в точках вимірювання											Примітка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
20.04.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка
08.06.10	0	2	6	9	10	8	0	3	0	0	0	
02.07.10	0	2	6	9	12	9	0	6	6	0	0	
30.07.10	0	5	7	14	17	12	6	7	6	2	0	
01.09.10	0	6	7	15	20	16	9	10	8	4	0	
16.09.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	наплавка

Як видно з отриманих графіків, отримані значення масової величини зносу за розробленим методом відповідають характеру зміни його фактичних значень.

На рис. 5.19-5.22 наведені графіки зміни вибраних діагностичних ознак технічного стану ВВМ від періоду експлуатації його (апробації).

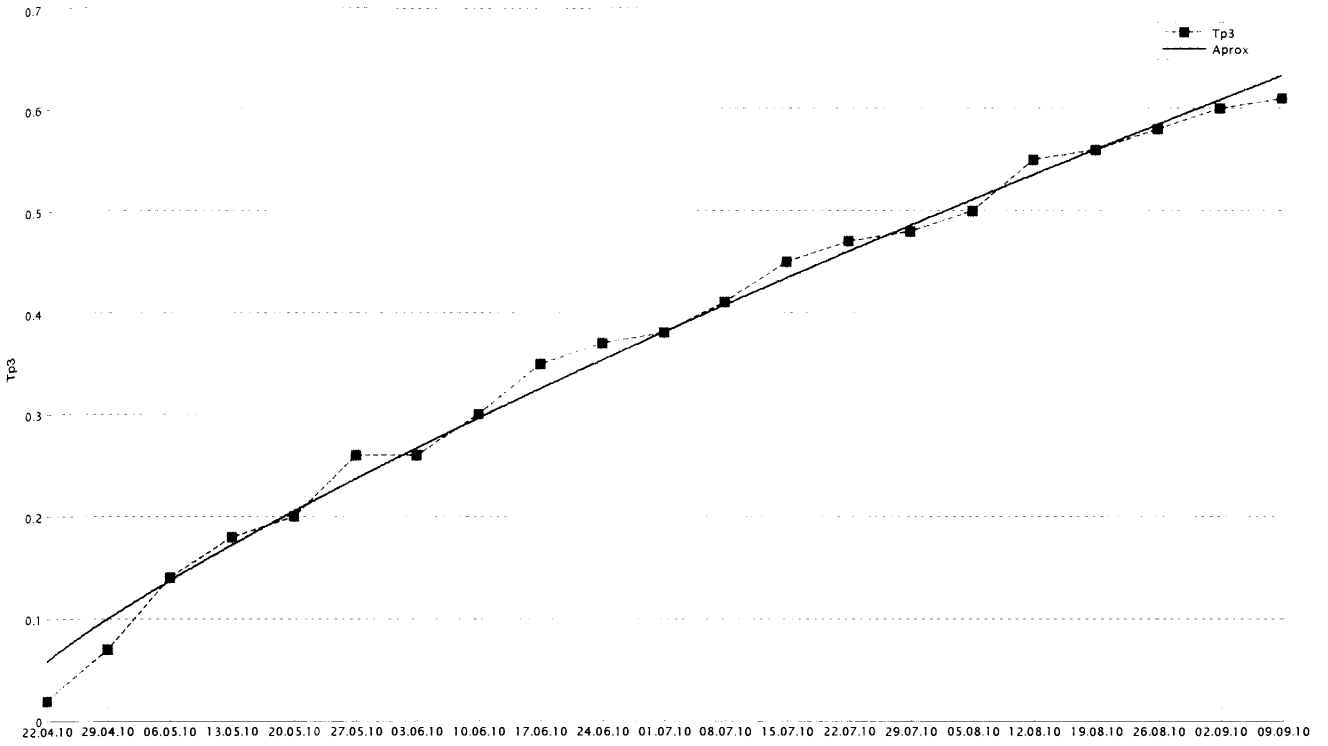


Рис. 5.19 Графіки зміни діагностичної ознаки $Tr3$ від терміну експлуатації ВВМ T

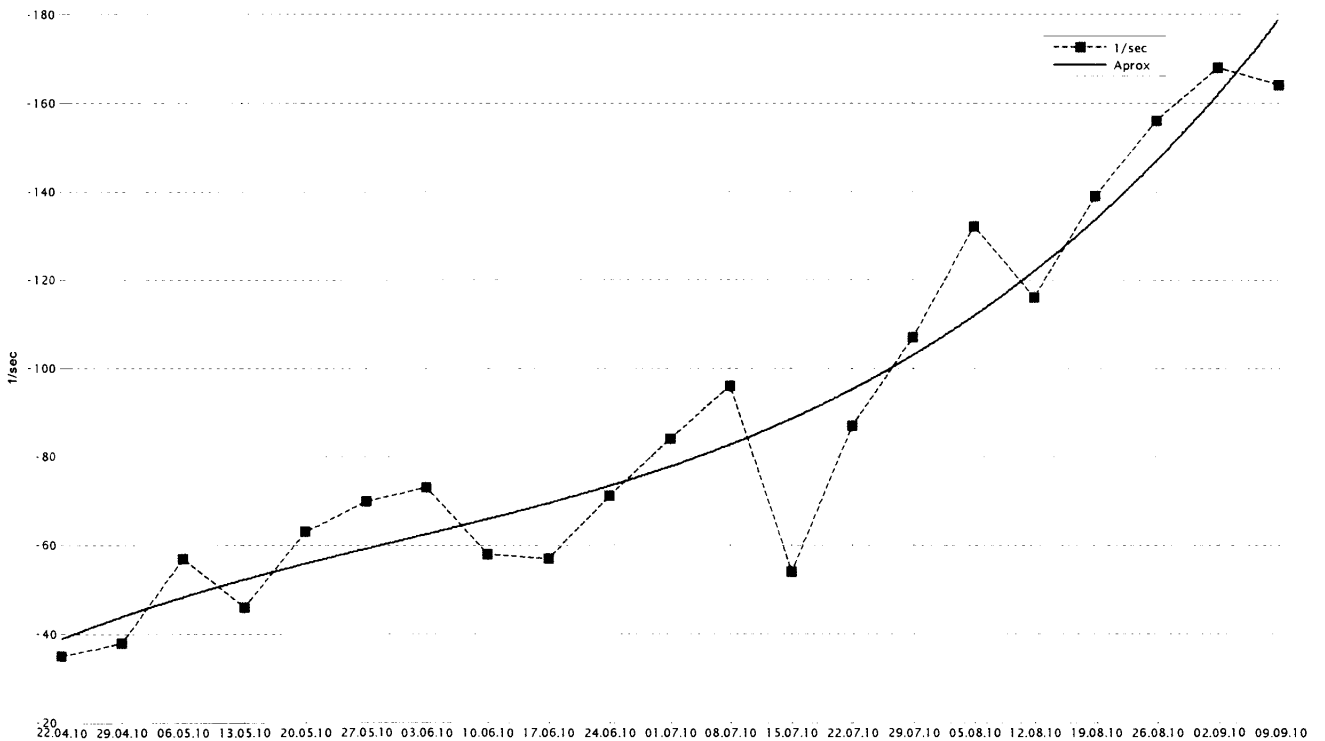


Рис. 5.20 Графік зміни діагностичної ознаки I від терміну експлуатації ВВМ T

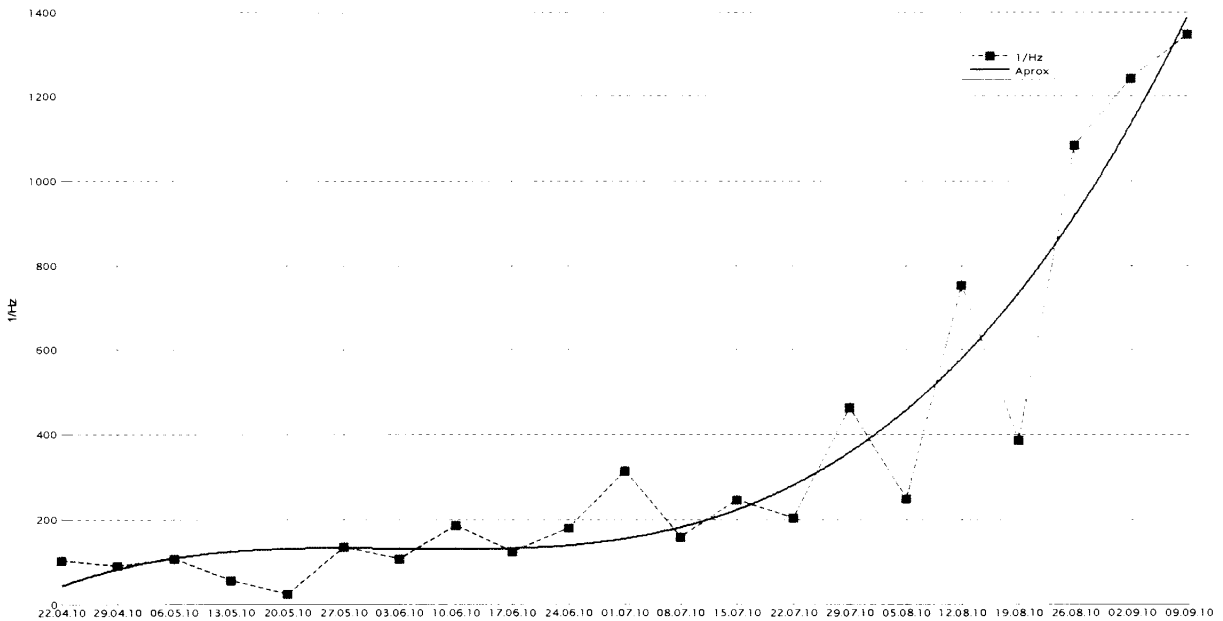


Рис. 5.21 Графіки зміни діагностичних ознак на частоті A_{f12} Гц від терміну експлуатації ВВМ T

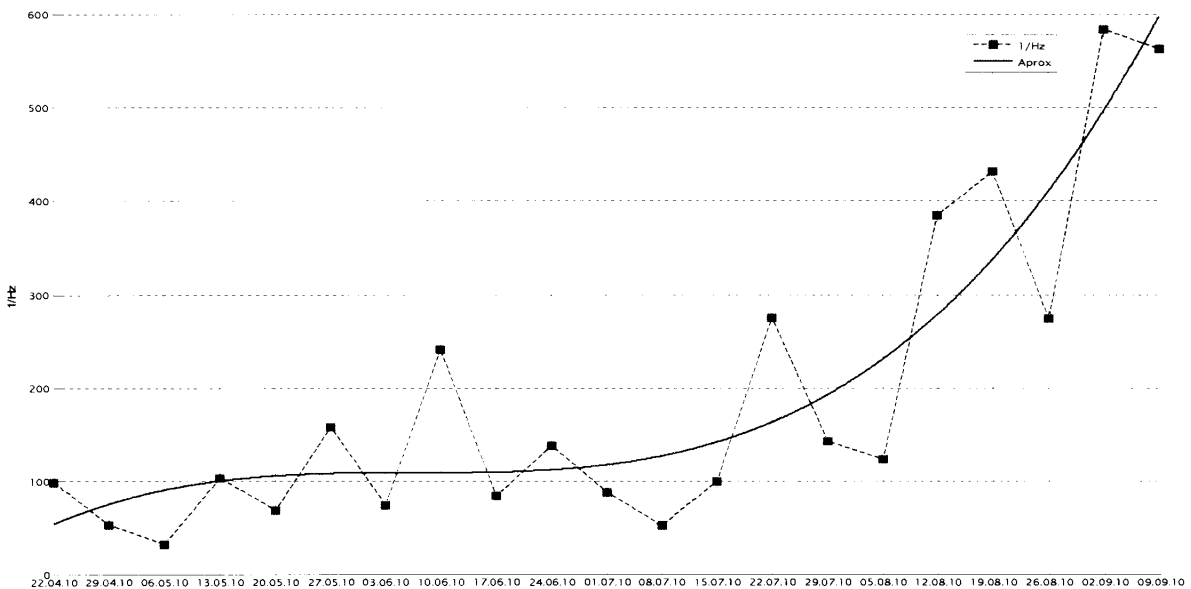


Рис. 5.22 Графіки зміни діагностичних ознак на частоті A_{f25} Гц від терміну експлуатації ВВМ T

Як видно з графіків (рис.5.19-5.22) тенденція зміни діагностичних ознак відповідає зміні величини зносу робочих органів ВВМ. Для визначення умов працездатності розроблених методів контролю технічного стану ВВМ за вибраними діагностичними ознаками та функцій їх чутливості необхідно знати граничні значення вибраних діагностичних ознак, за якими можна буде прогнозувати зупинку ВВМ. Встановлення граничних значень діагностичних ознак вимагає значної кількості експериментального матеріалу, база якого

постійно поповнюється. Результати проведеної апробації розроблених методів доказали їх ефективність, в результаті чого вони були прийняті до подальшого впровадження (Додаток Д). Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін "Основи теорії надійності і технічної діагностики систем", "Методи і засоби діагностування об'єктів нафтогазового комплексу", "Проектування систем діагностування", які читаються для студентів спеціальності 7.091401 – "Системи управління і автоматики" (додаток Є).

Висновки до розділу 5

1. З використанням методів схемо – і системотехніки були розроблені:

- структурна схема мікроконтролерної системи діагностування з використанням новітньої елементної бази;

- на основі визначеної, за результатами проведених аналітичних досліджень, інформативної полоси спектра частот, була синтезована принципова схема фільтра з використанням системи проектування електронних схем MicroCAP ;

- програмне забезпечення мікроконтролерної системи діагностування з використанням стандартної Cі-бібліотеки, та спеціалізованої AVR-бібліотеки, що входять до складу CodeVision;

- підсилювач до віброакустичного давача системи діагностування на основі низькошумливого спеціалізованого інструментального підсилювача INA163 фірми Burr-Brown/Texas Instriments (США)

2. Проведено розрахунок похибки розробленої системи діагностування з використанням методів теорії ймовірності і математичної статистики, яка склала 1.811%.

3. На основі запропонованої процедури визначення оптимального періоду контролю технічного стану отримана залежність показника готовності від періоду контролю, за якою при значенні показника готовності 0.96 досягається при періоді діагностування 96 год (4 доби).

ВИСНОВКИ

У дисертації подано нове рішення науково-технічної задачі, яке полягає в розробленні методів і засобів оперативного контролю технічного стану робочих органів вертикальних валкових млинів, що сприяють забезпеченню надійності їх роботи, підвищенню ефективності процесу помолу вугілля та якості вихідного продукту - пилевугільної суміші.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Проведений аналіз відомих методів контролю і діагностування технічного стану млинів різних конструкцій, стосовно використання їх для ВВМ, показав відсутність такої можливості, що обумовлено конструктивними особливостями, які визначають неконтролепридатність ВВМ. Обґрунтована можливість використання методів параметричної і віброакустичної діагностики, а також методів ідентифікації об'єктів для вирішення поставлених в роботі задач.

2. Досліджена природа руйнування вугілля у ВВМ і виникаючих при цьому процесів зношування поверхні його робочих органів, яка обумовлюється також діючими на ВВМ факторами впливу, та отримані емпіричні залежності, що покладені в основу розробки методів контролю його технічного стану.

3. Розроблена узагальнена діагностична модель ВВМ та досліджені статистичні характеристики діючих на нього параметрів та показників, як процесу помолу вугілля, так і технічного стану ВВМ, що дозволило відібрати з них найбільш інформативні, які можна використати за ДО його технічного стану.

4. Розроблено методичне, технічне та програмне забезпечення досліджень, яке дозволило провести комплекс експериментів, проаналізувати отримані дані та скорегувати процедуру проведення подальших експериментальних досліджень в напрямку зменшення їх кількості.

5. Обґрунтовані теоретичні передумови і запропоновано практичний алгоритм реалізації методу контролю технічного стану поверхонь робочих органів ВВМ на основі вимірювання та аналізу вібраційних характеристик процесу помолу вугілля. Встановлено, що за питомою кількістю віброударів,

виміряних під час помолу кусків вугілля значного розміру, можна обчислити питому їх кількість, сигнали від яких не фіксуються давачами через мале співвідношення «сигнал/шум», а також визначити кількість металу, зруйнованого в процесі помолу.

6. З використанням методів параметричної ідентифікації (метод кратних коренів, метод Симою, модель P3DZU та модель авторегресії) визначені ДО технічного стану ВВМ за ПХ та уточненою ПХ, за результатами аналізу яких обґрунтована подальша доцільність використання параметра $Tp3$ – постійної часу функції передачі коливної ланки моделі P3DZU та полюса моделі авторегресії за ДО при розробці методів контролю технічного стану робочих органів ВВМ.

7. Обґрунтована можливість використання методів непараметричної діагностики для контролю технічного стану робочих органів ВВМ за його ПХ шляхом визначення потужності спектру її встановленого значення методом Уелча, та вибрані ДО - амплітуди спектру на частоті 12 Гц і 25 Гц, зростання яких вказує на збільшення величини зносу робочих органів ВВМ.

8. Розроблена мікропроцесорна система діагностування стану робочих органів ВВМ (спроєктовані і розроблені принципові електричні схеми блоків) та її прикладне програмне забезпечення, проведено розрахунок похибки системи і розроблена процедура визначення періоду контролю технічного стану робочих органів ВВМ, який при значенні показника готовності 0.96 становить 4 доби, а також проведена апробація і впровадження розроблених методів і мікропроцесорної системи на ВАТ «Івано-Франківськцемент».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Текст] : ДСТУ 2860-94. – Київ. Держстандарт України, 1995. – 92 с.
2. Скрипюк Р. Вибір діагностичних ознак стану вертикального валкового млина [Текст] / Ростислав Скрипюк // Наукові вісті інституту менеджменту і економіки «Галицька академія». – 2005. – № 2(8). – С. 128-132.
3. Шевченко А.Ф. Пути интенсификации помола цемента. [Текст] / А.Ф. Шевченко, А.А. Салей, А.А. Сигунов, Н.П. Пескова // Вопросы химии и химической технологии. – 2008. – №5. – С. 129-137.
4. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы [Текст] : [учебное пособие] / В.Я. Борщев ; Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та. – Тамбов, 2004. – 75с.
5. Дамдинова Д.Р. Машины и оборудование для измельчения и сортировки строительных материалов [Текст] : [учебное пособие] / Д.Р. Дамдинова, В.Г. Дондуков ; Издательство ВСГТУ. – Улан-Удэ, – 2004. – 104 с.
6. Волков А.Б. Валковые мельницы МВС для размольных установок систем вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) доменных печей [Электронный ресурс] : www.tyazhmash.com/lib/mvs.shtml.
7. Угольная мельница АТОХ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.flsmidth.com>.
8. Райхардт Йорк Использование вертикальных валковых мельниц MPS при помоле угля / Йорк Райхардт // "Цементная промышленность перспективы развития" (UkrCemFor 2007) : Межд. конф., 14-15 февраля 2007г. : докл. – Яремча 2007. – С. 21-28.
9. Валковые мельницы LOESCHE [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=6664.
10. Злобін І. Вертикальні валкові млини фірми „Loesche GmbH” / Ігор Злобін // "Цементная промышленность перспективы развития" (UkrCemFor 2007) : Межд. конф., 14-15 февраля 2007г. : докл. – Яремча 2007. – С. 179–186.

11. Вертикальная мельница LM. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mill.kz/mill/lm-mill.html>.
12. Вальтер Т. Вертикальний тарілчато-шаровий млин EM для помолу вугілля / Телле Вальтер // "Цементная промышленность перспективы развития" (UkrCemFor 2007) : Межд. конф., 14-15 февраля 2007г. : докл. – Яремча 2007. – С. 45–52.
13. Вертикальная валковая мельница ОК. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.flsmidth.com///~/media/Brochures/Brochures%20in%20RUSSIAN/OKVerticalMillRussian.ashx>.
14. Валковые мельницы POLYSIUS для гранулирования шлаков (часть 1). [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=3225.
15. Компетентность в цементной промышленности [Електронний ресурс] // Каталог продукции фирмы SEBR, PFEIFFER AG . – Режим доступу : <http://www.gpag.com>.
16. VIBROCONTROL 1000 Monitoring Unit [Електронний ресурс] // Каталог продукции фирмы Schenck. – Режим доступу : http://www.schenck.es/admin/productos/archivos_productos/vc1000.pdf.
17. Заміховський Л.М. Дослідження зношення робочих органів вертикального валкового млина MPS 180 ВК [Текст] / Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрипюк // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2008. – №72 С. 34-39.
18. Скрипюк Р.Б. Аналіз факторів, що обумовлюють стан вертикального валкового млина як об'єкта контролю [Текст] / Р.Б. Скрипюк // Наукові вісті інституту менеджменту і економіки «Галицька академія». – Івано-Франківськ. – 2007. – Вип. 2(10). – С. 4–8.
19. Скрипюк Р.Б. Дослідження інформативних параметрів контролю стану вертикального валкового млина / Р.Б. Скрипюк // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2008»: Матеріали 4-ої міжнар. молодіжної

наук.-техн. конф., 21-25 квітня 2008 р. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2008. – С. 216.

20. Скрипюк Р.Б. Статистичні характеристики діагностичних параметрів технічного стану вертикальних валкових млинів [Текст] / Р.Б. Скрипюк // Методи і засоби діагностики в техніці і соціумі МіЗД ТС -2009 : XXVI Міжн. міжвуз. школа-семінар, 8 - 12 жовтня 2007 року: реф. зб. наук. праць, вип. XXVI (I). – Івано-Франківськ, 2007. – С. 6.

21. Технология ремонта сваркой трещин на толстостенных и крупногабаритных конструкциях из трудно- или ограниченно свариваемых сталей без предварительного подогрева и последующего отпуска. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.castolin.spb.ru.

22. Данилов В.К. Инженерная механика: основы расчета на прочность. - Л., 1984. – 342 с.

23. Вибрация и шум электрических машин [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / Н.В. Астахов, В.С.Малышев, В.Т. Медведев [и др.] ; под ред. В.Я. Баскалова; Моск. энерг. ин-т, – М., 1984. – 84 с.

24. Вибрация электрических машин [Текст] / [Науч. Ред. В.А.Безрученко]. – М. 1990. – (Обзор. инф. / ВИНТИ; Итоги науки и техники. Сер. «Электрические машины и транспорт»). - Т.8 – 148 с.

25. Вибрация энергетических машин [Текст] : [Справочное пособие] – Л., 1974. – 464 с.

26. Борьба с шумом на производстве [Текст] : справочник / [Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др.] ; под общ. ред. Е.Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.

27. Вибрация и шум электрических машин малой мощности [Текст] / [Л.К. Волков, Р.Н. Ковалев, Г.Н. Никифоров и др.] . – Л.: Энергия, 1974.– 202 с.

28. Заміховський Л.М. Основи теорії надійності і технічної діагностики систем [Текст] : навч. посіб. / Л.М. Заміховський, В.П. Калявін. – Івано-Франківськ: “Полум’я”, 2004. – 360 с.

29. Датчик для измерения температуры однородных и изогнутых поверхностей в промышленности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа :

www.elfaelectronics.com.ua/cgi-bin/index.cgi?ec=22a9b14c.

30. Система измерения температуры СИТ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.omsketalon.ru/?action=sit.

31. Офіційний сайт фірми National Instruments [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.ni.com/russia.

32 Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е.П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. - 480 с.

33. Заміховський Л.М. Сучасний стан методів і технічних засобів контролю крутного моменту на валу занурювальних двигунів [Текст] / Л.М. Заміховський, П.П. Гринів, В.Г. Панчук. – Івано – Франк. ін-т нафти і газу. – Івано–Франківськ, 1993. – 17 с.– Рук. деп. в ДНТБ України 10.10.93, №2274 – Ук 93.

34. Чигур І.І. Аналіз методів контролю моменту на валі механізмів з електричним приводом [Текст] / І.І. Чигур, Р.М. Лещій // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – 1999. № 36(8). – С. 177-186.

35. Аппаратура для косвенных методов контроля момента и мощности механизмов при бурении и добычи [Текст] // ТНТО: Автоматиз. и телемеханиз. нефт. пром. – М., ВНИИОЭНГ, 1976.– С. 52.

36. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов [Текст] / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

37. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов [Текст] / Б.В. Павлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.

38. International Organization for Standartization. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.iso.org/>.

39. Mechanical vibration. Evolution of machine vibration by measurements on non- rotating parts. Part 1-5 (ISO 10816).

40. Mechanical vibration of non-reciprocating machines. Measurements on rotating shafts and evolution criteria. Part 1-5 (ISO 7919).

41. Гольдин А.С. К вопросу о нормах и принципах нормирования вибрации вращающихся машин [Текст] / А.С. Гольдин // Контроль. Диагностика. – 2000. – №4. – С. 3 – 10.

42. Попков В.И. Виброакустическая диагностика в судостроении [Текст] / В.И. Попков, Э.Л. Мышинский, О.И. Попов. – Л.: Судостроение, 1983. – 256 с.

43. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования [Текст] / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – Москва, 1996. – 276 с.

44. Замиховский Л.М. Техническая диагностика погружных электроустановок для добычи нефти [Текст] / Л.М. Замиховский, В.П. Калявин. – Снятин: фирма Прут-Принт, 1999. – 224 с.

45. Замиховський Л.М. Діагностика технічного стану штангових глибинно-насосних установок [Текст] / Л.М. Замиховський, О.В. Євчук, В.А. Ровінський. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2006. – 308 с.

46. Баркова Н.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин [Электронный ресурс] / Н.А. Баркова. – Режим доступа : <http://vibrotek.com/russian/articles/sovrstost/index.htm>.

47. Стеценко А.А. Системы мониторинга и диагностики машин [Электронный ресурс] / А.А. Стеценко., О.И. Бедрий, Е.А. Долгов. – Режим доступа : http://www.vibration.ru/sys_mon.shtml.

48. Новицкий И.В. Разработка автоматических устройств технологической диагностики для оптимального управления барабанными мельницами самоизмельчения руд. Автореферат на соиск. уч.ст.к.т.н.- Днепропетровск.- 1984.-20 с.

49. Скрипова Н.М. Шумовые и вибрационные характеристики дробильно-размольного оборудования. Диагностика узлов дробильных мельниц. Горное оборудование.-Изд-во «Новые технологии».- 2007.- с.37-44.

50. Хайсам К А Шамаллах Метод диагностики перегрузки шаровых мельниц рудой на основе закономерностей формирования звукометрического сигнала объектов.// Наук. вісник НГУ. – 2004. – № 2. – С.77 – 78.

51. Чимде А. Г. Вибрационное проектирование и диагностирование дисковых мельниц. Автореферат на соиск. уч. ст. к. т. н. – Екатеринбург. – 2004. – 20 с.
52. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
53. Гроп Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гроп. – М.: Мир, 1979. – 203 с.
54. Ципкин Я.З. Основы информационной теории идентификации [Текст] / Я.З. Ципкин – М.: Наука, 1984. – 320 с.
55. Zwingelstein Gilles Panorama des methodes d'identification de processus / Gilles Zwingelstein // Le Nouvel Automatisme. 1989. – № 49.
56. Льюнг Л. Идентификация систем [Текст] / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
57. Дьяконов В. MatLab. Анализ, идентификация и моделирование систем [Текст] : специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. СПб.: Питер, 2002. – 448 с.
58. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст] : [учебное пособие] / С.Г. Герман-Галкин. СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
59. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – 1-е издание, 2007. – 288 с.
60. Горелик А.Л. Методы технической диагностики машин и механизмов [Текст] / А.Л. Горелик, Ф.Я. Балицкий, А.Н. Требунский. – М.: НТЦ «Информтехника», ДСП. – 1990. – 205 с.
61. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования [Текст] : учеб. пособ. для вузов гражд. авиации / под. ред. И.М. Сендеева; – М.: Транспорт, 1984. – 190 с.
62. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения сыпучих материалов [Текст] / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.

63. Науково-технічна проектна документація [Текст] : Вуглефікація цементного виробництва. - 2001.- 1025с.
64. Пономарев С.Д. Расчет на прочность в машиностроении [Текст] / С.Д. Пономарев. – Ч.2. – М.: Машгиз, 1958 – 460 с.
65. Исаков В.С. Определение мощности привода щековой дробилки индифферентной структуры [Текст] / В.С. Исаков, Е.Н. Скляр, А.Н. Шевелев, В.Б. Балашов // Материалы 51-й науч.-техн. конф. ЮРГТУ (НПИ) / Юж.-Рос.техн. ун-т. – Новочеркасск: УПЦ "Набла" ЮРГТУ (НПИ), 2003. – С. 165-16.
66. Скрип'юк Р.Б. Дослідження алгоритму діагностування зношування робочих органів вертикального валкового млина MPS 180BK [Текст] / Р.Б. Скрип'юк // Сучасні прилади, матеріали і технол. для неруйнівного контролю і техн. діагностики машинобуд. і нафтопромисл. обладнання: V Міжнар. наук.-техн. конференція, 2-5 грудня 2008 р.: Зб. тез доповідей. – Івано-Франківськ, 2008. – С. 117-119.
67. Заміховський Л.М. Дослідження взаємодії кусків вугілля різної форми з помольною чашею в процесі їх руйнування у вертикальному валковому млині [Текст] / Л.М.Заміховський, Р.Б. Скрип'юк // Наукові вісті Галицької академії. – 2009. – № 2 (16). – С. 8 – 15.
68. Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы [Текст] / Л.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.
69. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] : Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К.: Наукова думка, 1975.- 704 с.
70. Заміховський Л.М. Аналітичні дослідження процесу початкового завантаження вугілля у помольну чашу млина AG MPS 180 BK та його руйнування [Текст] / Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрип'юк // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2010. – № 76. – С. .
71. Искрицкий Д.Е. Строительная механика элементов машин [Текст] / Д.Е. Искрицкий. – Л.: Судостроение, 1970. – 448 с.
72. Скрип'юк Р.Б. Дослідження взаємного руху валків та помольної чаші млина AG-MPS 180BK в процесі їх зношування [Текст] / Р.Б. Скрип'юк // Методи і засоби діагностики в техніці і соціумі МіЗД ТС -2009 : XXVI Міжн.

міжвуз. школа-семінар, 5-9 жовтня 2009 року : реф. зб. наук. праць, вип. XXVI (II). – Івано-Франківськ, 2009. – С. 8.

73. Справочник по триботехнике [Текст] : [Под ред. М. Хебда, А.В. Чичинадзе.] - М.: Машиностроение, 1989.- Т.1 – 1989. – 81 с.

74. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971

75. Пустыльник Е.Н. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. –283 с.

76. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971

77. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969.

78. Кирьянов Д. Самоучитель Mathcad 13. – С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2006. – 528 с.

79. Васильев А. Книга Mathcad 13 на примерах. – С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2007. – 528 с.

80. Hinton P.R. SPSS Explained – Routledge, 2004. – 352 p.

81. Заміховський Л.М., Скрипюк Р.Б. Інформаційні показники процесу помолу вугілля у вертикальному валковому млині. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008 – Вип. 2/2(32). - С.54-58.

82. Лукас В.А. Теория автоматического управления.- М.: Недра, 1990. – 416 с.

83. Сю Ф., Мейер А. Современная теория управления и ее применение.– М.: Машиностроение, 1972.–121 с.

84. Замиховский Л.М., Скрыпюк Р.Б. Статистические характеристики показателей, характеризующих тонкость помола угля в вертикальной валковой мельнице// Методы и средства технической диагностики: Сб. научных статей/ Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2008. - С.205-211.

85. ГОСТ 17070-79. Угли. Термины и определения.

86. Заміховський Л.М. Статистичні характеристики показників якості процесу помолу вугілля у вертикальному валковому млині MPS 180BK фірми

- PFEIFFER AG. млина [Текст]/Л.М.Заміховський, Р.Б. Скрипюк//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008 – Вип. 5/5(35). - С.12- 16.
87. Яблоков А. Е. Выбор места установки датчиков при вибродиагностике вальцовых станков – М.: Компания Спутник, 2000.-с. 116-118.
88. Трехкомпонентные вибропреобразователи AP20, AP21, AP22, AP38, AP80, AP81 –Каталог фирмы “ОКТАВА” - Режим доступа : <http://www.octava.ru>.
89. WaveLab - лаборатория звука (электронная книга) [Электронный ресурс]. – Режим доступа :<http://igorkozlov.ucoz.ru/publ/3-1-0-25>.
90. Заміховський Л.М. Використання методу параметричної діагностики для контролю технічного стану робочих органів вертикального валкового млина MPS 180BK органів [Текст]/ Заміховський Л.М., Скрипюк Р.Б.// Прилади і методи контролю якості. - 2010.- № 21. – С.
91. Заміховський Л.М. Метод контролю технічного стану вертикального валкового млина AG MPS 180 BK за його вібраційними характеристиками [Текст]/Заміховський Л.М., Скрипюк Р.Б., Ровінський В.А.// Нафтогазова енергетика. – 2010.-1(12).- С.138-142
92. Мельница угля. PS UM – Электрические системы для PS-UD,UM. Документация. Рабочий проект [Текст] . -Рѣгов., 2001.
93. Асинхронные двигатели общего назначения [Текст] / Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковелев Ю.М., и др.; Под.ред. В.М.Петрова и А.Э.Кравчика.–М.:Энергия, 1980. – 488с., ил..
94. Иосилевич Г.Б. Прикладная механика: Учеб. для вузов [Текст] /Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Маслов Г.С. - М.: Высш.шк., 1989.
95. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И.Н.Бронштейн К.А.Семендяев. - М., 1948.
96. Заміховський Л.М. Розгінна характеристика вертикального валкового млина PFEIFFER AG - MPS 180BK як діагностична ознака технічного стану його робочих органів [Текст]/ Заміховський Л.М., Скрипюк Р.Б.// Нафтогазова енергетика.- 2010.- № 2(13).- С.87-92.

97. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов.— Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 392 с.

98. Заміховський Л.М. Вибір діагностичної ознаки технічного стану робочих органів вертикального валкового млина MPS 180BK на основі методу його параметричної діагностики за уточненою перехідною характеристикою[Текст]/ Заміховський Л.М., Скрипюк Р.Б.// Вісник НТУ «ХП». - № 52. -2010. – С. 134-140.

99. Джон Г. Мэтьюз, Куртис Д. Финк. Численные методы. Использование MATLAB. 3-е издание. – М.: Вильямс, 2001. – 720с.

100. Аязян Г.К. Расчет автоматизированных систем с типовым алгоритмом регулирования. – Уфа: Изд-во Уфимского нефтяного института, 1989. – 136 с.

101. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 751 с.

102. Отес Р., Єноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. – М.: Мир, 1982 – 482 с.

103. Марал-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

104. Заміховський Л.М., Скрипюк Р.Б. Використання методу непараметричної ідентифікації для діагностування технічного стану робочих органів вертикального валкового млина AG-MPS 180 BK. Вісник нац. тех. ун-ту «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП» - 2009.- С.89-93.

105. Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. Серия: Самоучитель. Издательство: НТ Пресс, 2006г., 496 стр. ISBN 5-477-00208-5.

106. Д.Джонсон, Др.Джонсон, Г.Мур.. Справочник по активным фильтрам:/ пер.с англ.М.- Энергоатомиздат, 1983.-128с., с ил.

107. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М.: Горячая линия-Телеком, 2007.-464с.ил. ISBN 978-5- 93517-339-5.

108. Заміховський Л.М. Мікроконтролерна система діагностування технічного стану робочих органів вертикального валкового млина [Текст] / Л.М.Заміховський, Р.Б. Скрип'юк // Восточно - Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2010. – № 6/8 (48). – С. 64-67.

109. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М.: Горячая линия-Телеком, 2007.-464с.ил. ISBN 978-5- 93517-339-5.

110. Кузьминов А.Ю. Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером. –М.: Радио и связь, 2004. -168 с.:ил. ISBN 5-256-01715-2

111. Лопаткин А.В. P-CAD 2004. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.-560 с.: ил. ISBN 5-94157-662-5.

112. Мортон Дж. Микроконтроллеры AVR. Вводной курс./пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2006.-272с.: ил. ISBN 5-94120-096-X

113. Лебедев М.Б. CodeVisionAVR. Пособие для начинающих.-М.: Додэка-XXI, 2008.- 592 с.: ил. ISBN 978-5-94120-192-1

114. INA163. Low-Noise, Low-Distortion instrumentation amplifier. //focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp.

125. ULN2003. High-voltage, high-current, darlington transistor arrays. // focus.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf.

116. LM317. 3-Terminal 1.5A Positive Adjustable Regulator. // www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM317.pdf.

117. LM337. 3-Terminal 1.5A Negative Adjustable Regulator. // www.fairchildsemi.com/ds/LM%2FLM337.pdf.

118. OPA134, OPA2134, OPA4134. High Performance audio operational amplifiers. // focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?...opa134&fileType=pdf.

119. LM341/LM78MXX Series 3-Terminal Positive Voltage Regulators. // www.national.com/ds/LM/LM341.pdf.

120. Елшин Ю.М. Справочное руководство по работе с подсистемой SPECSTRA в PCAD2000.– М.: СОЛОН-Р, 2002.-272с.:ил. ISBN 5-93455-154-X.

121. LTC1860/LTC1861 uPower,12bit, 250ksps 1-and 2-Channel ADCs in MSOP// cds.linear.com/docs/Datasheet/18601fa.pdf.

122. З.Г.Шефтель Теорія ймовірностей.-К.: "Вища школа", 1994—192с.

123. Заміховський Л.М. Проектування систем діагностування [Текст]: навч. посіб. /Л.М.Заміховський, В.П.Калявін. – Івано-Франківськ, вид-во "Полум'я", 2004. – 247с.

124. Калявин В.П. Организация систем диагностирования судового оборудования [Текст] /В.П.Калявин, А.М.Малышев, А.В.Мозгалевский. – Л.: Судостроение, 1991. – 168с.

ДОДАТКИ

Технічні характеристики ВВМ типу MPS-180 ВК та параметри вугілля

Таблиця А.1

Основні технічні характеристики ВВМ типу MPS-180 ВК

Продуктивність ділянки помолу	15 т/год
Тип млина	вертикальний, Pfeifer
Подрібнюване вугілля	кам'яне вугілля (антрацит)
Ємкість бункера сирого вугілля	250 м ³
Ємкість бункера меленого вугілля	350 м ³
Система дозування у печі	тип Schenck
Кліматичні умови:	
висота над рівнем моря сейсмічність температура	±0,00 = 237,5 м 6 балів за шкалою MCS, Kmax =1,2 макс. + 39°С мін. - 35° С середня +12°С
Енергетичні параметри: електромережа ВН НН	6000 В 3 x 380 /220 В, 50 Гц 24 В, 50 Гц
Паливо камери спалювання	природний газ
Теплотворення	близько 8100 ккал /м ³

Таблиця А.2

Параметри вугілля, яке використовується для помолу на ВАТ «Івано-Франківськцемент»

№ н/п	Постачальник	Волога	Зола	Летючі речовини	Калорійність
1.	Компанія «Krutrade A.G.» ВАТ «Оф. Юг - Сиб» (Хутор «Светлый», Каменського району, Ростовської обл., Росія), марки СССШ	7,8	14,1	17,2	6209
		8,8	11,9	16,8	6543
		8,2	10,7	16,4	6567
		10,11	11,9	16,5	5973
		10,4	10,3	17,4	6305
		11,36	9,9	16,9	6422
		8,46	12,9	16,9	6468
		7,54	11,7	19,0	6869
		6,27	14,5	16,0	6491
		6,78	12,4	16,6	6694
		7,8	14,1	17,2	6209
2.	Компанія «Saintmarine Ltd.» ВАТ « Разрез Октябрьский» (м. Кісельовськ, Кемеровської обл. Росія), марки ГЖ	10,8	17,0	33,4	5265
		11,4	12,3	36,5	5565
		9,21	15,5	26,4	5777
		11,7	16,96	27,5	5483
		15,8	13,8	23,6	5416
		8,7	11,1	32,1	6184
		7,87	11,6	31,9	6042
		8,48	14,0	31,8	5908
		8,07	15,8	31,2	5744
		8,66	14,2	30,6	5819
		9,05	13,0	31,6	6323
		7,9	14,3	30,7	6146
		8,87	12,0	31,1	6080
		9,5	10,6	32,1	6236
		9,7	13,2	31,0	6054

**Обробка статистичні дані параметрів процесу помолу вугілля та
параметри давача вібрації**

Таблиця Б.1

**Статистичні дані параметрів і показників на млині AG-MPS 180BK
отримані в ВАТ «Івано-Франківськцемент»**

t, год	S _n	n _c	P _n	V _m	T _n	V _{в.с.}	Q _{в.с.}	Зола	Воло- гість	Лег. реч.	Ккал	C	H ₂	N ₂	O ₂	S
0	76,49	37,92	250009,9	1,496	232,93	0,997	14316,48	9,4	11,39	28,2	6010	82,1	4,65	1,64	8,34	2,17
2	79,64	37,97	250003,9	1,5	230,72	1	14394,54	6,4	9,19	28	6250	83	4,63	1,43	8,75	2,33
4	86,56	38,16	249983,8	1,509	225,3	1,005	14548,68	23	8,33	28,1	5580	82,7	4,8	1,48	7,37	2,69
6	78,7	37,95	250007,7	1,499	231,34	0,999	14374,32	22,9	12,32	27,1	5274	82,6	5,15	1,28	7,01	2,57
8	87,69	38,18	249982,1	1,511	224,28	1,006	14571,06	21,4	13,53	26,4	5220	81,1	4,72	1,37	6,98	2
10	73,34	37,82	250018,8	1,491	235,18	0,995	14236,8	11,7	8,9	30,7	6130	81,2	5,37	1,47	7,24	2,52
12	79,5	37,96	250004,9	1,5	231,06	1	14387,58	13,5	13,34	28,2	5660	82,7	5,04	1,16	7,11	2,8
14	92,08	38,23	249975	1,515	221,14	1,008	14636,28	15,5	9,5	29,4	5960	84,6	5,74	1,41	7,72	2,53
16	81,46	38,05	249995,4	1,505	228,51	1,002	14455,2	19	8,39	29,2	5712	82,8	4,37	1,74	6,83	2,37
18	78,68	37,95	250007,8	1,499	231,43	0,999	14371,44	22,8	13,06	26,7	5274	82,7	5,02	1,58	7,63	2,43
20	72,23	37,8	250022,4	1,49	235,47	0,994	14225,7	13,1	13,38	29	5700	82,7	5,37	1,49	6,67	2,12
22	81,66	38,06	249995	1,505	228,38	1,002	14457,84	14,1	8,06	30,1	5984	81,8	4,79	1,56	7,02	2,43
24	80,02	37,99	250002	1,501	230,24	1	14406,36	20,3	8,19	30,4	5980	84,4	4,81	1,66	8,52	2,49
26	74,81	37,87	250013,3	1,494	234,18	0,996	14294,88	13,9	14,68	28,3	5700	82,1	4,13	1,5	6,41	2,58
28	81,66	38,06	249995,2	1,505	228,49	1,002	14455,86	22,8	10,92	28,2	5425	82,6	4,4	1,66	6,96	2,64
30	75,63	37,89	250012,3	1,495	233,67	0,997	14300,04	16,8	13,73	30	5274	81,2	4,75	1,54	6,81	2,78
32	69,38	37,73	250033,1	1,485	238,11	0,993	14179,26	16,8	11,39	28	5710	81,5	5,35	1,49	7,03	2,76
34	92,23	38,25	249973,7	1,516	220,61	1,008	14646,42	16,8	10,6	27,6	5710	84	5,77	1,49	7,92	2,82
36	84,75	38,12	249988,5	1,508	226,2	1,004	14511,78	16,2	10,57	29,7	5870	83,7	4,16	1,98	7,09	2,71
38	84,7	38,12	249988,7	1,508	226,29	1,003	14504,1	14,7	7,76	30,4	6250	83,6	5,18	1,77	7,45	2,48
40	84,91	38,13	249987,7	1,508	225,86	1,004	14515,08	13,7	8,95	31,1	5980	83	5,08	1,53	6,4	2,27
42	75,06	37,88	250013,2	1,494	233,89	0,997	14295,66	16,3	10	30	5870	82,1	4,43	1,13	5,62	2,3
44	77,81	37,93	250008,7	1,497	232,23	0,998	14341,86	19,4	13,06	29,9	5710	84,5	5,17	1,64	6,38	2,51
46	80,33	38	249999,7	1,502	229,88	1,001	14424,54	10,1	10,2	31	6120	82,7	4,7	1,63	7,78	2,54
48	94,05	38,26	249970,7	1,519	218,35	1,009	14679,12	9,6	7,54	32,6	6392	83	5,5	1,94	6,83	2,88
50	97,5	38,34	249960,2	1,524	215,74	1,014	14818,44	18,8	13,18	26,4	5480	84,4	5,34	1,34	6,63	2,69
52	81,05	38,03	249998,2	1,503	229,15	1,002	14446,14	19	12,04	27	5700	82,8	5,48	1,2	7,04	2,7
54	88,78	38,21	249979,4	1,513	223,63	1,006	14591,88	21,8	12,26	26,8	5220	82,7	4,47	1,58	9,91	2,15
56	80,06	37,99	250001,3	1,502	230,16	1	14412,24	15,5	9,1	26,7	5845	83,7	4,74	1,85	6,43	2,26
58	82,2	38,06	249993,5	1,505	227,93	1,002	14464,38	16,3	13,38	29,5	5845	82	5,24	1,09	6,27	2,73
60	80,76	38,02	249998,9	1,502	229,52	1,001	14438,64	22,8	8,42	29,5	5480	83	4,63	1,29	7,45	2,63
62	96,94	38,33	249968,5	1,522	216,94	1,012	14755,08	12	8,61	30,8	6120	84,1	4,12	1,55	7,43	2,57
64	80,65	38,01	249999,1	1,502	229,7	1,001	14428,74	21,8	9,24	28,4	5595	81,6	4,45	1,51	4,67	2,5
66	80,23	38	250000,5	1,502	230,04	1,001	14418,42	13,7	13,39	28,2	5712	82,7	4,42	1,37	6	2,43
68	86,71	38,16	249983,8	1,509	225,01	1,005	14553,3	13,1	10,29	30,4	5980	82,2	4,66	1,48	4,88	2,64
70	86,91	38,16	249983,2	1,509	224,87	1,005	14555,28	14,5	15,4	28	5660	82,7	5,1	1,56	7,19	2,64
72	77,87	37,93	250008,7	1,498	232,23	0,998	14342,22	21,8	13,34	26,7	5670	81,9	5,18	1,39	6,98	2,52
74	68	37,68	250042,5	1,478	241,64	0,991	14126,1	15,8	11,63	27,9	5660	84,2	4,42	1,53	5,76	2,37
76	80,03	37,99	250001,4	1,501	230,18	1	14407,92	8,8	13,73	29,7	5480	84,4	5,14	1,71	6,91	2,4
78	77,63	37,93	250008,8	1,497	232,55	0,998	14341,2	13,4	12,81	30,4	5660	81,8	5,25	1,61	5,49	2,29
80	68,66	37,71	250035,2	1,481	240,39	0,991	14138,76	20,2	9,21	28,2	5670	83	4,81	1,55	7,86	2,63
82	82,25	38,07	249993,2	1,505	227,85	1,002	14464,38	9,5	11,11	30,4	5845	83,4	4,59	1,26	5,82	2,62
84	74,73	37,86	250014,2	1,494	234,3	0,996	14289,9	15,5	7,84	29,5	5984	83	5,09	1,4	7,31	2,67
86	72,94	37,81	250020,1	1,491	235,2	0,994	14233,8	11,3	10,57	28,2	6120	83,4	4,27	1,44	7,59	2,23
88	81,24	38,04	249996,9	1,503	229,08	1,002	14448,78	11,7	9,97	28,2	6120	83,1	4,74	1,5	7,88	2,6

Продовження таблиці Б.1

t, год	S _n	n _c	P _n	V _m	T _n	V _{в.с.}	Q _{в.с.}	Зола	Воло- гість	Лет. реч.	Ккал	C	H ₂	N ₂	O ₂	S
90	73,58	37,82	250018,3	1,492	235,14	0,995	14243,76	12,9	13,34	26,7	5715	82,7	4,46	1,45	7,56	2,25
92	85,56	38,15	249985	1,509	225,3	1,005	14545,86	9,3	6,13	27,4	6310	83,8	5,74	1,7	8,4	2,52
94	82,13	38,06	249993,9	1,505	228,05	1,002	14461,32	20,2	10,2	28,7	5595	83,1	5,12	1,49	7,29	2,37
96	65,69	37,59	250056,8	1,47	244,56	0,985	13963,74	19,4	9	25,7	5870	83,1	4	1,64	6,57	2,64
98	72,51	37,81	250020,3	1,491	235,23	0,994	14232,78	11,3	7,76	29,9	6110	83,3	5,63	1,35	6,32	2,62
100	75,4	37,88	250013	1,494	233,79	0,997	14296,44	116,4	10,4	27,6	5715	81,8	5,26	1,64	7,87	2,81
102	76,58	37,92	250009,8	1,496	232,89	0,997	14320,62	12,6	9,52	30,9	6120	80,3	5,24	1,3	6,06	2,51
104	78,6	37,95	250007,9	1,499	231,55	0,999	14363,22	11	8,86	30,9	6120	83,8	4,65	1,5	8,03	2,31
106	84,6	38,11	249988,8	1,508	226,37	1,003	14501,46	14,5	10,9	32,1	5910	84,4	5,52	1,33	7,91	2,47
108	69,61	37,74	250032,2	1,488	237,6	0,993	14182,68	12	14,07	29,4	5220	84,1	4,35	1,53	7,11	2,45
110	83,81	38,1	249991,1	1,507	226,89	1,003	14485,14	22,5	9,18	30	5580	83,4	5,66	1,67	5,86	2,61
112	73,8	37,83	250017,7	1,492	235	0,995	14257,44	13,9	9,76	31,5	5980	82	5,15	1,47	6,89	2,87
114	76,3	37,9	250011,7	1,496	233,39	0,997	14311,62	29,7	14,07	25,1	4880	82,6	4,28	1,5	6,9	2,18
116	73,67	37,83	250018,1	1,492	235,13	0,995	14254,02	26	13,82	26,3	5870	85,4	5,18	1,48	7,68	2,75
118	76,84	37,92	250009,7	1,496	232,83	0,997	14321,76	13,2	11,21	31,8	5980	82,3	4,24	1,32	6,73	2,56
120	81,25	38,04	249996,7	1,504	229,04	1,002	14448,84	19	12,61	27,6	5274	82,5	5,64	1,46	6,32	2,44
122	87,98	38,2	249981,3	1,512	224,01	1,006	14589,96	14,1	13,39	29,4	5700	84,1	4,37	1,65	6,29	2,84
124	83,46	38,09	249991,3	1,507	227,04	1,003	14477,88	13,4	14,07	31,2	5700	84	4,74	1,22	3,65	2,68
126	79,45	37,96	250005,5	1,5	231,12	1	14387,34	16,8	13,32	26,7	5580	81,9	5,16	1,83	5,8	2,36
128	80,96	38,02	249998,4	1,503	229,21	1,001	14441,94	17	12,28	29,7	5710	84,8	4,95	1,54	8,51	2,34
130	86,1	38,16	249984,7	1,509	225,3	1,005	14546,46	17,2	12,25	28,7	5580	83,5	4,71	1,43	6,94	2,72
132	86,88	38,16	249983,6	1,509	224,9	1,005	14555,16	13,6	8,06	30,1	6112	82,3	4,48	1,52	5,98	2,38
134	68,67	37,72	250034,6	1,483	238,75	0,992	14146,56	9,4	10,77	26,8	6310	82,9	6,18	1,35	7,32	2,72
136	94,16	38,29	249969,8	1,519	218,33	1,01	14689,56	25,6	12,34	26,4	5274	84,1	4,37	1,77	8,05	2,42
138	83,92	38,11	249989,7	1,507	226,56	1,003	14488,74	17	10,69	31,3	5670	84	4,65	1,12	6,31	2,41
140	68,32	37,69	250037,8	1,479	240,68	0,991	14136,54	9	10,03	29,1	6250	80,9	5,55	1,4	8,73	2,48
142	78,11	37,93	250008,3	1,498	231,87	0,998	14345,94	22,5	9	30,3	6180	84,7	5,39	1,85	7,91	2,75
144	76,86	37,93	250009,6	1,497	232,78	0,997	14322,12	22	10,3	29,1	5580	82,6	5,19	1,72	7,75	2,6
146	81,36	38,05	249996	1,504	228,65	1,002	14454,78	14,1	14,08	27,4	5700	83,5	4,74	1,32	7,07	2,37
148	80,26	38	249999,9	1,502	229,9	1,001	14423,46	22,3	8,42	27,6	5990	82,9	4,67	1,35	6,26	2,32
150	83,86	38,1	249990,8	1,507	226,6	1,003	14487,12	12	8,92	27,9	5980	81,6	5,08	1,4	8	2,96
152	83,16	38,08	249992,5	1,506	227,15	1,002	14474,58	19,9	13,82	28,2	5480	83,9	3,96	1,5	8,21	2,63
154	87,12	38,17	249982,8	1,51	224,6	1,005	14561,28	11,2	12,14	26,7	5990	82,5	5,05	1,33	7,73	2,55
156	82,94	38,08	249992,6	1,506	227,52	1,002	14472,9	15,5	9,11	29,7	5425	82,1	5,97	1,32	7,76	2,89
158	79,82	37,98	250003,2	1,501	230,53	1	14395,14	11	13,53	25,1	6010	81	5,02	1,55	7,34	2,66
160	70,95	37,78	250023,9	1,489	236,78	0,994	14212,32	18,5	13,18	30	6120	83,8	5,52	1,45	8,06	2,45
162	84,58	38,11	249988,8	1,508	226,45	1,003	14500,8	9	11,39	27,6	6130	82,6	4,98	1,54	7,9	2,44
164	75,58	37,88	250012,6	1,495	233,71	0,997	14298,72	16,1	9,39	31	5700	82,2	4,96	1,36	7,74	2,15
166	88,78	38,21	249979,5	1,512	223,8	1,006	14591,76	19	11,89	28,3	6250	82,1	5,2	1,47	4,67	2,85
168	70,68	37,77	250028,8	1,489	236,98	0,994	14211,12	20,2	13,55	26,4	6130	81	5,2	1,38	6,61	2,68
170	72,08	37,8	250023,3	1,49	236,02	0,994	14221,68	13	11,89	29,5	5870	82,5	4,98	1,49	7,31	2,25
172	78,35	37,95	250008	1,498	231,7	0,998	14349,42	22,5	12,34	26,4	6120	81	5,21	1,52	8,62	2,24
174	74,79	37,87	250014,1	1,494	234,23	0,996	14294,76	14,1	10,18	31,2	5910	81,3	5,44	1,52	6,83	2,21
176	91,4	38,23	249975,5	1,515	221,42	1,008	14632,44	14,5	13,23	27,8	5980	83,4	4,74	1,26	7,14	2,75
178	82,65	38,07	249992,9	1,506	227,74	1,002	14469,6	22,1	11,99	30,6	4880	83,7	5,03	1,19	6,17	2,91
180	78,4	37,95	250007,9	1,498	231,61	0,999	14359,02	22,5	8,85	28,2	5580	82,4	4,98	1,33	8,44	2,77
182	84,87	38,12	249988,2	1,508	225,94	1,004	14511,9	20,2	15,4	26,8	5980	83,4	4,71	1,32	6,6	2,36
184	84,64	38,11	249988,7	1,508	226,33	1,003	14503,02	21,8	10,92	29,5	6310	84,7	4,55	1,54	4,15	2,52
186	85,17	38,14	249986,6	1,508	225,69	1,004	14518,38	16,2	8,39	29,7	6250	83,1	4,82	1,61	5,67	2,18
188	91,07	38,23	249976,5	1,514	222,45	1,007	14623,02	16,2	14,19	27,8	5580	83,7	4,52	1,24	7,26	2,55
190	70,81	37,78	250024,4	1,489	236,91	0,994	14211,36	22,8	8,92	22,5	5545	81,7	4,26	1,31	8,03	2,49
192	69,18	37,72	250034,5	1,483	238,64	0,992	14147,1	17,8	12,03	27	5710	82	4,35	1,76	6,93	2,79
194	76,19	37,9	250011,8	1,496	233,43	0,997	14310,72	12,6	14,19	27,9	5660	82	4,97	1,9	7,02	2,83
196	80,18	38	250000,7	1,502	230,11	1,001	14417,88	14,8	10,1	27	6000	82,8	4,55	1,63	6,08	2,56
198	73,94	37,83	250016,3	1,492	234,66	0,995	14264,82	14,7	13,32	30,6	6130	83,3	5,25	1,17	7,09	2,57

Продовження таблиці Б.1

t, год	S _n	n _c	P _n	V _m	T _n	V _{в.с.}	Q _{в.с.}	Зола	Воло- гість	Лет. реч.	Ккал	C	H ₂	N ₂	O ₂	S
200	74,54	37,85	250014,6	1,493	234,46	0,996	14284,02	11,2	10,86	28,3	5910	81,7	5,33	1,44	5,92	2,36
202	80,84	38,02	249998,6	1,503	229,43	1,001	14441,58	15,8	11,46	28,8	5660	84,9	5,21	1,39	7,91	2,39
204	83,2	38,09	249991,4	1,507	227,04	1,003	14475,78	26,7	12,09	27,1	5274	84,4	4,58	1,51	9,42	2,5
206	74,11	37,83	250015,3	1,493	234,56	0,996	14272,38	19,4	12,01	26,8	5845	82,3	5,54	1,34	4,55	2,74
208	80,26	38	250000	1,502	230,01	1,001	14418,84	14,6	13,06	27,1	5660	81,7	4,66	1,4	5,97	2,4
210	89,18	38,21	249978,7	1,513	223,56	1,006	14594,4	16,4	12,03	28,2	5700	83,4	5,16	1,33	5,88	2,41
212	75,42	37,88	250013	1,494	233,75	0,997	14297,7	13,3	8,78	29,9	6000	83,2	5,73	1,56	7,56	2,32
214	77,62	37,93	250009,1	1,497	232,57	0,998	14337,66	18,5	9,11	30,4	5274	82	4,57	1,18	4,39	2,43
216	81,76	38,06	249994,4	1,505	228,14	1,002	14459,1	23	8,57	29,4	5990	84,1	5,39	1,59	7,81	2,57
218	80,97	38,03	249998,3	1,503	229,17	1,002	14445,48	13	13,39	26,8	5580	82,8	5,38	1,52	6,07	2,81
220	81,11	38,04	249997,8	1,503	229,14	1,002	14446,8	22,5	13,55	26,3	5274	82,4	4,59	1,19	6,6	2,34
222	78,86	37,96	250007	1,499	231,27	0,999	14379,84	22,3	12,26	31,2	5910	84,5	5,28	1,69	8,38	2,38
224	81,92	38,06	249994,1	1,505	228,09	1,002	14459,1	18,5	8,57	29,6	5712	83,7	4,71	1,52	6,82	2,7
226	72,01	37,79	250023,3	1,489	236,03	0,994	14221,38	8,8	9,56	28,2	6392	83	4,12	1,58	7,51	2,55
228	83,69	38,09	249991,2	1,507	227	1,003	14481,6	14,6	9,15	30,8	5910	83,8	5,4	2,01	8,09	2,58
230	70,38	37,77	250031,4	1,488	237,22	0,993	14204,1	13,9	11,39	28,2	5220	84,5	5,16	1,86	7,21	2,64
232	70,25	37,76	250031,5	1,488	237,45	0,993	14198,64	19,1	9,11	28,2	5700	82,8	4,16	1,74	6,14	2,11
234	87,7	38,19	249981,6	1,511	224,08	1,006	14584,14	14,7	11,17	29	5805	81,4	4,68	1,52	9,33	2,89
236	88,54	38,21	249980	1,512	223,94	1,006	14591,58	15,5	8,64	25,7	6392	82,4	6,39	1,53	5,95	2,69
238	80,85	38,02	249998,5	1,503	229,26	1,001	14441,76	13,2	12,32	31	5580	83,8	4,61	1,5	6,27	2,48
240	84,13	38,11	249989,1	1,508	226,55	1,003	14493,06	8,8	8,5	32,3	6392	82,5	5,19	1,28	5,71	2,49
242	74,16	37,84	250015,2	1,493	234,54	0,996	14274,48	22	8,25	29,5	5960	81,5	5,19	1,46	7,89	2,6
244	73,4	37,82	250018,4	1,492	235,17	0,995	14242,26	16	11,74	30,4	5845	82,5	5,21	1,39	6,5	2,37
246	81,14	38,04	249997,6	1,503	229,13	1,002	14447,58	14,6	8,61	27,4	5980	83,2	4,41	1,42	5,28	2,46
248	80,68	38,01	249999	1,502	229,56	1,001	14437,38	10,5	9,21	27,9	6120	81,7	4,81	1,27	7,73	2,22
250	79,11	37,96	250006,6	1,5	231,26	0,999	14381,46	18,5	9,76	29,9	6250	82,5	4,72	1,61	8,07	2,45
252	85,24	38,15	249986,4	1,508	225,4	1,004	14520,12	14,6	10,13	30,6	5910	83,4	5,64	1,56	5,23	2,77
254	75,86	37,89	250012	1,495	233,65	0,997	14304,66	14,1	12,34	27,4	5700	82,8	5,34	1,43	7,95	2,84
256	78,82	37,95	250007	1,499	231,29	0,999	14377,92	17	13,23	29,9	5220	83,3	4,95	1,85	8,04	2,21
258	74,69	37,86	250014,2	1,493	234,33	0,996	14288,4	16	8,25	30,4	5984	83,5	5,82	1,37	7,55	2,52
260	81,43	38,05	249995,8	1,504	228,61	1,002	14454,84	13,6	10,55	30,5	5980	80,6	5,57	1,49	7,85	2,47
262	73,96	37,83	250016,2	1,492	234,59	0,996	14265,06	16,6	12,03	25,7	5480	82,8	5,49	1,54	9,12	2,46
264	82,18	38,06	249993,8	1,505	228,01	1,002	14461,5	17,4	10,77	28,9	5712	82,6	5,14	1,82	7,25	2,78
266	82,71	38,07	249992,8	1,506	227,69	1,002	14470,56	22,5	9,19	27,1	5910	83,2	5,13	1,38	7,31	2,43
268	76,18	37,89	250011,8	1,495	233,58	0,997	14310,66	13,9	8,5	27	6010	83,1	5,24	1,6	6,19	2,33
270	95,31	38,31	249969,1	1,521	217,76	1,011	14724,96	14,5	7,84	22,5	5910	83,9	5,91	1,17	7,92	2,7
272	80,01	37,98	250002,7	1,501	230,34	1	14406	17,4	8,33	27,1	6120	81,4	5,89	1,65	9,67	2,5
274	71,63	37,79	250023,4	1,489	236,44	0,994	14219,7	19	11,61	29,2	5670	82,8	4,86	1,44	6,62	2,57
276	90,43	38,23	249977	1,514	223,12	1,007	14622,78	15,7	10,45	31	5845	83,3	4,65	1,46	6,17	2,88
278	68,45	37,7	250036,9	1,479	240,6	0,991	14137,32	16	11,39	28,3	5425	83,4	4,9	1,27	7,58	2,45
280	85,45	38,15	249985,4	1,509	225,31	1,005	14543,16	22	12,04	28,2	6392	84,4	5,73	1,45	7,64	2,5
282	66,61	37,64	250046,5	1,474	243,34	0,99	14086,62	15,5	14,07	26,4	5712	81,8	4,33	1,24	6,59	2,28
284	77,07	37,93	250009,6	1,497	232,73	0,997	14322,48	14,1	11,86	27,6	5980	83,6	5,29	1,23	5,62	2,48
286	92,41	38,25	249973,5	1,516	220,43	1,009	14666,04	13	10,13	31	6010	83,2	5,06	1,54	6,31	2,45
288	71,45	37,79	250023,4	1,489	236,69	0,994	14217,18	10,9	9,71	29,7	6112	83	4,39	1,75	6,7	2,49
290	66,88	37,65	250042,6	1,476	242,08	0,99	14100,9	26	9,22	30,3	5440	84,5	4,55	1,49	5,12	2,37
292	84,95	38,13	249987,4	1,508	225,84	1,004	14518,2	19,1	12,09	30,1	6120	82,9	5,64	1,64	8,2	2,78
294	92,5	38,26	249971,1	1,519	219,39	1,009	14673,48	13,1	13,06	27,1	5580	82,5	4,4	1,65	7,18	2,3
296	72,28	37,81	250021,3	1,49	235,35	0,994	14226,78	14,8	13,73	29,1	5700	81,5	4,81	2	7,93	2,52
298	78,52	37,95	250007,9	1,499	231,57	0,999	14359,26	13,4	11,04	27,1	5910	83,3	3,55	1,33	7,21	2,46
300	69,95	37,75	250031,9	1,488	237,53	0,993	14187,42	22,5	14,19	26,7	5670	80,7	4,29	1,75	9,14	2,39
302	79,53	37,97	250004,5	1,5	231,05	1	14390,28	17	9,39	30,4	5274	81,4	5,93	1,56	6,7	2,48
304	81,32	38,04	249996,4	1,504	228,77	1,002	14451,54	15,5	8,76	30,3	5845	83,4	5,06	1,23	7,25	2,49
306	97,99	38,36	249953,8	1,526	213,27	1,014	14830,98	15,7	13,18	29,1	6010	83,5	4,65	1,44	9,08	2,54
308	75,03	37,87	250013,2	1,494	234,05	0,996	14295	26,7	7,76	30,1	5580	83,6	4,98	1,35	5,67	2,45

Продовження таблиці Б.1

t, год	S _n	n _c	P _n	V _m	T _n	V _{в.с.}	Q _{в.с.}	Зола	Воло- гість	Лет. реч.	Ккал	C	H ₂	N ₂	O ₂	S
310	82,87	38,08	249992,6	1,506	227,65	1,002	14471,4	13,6	12,32	26,7	5910	82,2	5,38	1,51	6,55	2,83
312	70,53	37,77	250030,2	1,488	237,18	0,994	14205,06	17,4	7,84	30,4	6250	82,8	5,49	1,53	7,05	2,74
314	74,29	37,85	250014,7	1,493	234,52	0,996	14277,54	19,1	9,14	30,3	5870	81,8	4,93	1,45	8,04	2,33
316	83,91	38,1	249990,1	1,507	226,58	1,003	14487,18	22,3	9,56	29,5	5545	81,7	5,31	1,9	8,44	2,02
318	69,3	37,73	250033,6	1,484	238,26	0,992	14173,5	16,3	13,23	28,5	5580	81,2	4,92	1,7	7,22	2,29
320	76,35	37,92	250010,8	1,496	232,98	0,997	14315,88	14,7	8,92	30,3	5984	82,2	5	1,21	6,06	2,73
322	80,57	38,01	249999,1	1,502	229,81	1,001	14428,02	22,5	8,06	26,8	5980	82,5	5,23	1,55	6,24	2,59
324	80,01	37,98	250002,9	1,501	230,43	1	14404,68	11,3	11,11	28,5	6010	83,1	4,91	1,5	7,57	2,33
326	89,57	38,22	249977,1	1,514	223,12	1,007	14620,02	20,2	12,14	29,7	5910	83,7	5,16	1,41	7,44	2,24
328	76,34	37,91	250011,2	1,496	233,2	0,997	14311,86	20,3	12,61	27,1	5710	84	5,3	1,42	6,97	2,37
330	76,35	37,91	250011,1	1,496	233,17	0,997	14313,24	14,6	13,55	28,2	5580	82,5	4,7	1,61	6,53	2,65
332	85,41	38,15	249986	1,509	225,35	1,004	14532,54	9,6	11,39	28,5	5870	81,8	4,62	1,62	5,09	2,65
334	89,33	38,21	249977,2	1,513	223,34	1,007	14617,8	22,5	12,81	31,2	6120	83,8	5,14	1,62	7,25	2,5
336	73,99	37,83	250015,4	1,493	234,58	0,996	14269,32	11,7	13,82	28,3	5480	84	4,96	1,18	8,49	2,58
338	77,94	37,93	250008,3	1,498	232,15	0,998	14344,14	16,4	8,42	30,1	6120	81,5	4,86	1,52	6,41	2,55
340	76,85	37,92	250009,7	1,496	232,82	0,997	14321,88	22,8	12,28	30,4	6120	83,7	5,1	1,73	5,73	2,16
342	88,26	38,2	249980,4	1,512	223,99	1,006	14590,86	16,3	11,4	28,6	5660	82,9	4,56	1,46	7,54	2,67
344	79,62	37,97	250004,1	1,5	230,92	1	14391,24	20,2	9,83	29,1	5595	82,7	4,44	1,46	6,75	2,14
346	79,32	37,96	250005,5	1,5	231,18	1	14386,08	18,5	11,99	25,7	6250	83,3	4,79	1,23	6,84	2,74
348	77,21	37,93	250009,4	1,497	232,69	0,997	14324,52	12,9	9,13	31,4	6130	84,4	4,82	1,2	7,26	2,63
350	84,35	38,11	249989,1	1,508	226,45	1,003	14499,48	15,9	10,4	29,4	5845	81,6	5,2	1,7	6,06	2,34
352	79,72	37,97	250003,8	1,5	230,55	1	14394,96	17,5	13,18	26,7	5480	84,4	4,97	1,61	6,17	2,52
354	79,19	37,96	250005,8	1,5	231,25	0,999	14384,4	21,8	10,03	29,4	6120	84,2	6,08	1,35	8,36	2,62
356	79,99	37,98	250003,1	1,501	230,47	1	14401,2	15,9	10	28	5845	85,1	4,93	1,63	8,29	2,62
358	69,44	37,73	250033	1,486	237,75	0,993	14181,06	16,6	11,99	29,4	5710	83,6	5,27	1,51	7,37	2,28
360	78,17	37,94	250008,2	1,498	231,86	0,998	14346,36	21	15,4	26,7	5220	82,5	4,88	1,76	6,83	2,52
362	87,18	38,17	249982,2	1,51	224,41	1,005	14564,46	16,3	9,39	26,8	6110	84	5,09	1,49	6,06	2,56
364	81,74	38,06	249994,4	1,505	228,36	1,002	14457,9	20,2	10,29	30,6	6000	85,3	4,94	1,8	7,51	2,72
366	74,69	37,85	250014,2	1,493	234,38	0,996	14286,6	17,9	12,04	27,7	5480	81,1	5,29	1,2	7	2,46
368	80,65	38,01	249999	1,502	229,66	1,001	14428,86	10,9	8,3	28,3	6180	83,6	6,44	1,58	7,27	2,34
370	82,19	38,06	249993,6	1,505	228	1,002	14464,32	13,8	8,42	28,3	6110	81,8	4,83	1,55	7,69	2,35
372	87,01	38,16	249983	1,51	224,73	1,005	14557,44	9,5	10,86	25,1	6250	82,2	5,61	1,51	6,85	2,49
374	80,09	37,99	250000,8	1,502	230,12	1	14413,92	22,8	13,53	30,3	5910	83	5,34	1,36	7,52	2,6
376	73,82	37,83	250016,6	1,492	234,75	0,995	14264,7	26	9,93	26,9	5440	83,1	5,2	1,59	7,84	2,3
378	84,89	38,13	249987,8	1,508	225,87	1,004	14513,76	16,8	12,98	28,2	5440	82,7	5,52	1,72	7,6	2,52
380	89,25	38,21	249978,7	1,513	223,35	1,007	14598,96	16,4	9,1	31,2	5870	81,7	5,65	1,41	6,72	2,69
382	80,55	38,01	249999,5	1,502	229,83	1,001	14426,94	22,1	10,29	26,8	5425	82,4	4,09	1,63	6,29	2,56
384	72,31	37,81	250021,3	1,491	235,32	0,994	14230,08	21,2	13,39	27,9	5425	84,2	5,06	1,31	5,79	2,36
386	74,28	37,85	250014,8	1,493	234,53	0,996	14276,52	22,5	12,61	27,4	5425	83,1	5,51	1,34	5,8	2,23
388	78,63	37,95	250007,8	1,499	231,55	0,999	14368,68	14,5	8,38	30,7	5910	85,2	4,9	1,4	7,18	2,62
390	78,82	37,95	250007,2	1,499	231,3	0,999	14375,16	19,1	13,18	29	5910	82,6	4,51	1,69	6,68	2,29
392	79,62	37,97	250004,2	1,5	230,94	1	14390,4	15,9	13,73	27,7	5712	81,9	4,97	1,28	6,54	2,55
394	77,58	37,93	250009,2	1,497	232,62	0,998	14337,3	18,5	9,64	30,1	5870	82,2	5,64	1,47	8,55	2,65
396	79,62	37,97	250004	1,5	230,89	1	14393,28	20,2	10,6	30	6000	84	5,02	1,52	8,65	2,64
398	77,93	37,93	250008,5	1,498	232,18	0,998	14342,88	20,3	9,22	30,6	5545	84,6	5,79	1,7	8,03	2,29

Гістограми розподілу параметрів ВВМ

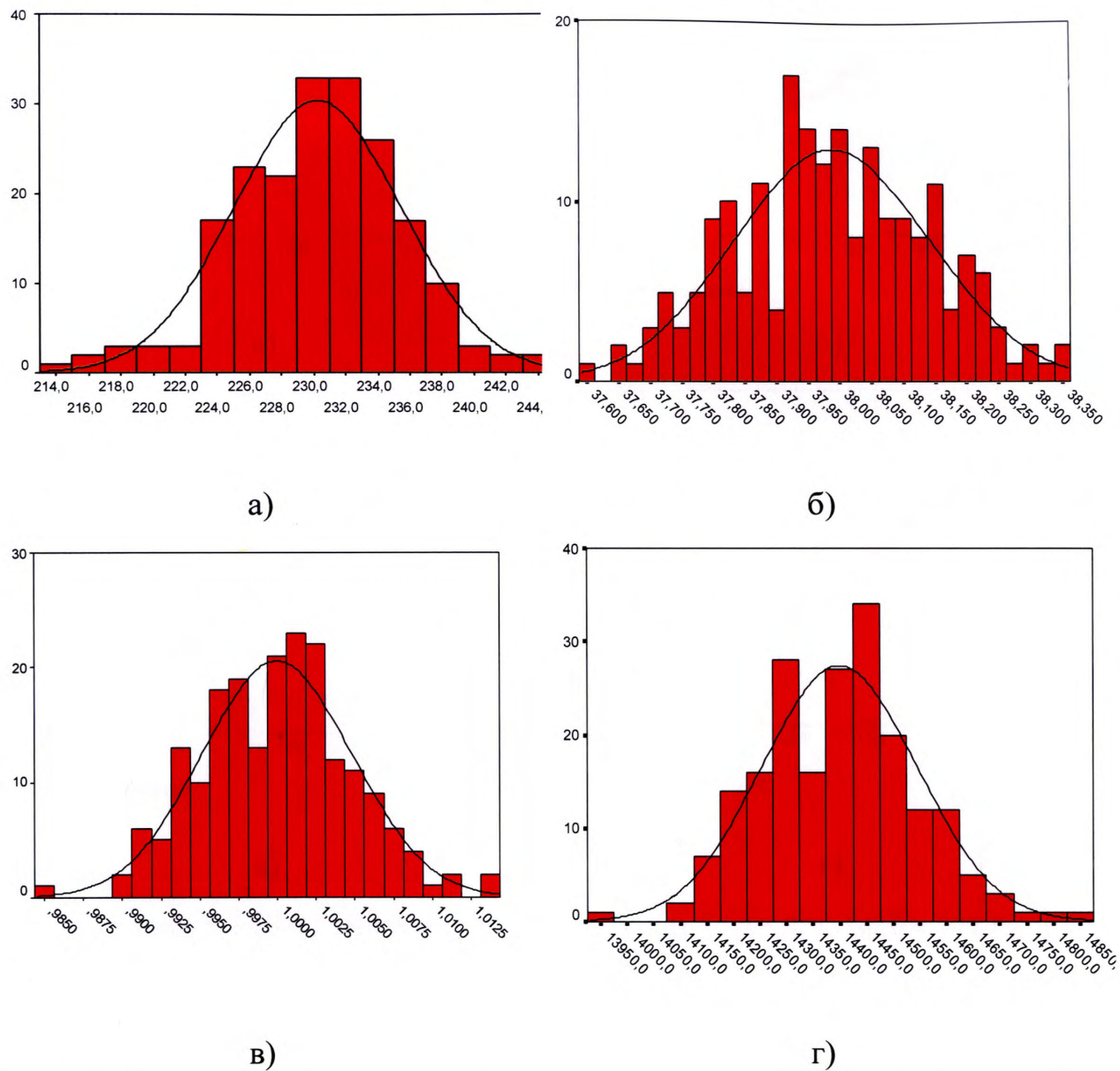
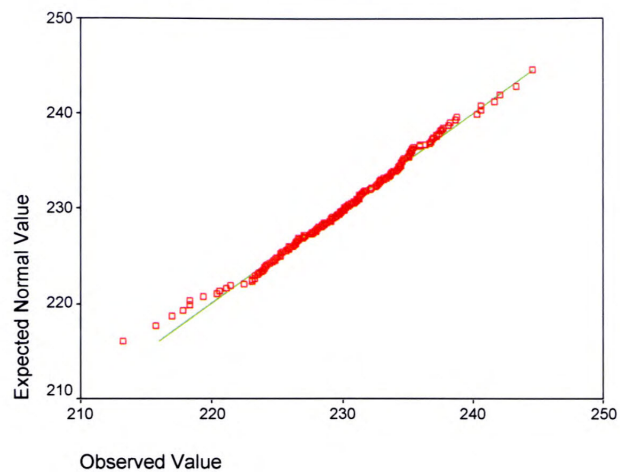
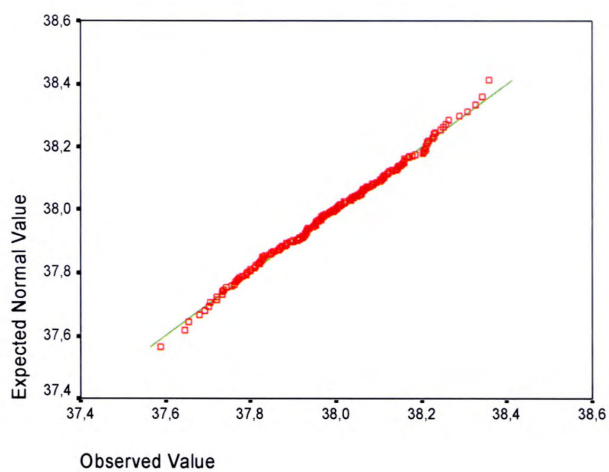


Рис. Б.1 Гістограми розподілу емпіричних частот параметрів ВВМ: а - для $T_{п}$; б - для n_c ; в - для $V_{в.с.}$; г - для $Q_{в.с.}$.

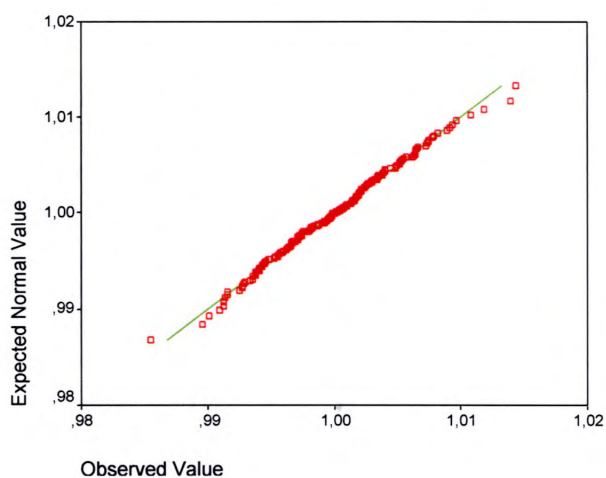
Діаграми нормального розподілу параметрів ВВМ



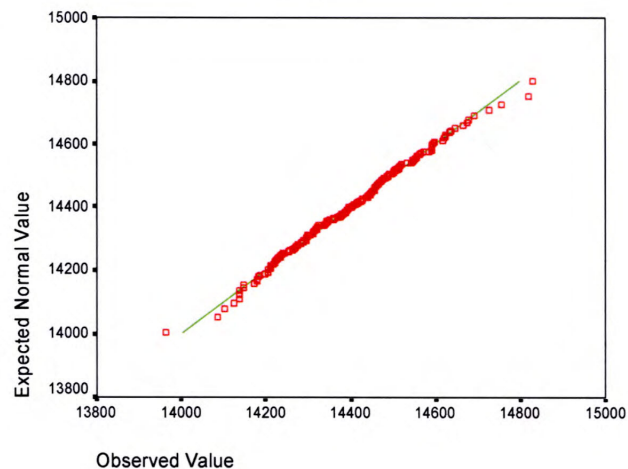
а)



б)



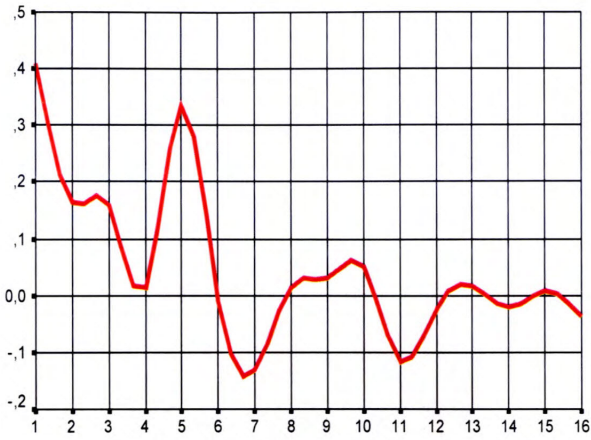
в)



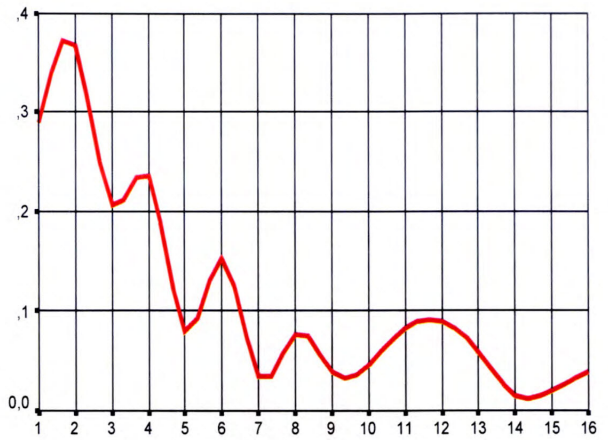
г)

Рис. Б.2 Діаграми нормального розподілу: а - для T_{II} ; б - для n_c ; в - для $V_{в.с.}$; г - для $Q_{в.с.}$.

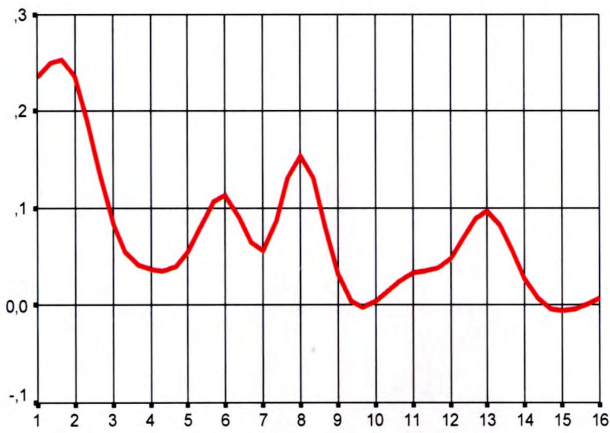
Графіки автокореляційних функцій параметрів ВВМ



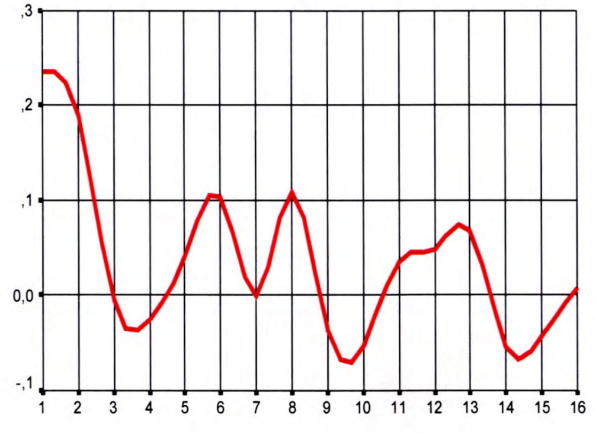
а)



б)



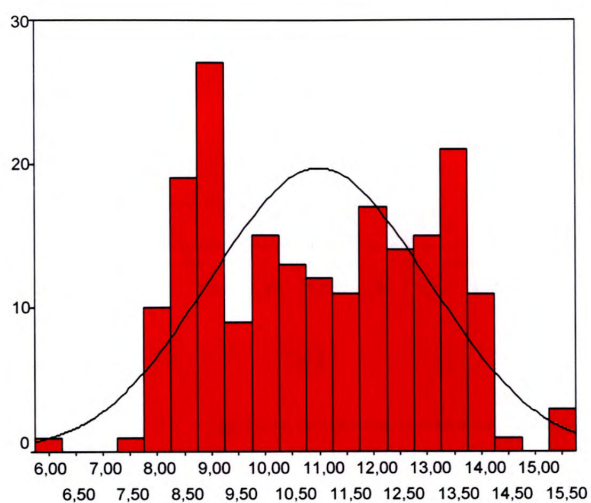
в)



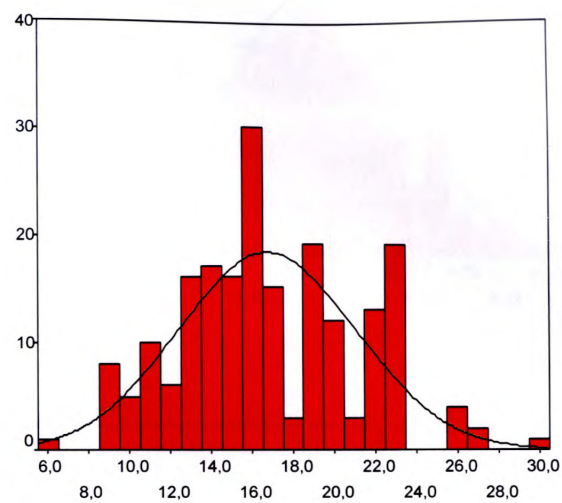
г)

Рис. Б.3 Графіки оцінки автокореляційних функцій для: а - $R_{Tn}(k\Delta T)$; б - $R_{nс}(k\Delta T)$; в - $R_{Qв.с}(k\Delta T)$; г - $R_{Bв.с}(k\Delta T)$.

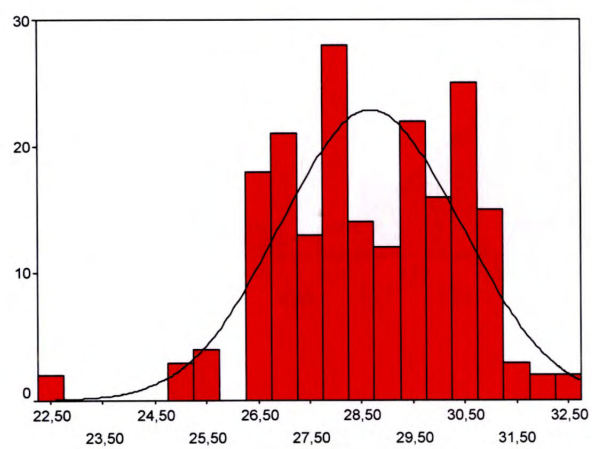
Гістограми розподілу показників, які характеризують якість помолу вугілля



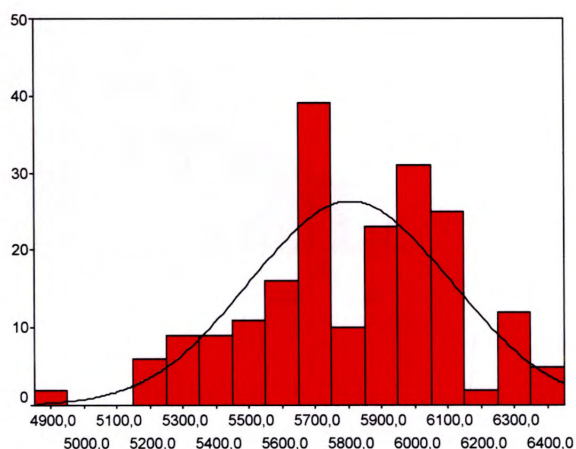
а)



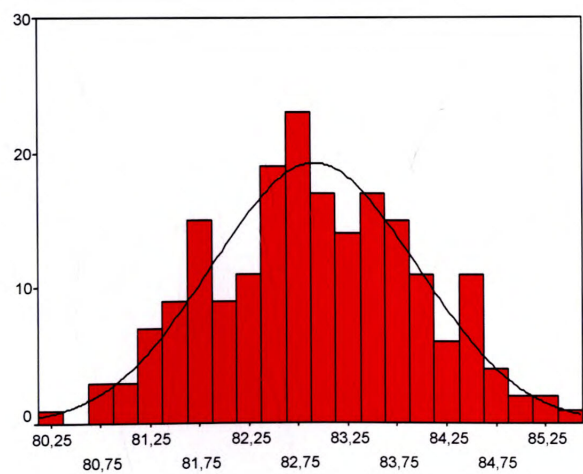
б)



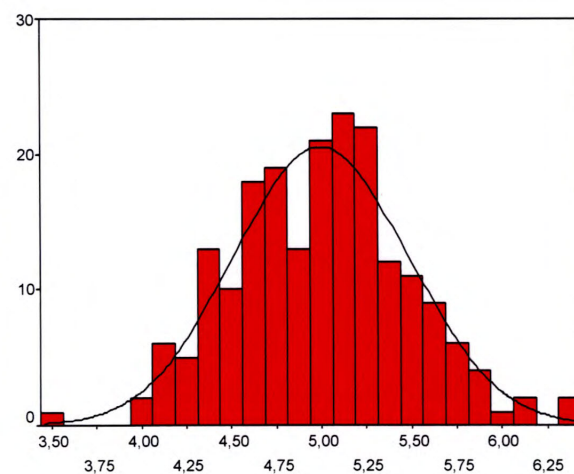
в)



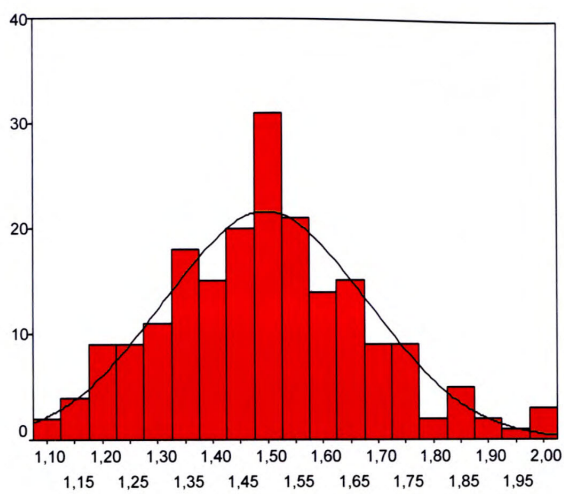
г)



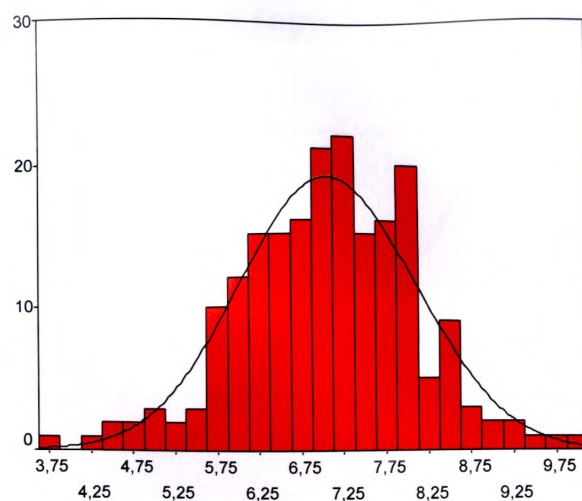
д)



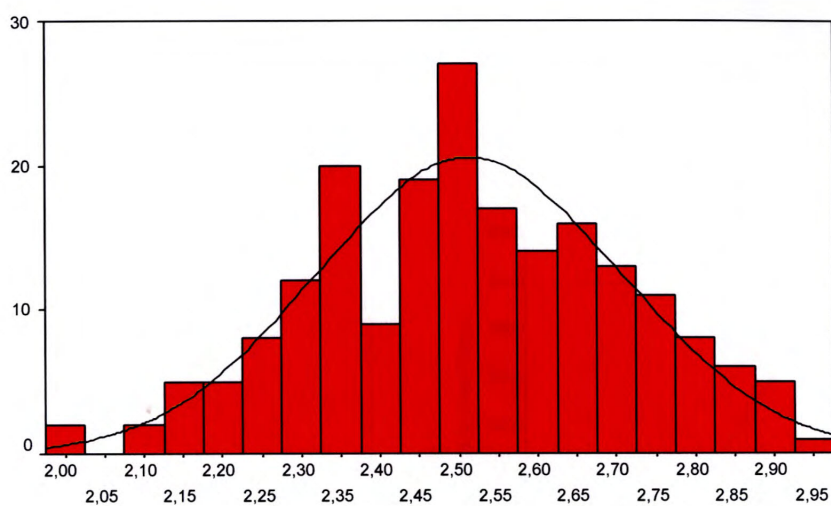
е)



ж)



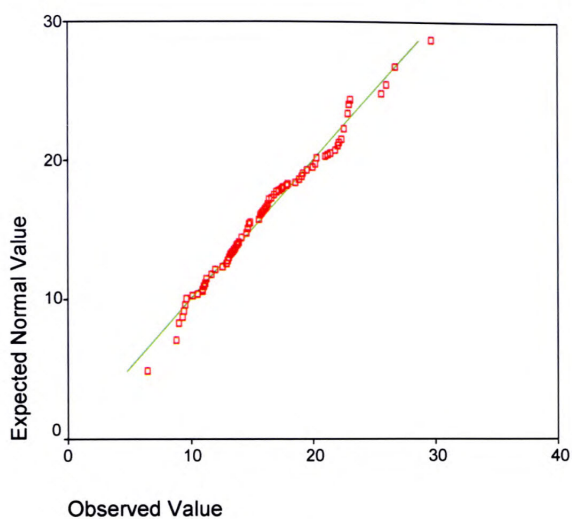
з)



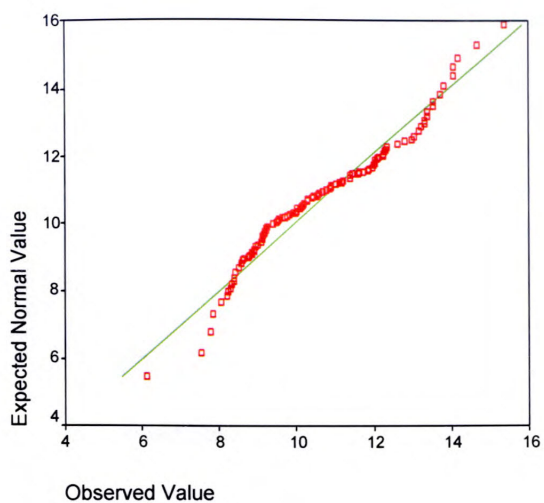
й)

Рис. Б.4 – Гістограми розподілу емпіричних частот показників якості вугілля: а - для вологості; б - для золи; в - для летючих речовин; г – для калорійності; д - для С; е - для H_2 ; ж - для N_2 ; з - для O_2 . й - для S

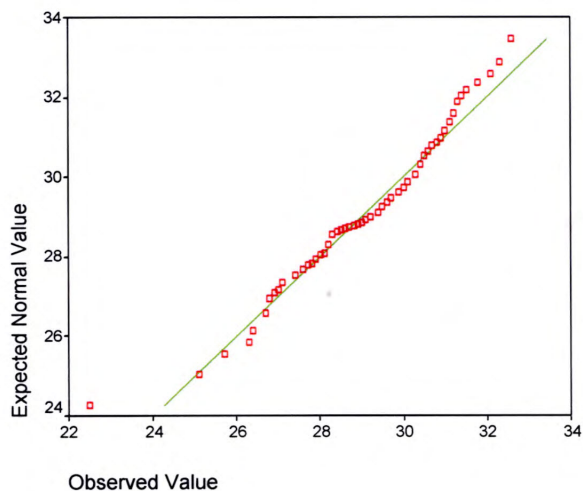
Діаграми нормального розподілу показників, які характеризують якість помолу вугілля



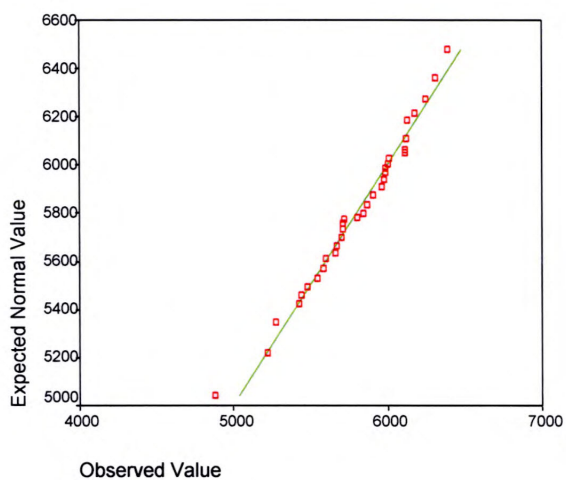
а)



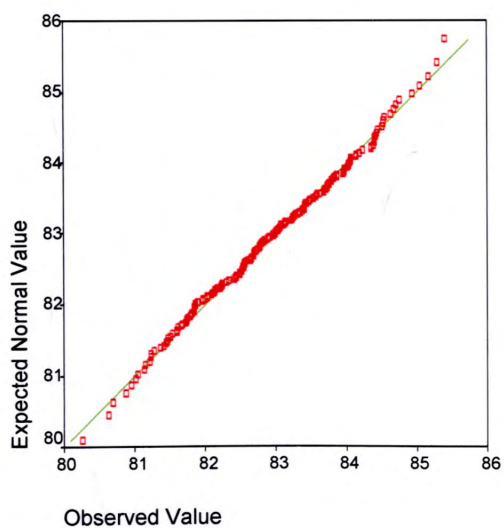
б)



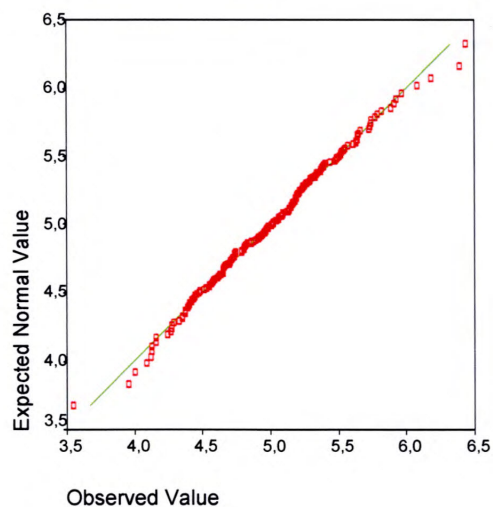
в)



г)



д)



е)

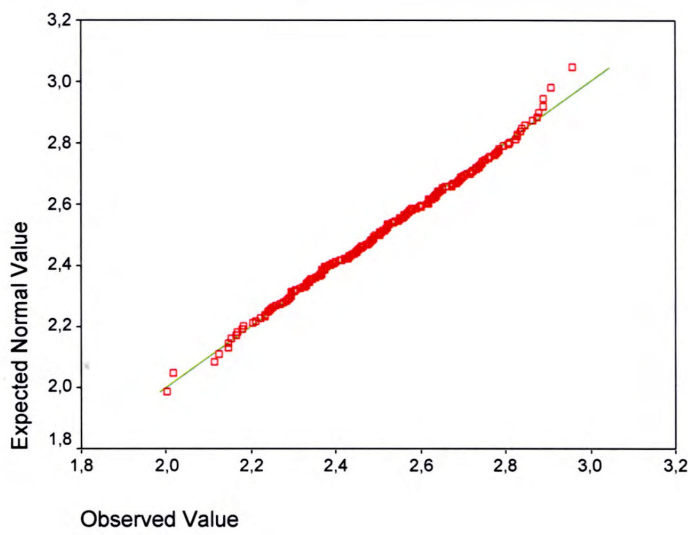
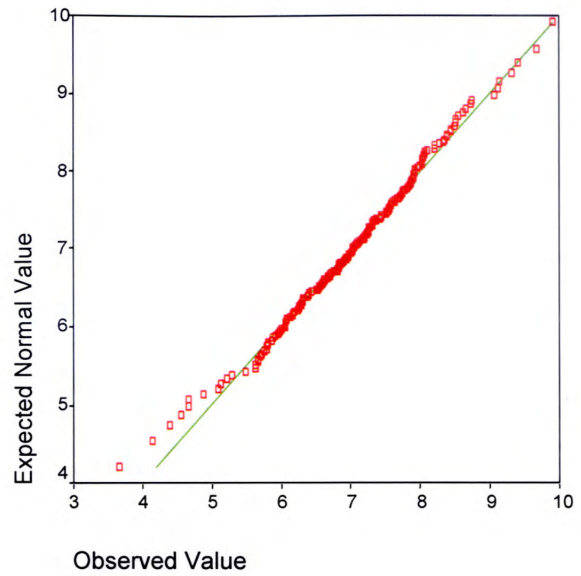
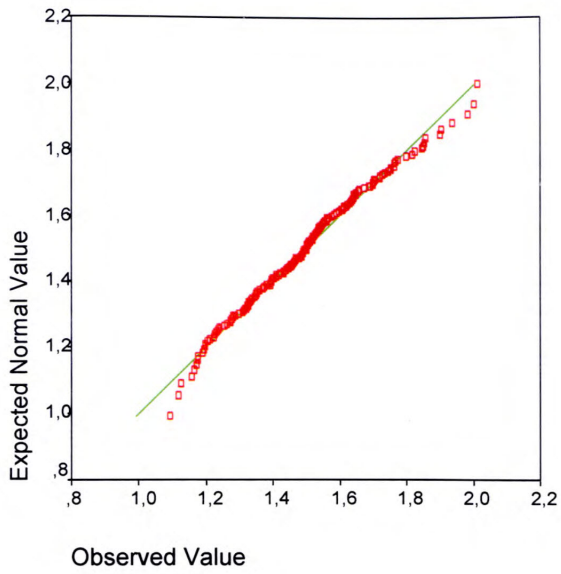
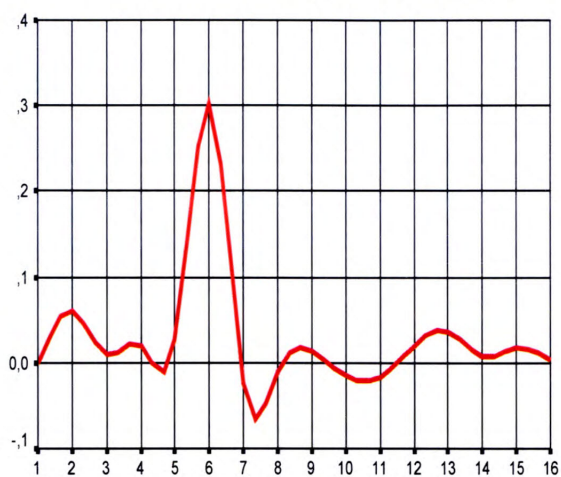
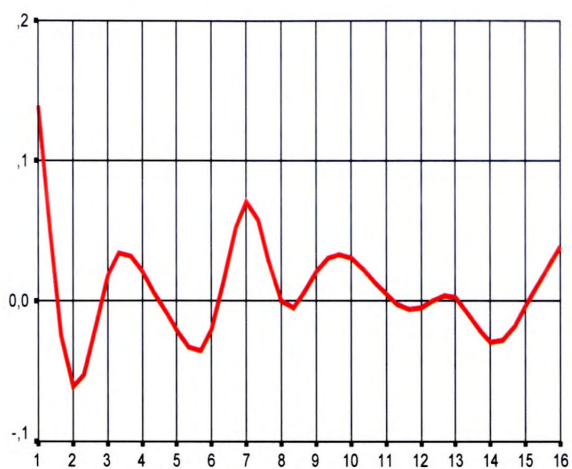


Рис. Б.5 Діаграми нормального розподілу: а - для золи; б - для вологості; в - для летючих речовин; г - для калорійності; д - для С; е - для Н₂; ж - для N₂; з - для O₂; й - для S

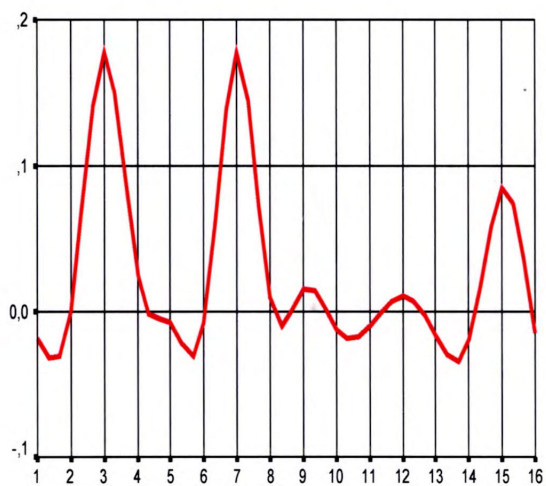
Графіки автокореляційних функцій показників, які характеризують якість помолу вугілля



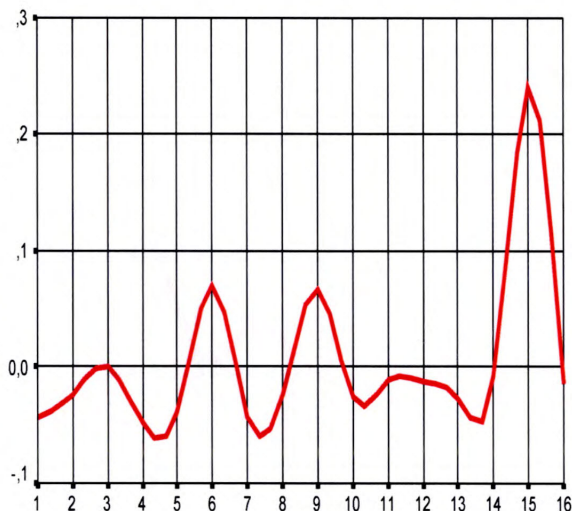
а)



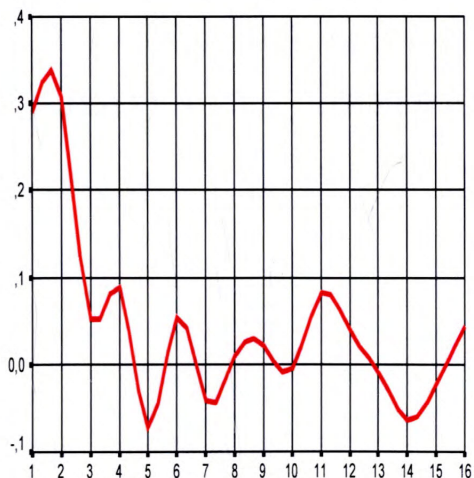
б)



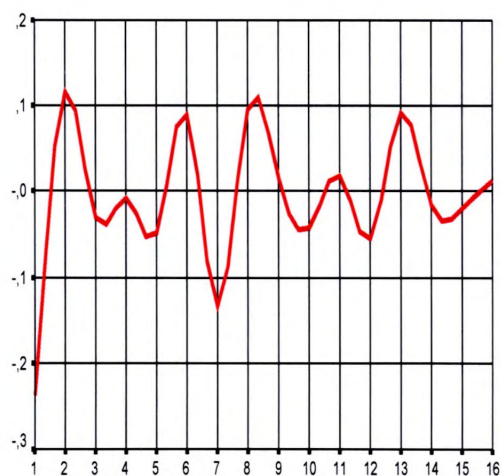
в)



г)



д)



е)

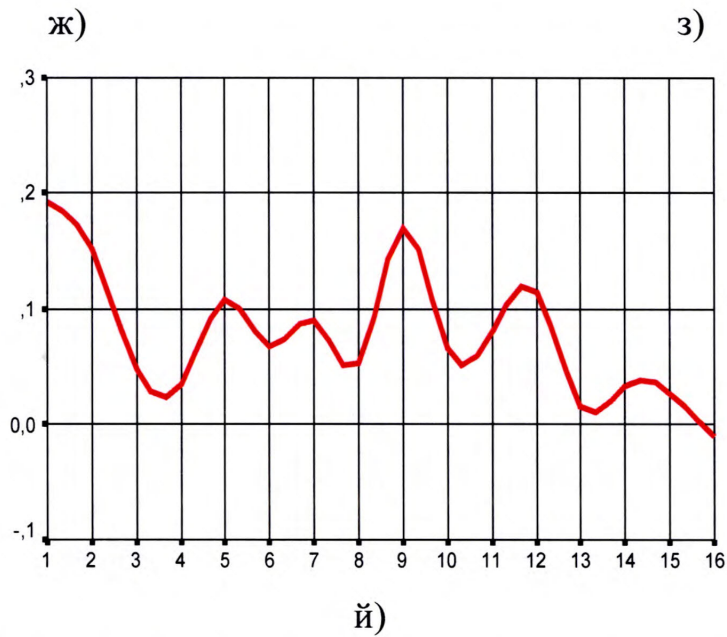
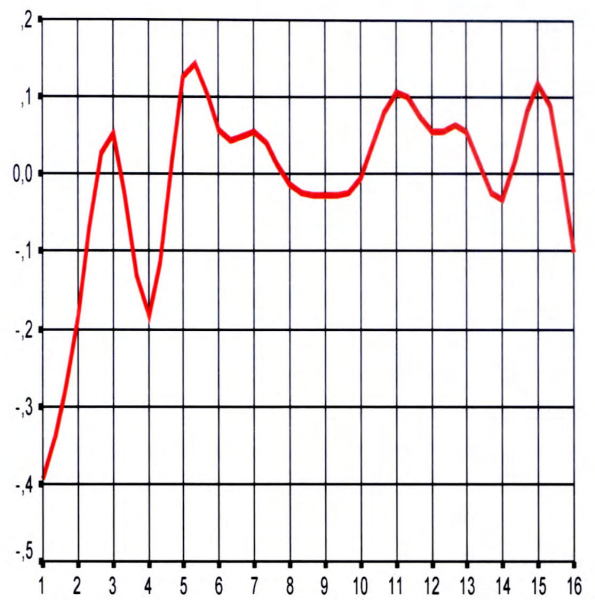
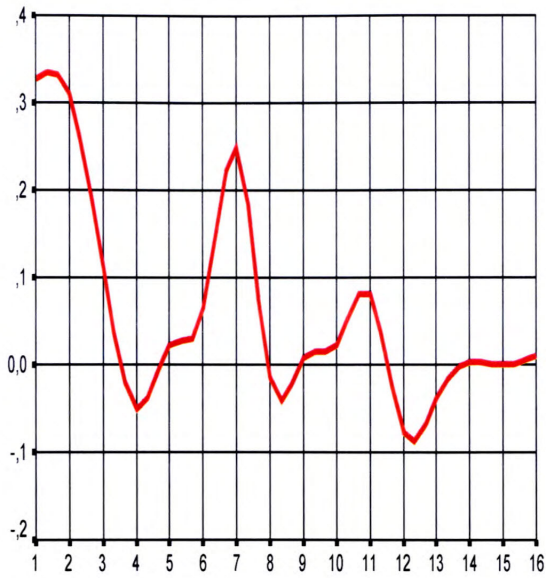


Рис. Б.6 Графіки оцінки автокореляційних функцій для: а - $R_{\text{зола}}(k\Delta T)$; б - $R_{\text{волога}}(k\Delta T)$; в - $R_{\text{лет.реч.}}(k\Delta T)$; г - $R_{\text{ккал}}(k\Delta T)$; д - $R_{\text{C}}(k\Delta T)$; е - $R_{\text{H}_2}(k\Delta T)$; ж - $R_{\text{N}_2}(k\Delta T)$ з - $R_{\text{O}_2}(k\Delta T)$; й - $R_{\text{S}}(k\Delta T)$

Статистичні характеристики вхідних і вихідних параметрів ВВМ та показників, які характеризують якість помолу вугілля

До параметрів, які характеризують ефективність процесу помолу вугілля можна віднести [20,81] вхідні параметри - частота обертання бігової доріжки помольної чаші N_c , температура гарячого повітря T_p , а також вихідні параметри - об'єму Q_{vs} і вологість V_{vs} отриманого продукту та їх чисельні характеристики.

Під час дослідження випадкових процесів були проаналізовані статистичні сукупності з метою встановлення закону розподілу випадкових величин. Статистичні характеристики досліджуваних параметрів наведені в таблицях Б.2 і Б.3, а гістограми їх розподілу та графіки нормального закону розподілу в Додатку Б.

Таблиця Б.2

Статистичні характеристики вхідних параметрів ВВМ

	T_p	N_c
N	200	200
Середнє значення	230,2649	37,9872
Стандартна помилка середнього значення	0,3700	1,096E-02
Медіана	230,4476	37,9813
Мода	213,27	37,59
Стандартне відхилення	5,2330	0,1550
Дисперсія	27,3842	2,404E-02
Асиметрія	-0,234	-0,003
Стандартна помилка асиметрії	0,172	0,172
Експес	0,469	-0,469
Стандартна помилка експесу	0,342	0,342
Розмах	31,29	0,77
Мінімум	213,27	37,59
Максимум	244,56	38,36
Сума	46052,98	7597,45

Таблиця Б.3

Статистичні характеристики вихідних параметрів ВВМ

	Q_{vs}	V_{vs}
N	200	200
Середнє значення	14399,3838	1,0000
Стандартна помилка середнього значення	10,2744	3,425E-04
Медіана	14402,9400	1,0001
Мода	14459,10	0,99
Стандартне відхилення	145,3022	4,843E-03
Дисперсія	21112,7237	2,346E-05
Асиметрія	0,138	0,138
Стандартна помилка асиметрії	0,172	0,172
Експес	0,128	0,128
Стандартна помилка експесу	0,342	0,342
Розмах	867,24	0,03
Мінімум	13963,74	0,99
Максимум	14830,98	1,01
Сума	2879876,76	200,00

Відповідність одержаного розподілу нормальному закону перевірена за критерієм Колмогорова-Смірнова. Результати тесту наведені в таблицях Б.4.

Таблиця Б.4

Результати тесту Колмогорова-Смірнова для вхідних і вихідних параметрів млина

Вимірювальна величина		T_P	N_C	Q_{vs}	V_{vs}
Кількість вибірок	N	200	200	200	200
Параметр нормального розподілу	Середнє значення	230,2649	37,9872	14399,3838	1,0000
	Середньо-квадратичне відхилення	5,2330	0,1550	145,3022	4,843E-03
Найбільше відхилення	Абсолютне	0,040	0,036	0,037	0,038
	Позитивне	0,040	0,036	0,037	0,038
	Негативне	-0,038	-0,031	-0,029	-0,027
Z Колмогорова-Смірнова		0,572	0,510	0,520	0,522
Статистичне значення		0,899	0,957	0,949	0,951

Крім того, за експериментальними даними були побудовані гістограми та діаграми розподілу емпіричних та теоретичних даних для наведених параметрів (додаток Б).

Результати оцінки відповідності розподілу випадкових величин $T_P(t)$, $N_C(t)$, $Q_{vs}(t)$, $V_{vs}(t)$ нормальному закону розподілу наведені в таблиці Б.5.

Таблиця Б.5

Результати оцінки відповідності розподілу $T_P(t)$, $N_C(t)$, $Q_{vs}(t)$, $V_{vs}(t)$ нормальному закону

№ п/п	Параметр, що досліджується	Критерій Колмогорова-Смірнова	Ймовірність узгодження	Відповідність нормальному закону ($p < 0,05$)
1	T_P	0,572	0,899	відповідає
2	N_C	0,510	0,957	відповідає
3	Q_{vs}	0,520	0,949	відповідає
4	V_{vs}	0,522	0,951	відповідає

З таблиці Б.5 видно, що для рівня значимості 0,05 емпіричний розподіл узгоджується з теоретичним для всіх досліджених параметрів млина. Кожному з цих законів відповідає своє значення дисперсії центру розподілу.

Виходячи з отриманих вище результатів можна зробити висновок, що розглянуті параметри характеризуються нормальним законом розподілу. Таким чином, дослідження закономірності розподілу даних величин, показують, що їм можуть відповідати теоретичні розподіли, які достатньо добре характеризуються першим та другим початковим та центральними моментами розподілу випадкових величин.

Досліджені випадкові процеси $P(t)$, $V_m(t)$, $T_P(t)$, $N_C(t)$, $Q_{vs}(t)$, $V_{vs}(t)$ є стаціонарним у широкому розумінні. Це дозволяє достатньо коректно використати математичний апарат ергодичних випадкових процесів при їх подальшому дослідженні.

Розглянемо додатково статистичні характеристики показників, що визначають якість процесу помолу вугілля – тонкість помолу [84] та фізико-механічні властивості вугілля, які в [2] позначалися як комплексна величина M_b . До них можна віднести золу, вологу, летючі речовини та калорійність, а також хімічний склад вугілля: C , H_2 , N_2 , O_2 , S .

Результати дослідження статистичних характеристик такого показника, як тонкість помолу, розглянуті в, показали, що виходячи з виконання достатньої умови ергодичності

стаціонарного випадкового процесу $S_n(t)$ за математичним очікуванням, досліджуваний процес зміни величини тонкості помолу вугілля є ергодичним. Враховуючи, що математичне очікування величина постійна, а автокореляційна функція є лише функцією зсуву між аргументом, вважаємо процес $S_n(t)$ стаціонарним в широкому сенсі.

Для отримання повної інформації про стан меленого вугілля необхідно знати закон розподілу кожного з компонентів та його чисельні характеристики.

Під час дослідження фізико-механічних властивостей вугілля і його хімічного складу, як випадкових величин, скористалися розглянутою вище методикою. При цьому були проаналізовані статистичні сукупності з метою встановлення закону розподілу їх випадкових величин [86]. Статистичні характеристики досліджуваних показників наведені в таблицях Б.6, Б.7.

Таблиця Б.6

Статистичні характеристики фізико-механічних властивостей вугілля

Вимірювальна величина	Зола, %	Волога, %	Летючі речовини, %	Калорійність, %
1	2	3	4	5
N	200	200	200	200
Середнє значення	16,7165	10,9980	28,6885	5806,7400
Стандартна помилка середнього значення	0,3081	0,1430	0,1232	21,3905
Медіана	16,2500	10,9100	28,5500	5845,0000
Мода	22,50	11,39	28,20	6120,00
Стандартне відхилення	4,3576	2,0221	1,7418	302,5079
Дисперсія	18,9891	4,0889	3,0338	91511,0275
Асиметрія	0,240	0,072	-0,398	-0,362
Стандартна помилка асиметрії	0,172	0,172	0,172	0,172
Експес	-0,402	-1,078	0,290	-0,145
Стандартна помилка експесу	0,342	0,342	0,342	0,342
Розмах	23,30	9,27	10,10	1512,00
Мінімум	6,40	6,13	22,50	4880,00
Максимум	29,70	15,40	32,60	6392,00
Сума	3343,31	2199,61	5737,70	1161348,00

Таблиця Б.7

Статистичні характеристики хімічного складу вугілля

Вимірювальна величина	C, %	H ₂ , %	N ₂ , %	O ₂ , %	S, %
N	200	200	200	200	200
Середнє значення	82,9150	4,9979	1,4958	7,0530	2,5132
Стандартна помилка середнього значення	7,309E-02	3,425E-02	1,304E-02	7,401E-02	1,372E-02
Медіана	82,8753	5,0098	1,4999	7,0895	2,5125
Мода	80,26	3,55	1,09	3,65	2,00
Стандартне відхилення	1,0336	0,4843	0,1844	1,0466	0,1940
Дисперсія	1,0684	0,2346	3,401E-02	1,0954	3,762E-02
Асиметрія	-0,003	0,138	0,295	-0,234	-0,080
Стандартна помилка асиметрії	0,172	0,172	0,172	0,172	0,172
Експес	-0,469	0,128	0,024	0,469	-0,456
Стандартна помилка експесу	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342
Розмах	5,14	2,89	0,92	6,26	0,96
Мінімум	80,26	3,55	1,09	3,65	2,00
Максимум	85,40	6,44	2,01	9,91	2,96
Сума	16582,99	999,59	299,16	1410,60	502,64

Відповідність одержаного розподілу нормальному закону перевірена за критерієм Колмогорова-Смірнова. Результати тесту наведені в таблицях Б.8 і Б.9.

Таблиця Б.8

Тест Колмогорова-Смірнова для фізико-механічних параметрів вугілля

Вимірювальна величина		Зола, %	Волога, %	Летючі речовини, %	Калорійність, Ккал
Кількість вибірок	N	200	200	200	200
Параметр нормального розподілу	Середнє значення	16,7166	10,9980	28,6885	5806,7402
	Середньо- квадратичне відхилення	4,3576	2,0221	1,7418	302,5079
Найбільше відхилення	Абсолютне	0,074	0,098	0,084	0,085
	Додатне	0,074	0,098	0,068	0,079
	Відємне	-0,073	-0,086	-0,084	-0,085
Z Колмогорова- Смірнова		1,047	1,382	1,181	1,207
Статистичне значення		0,223	0,044	0,123	0,109

Таблиця Б.9

Тест Колмогорова-Смірнова для хімічного складу вугілля

Вимірювальна величина		C, %	H ₂ , %	N ₂ , %	O ₂ , %	S, %
Кількість вибірок	N	200	200	200	200	200
Параметр нормального розподілу	Середнє значення	82,9150	4,9979	1,4958	7,0530	2,5132
	Середньо-квадратичне відхилення	1,0336	0,4843	0,1844	1,0466	0,1940
Найбільше відхилення	Абсолютне	0,036	0,037	0,055	0,040	0,034
	Додатне	0,036	0,037	0,055	0,040	0,034
	Відємне	-0,031	-0,029	-0,025	-0,038	-0,031
Z Колмогорова- Смірнова		0,510	0,520	0,782	0,572	0,481
Статистичне значення		0,957	0,950	0,573	0,899	0,975

Крім того, за експериментальними даними побудовані гістограми та діаграми розподілу емпіричних та теоретичних даних для наведених показників якості вугілля та його хімічного складу.

За діаграмою нормального розподілу (також званою діаграмою Q-Q) можна візуально визначити, чи достатньо близько заданий розподіл наближається до нормального. Тут кожне спостережуване значення порівнюється із значенням, очікуваним при нормальному розподілі. За умови точного виконання нормального розподілу всі значення лежать на прямій. Спостережувані значення відкладаються по осі X, а очікувані - по осі Y, при цьому всі значення піддаються стандартизації (z-перетворенню).

Для підрахунку очікуваних значень, що підпорядковуються нормальному розподілу, був запропонований метод Блома.

Якщо кількість значень, отриманих в результаті спостережень, позначити буквою n , а рангові показники цих значень буквою r ($r = 1 \dots, n$), то формула, відповідно вказаному методу, виглядатиме таким чином: Blom (Блом):

$$(r-3/8) / (n+1/4).$$

Результати оцінки відповідності емпіричного розподілу нормальному закону для показників якості вугілля і його хімічному складу наведені в таблиці Б.10.

Таблиця Б.10

Результати оцінки відповідності емпіричного розподілу нормальному закону

№ п/п	Показник, що досліджується	Критерій Колмогорова-Смірнова	Ймовірність узгодження	Відповідність нормальному закону ($p < 0,05$)
1	Зола	1,047	0,223	відповідає
2	Волога	1,382	0,044	не відповідає
3	Летючі речовини	1,181	0,123	відповідає
4	Калорійність	1,207	0,10	відповідає
5	C	0,510	0,957	відповідає
6	H ₂	0,520	0,950	відповідає
7	N ₂	0,782	0,573	відповідає
8	O ₂	0,572	0,899	відповідає
9	S	0,481	0,975	відповідає

З таблиці Б.10 видно, що для рівня значимості 0,05 емпіричний розподіл узгоджується з теоретичним для всіх параметрів, крім вологи. Однак тут розбіжність не настільки суттєва, що вимагає підбору іншого закону розподілу. Кожному з цих законів відповідає своє значення дисперсії центру розподілу. Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що дані показники якості вугілля та його хімічний склад характеризуються нормальним законом розподілу.

Таким чином, дослідження закономірностей розподілу розглянутих показників якості вугілля та його хімічного складу показує, що їм можуть відповідати теоретичні розподіли, які достатньо добре характеризуються першим і другим початковим та центральними моментами розподілу випадкових величин.

Технічні характеристики вібродавача AP21

Таблиця В.1

Параметр	Розмірність	Значення
1	2	3
Осьова чутливість	пКл/г	2
Частотний діапазон	Гц	0.5-20000
Частота резонансу	кГц	>55
Верхня границя вимірювальних прискорень	гпк	10000
Максимальний удар	гпк	20000
Температурний діапазон	°C	-60/+150
Відносна поперечна чутливість	%	<5
Деформаційна чутливість	гм/мкм	<0.005
Опір ізоляції	МОм	>10000
Ємність	пФ	600-900
П'єзоелектричний матеріал		ЦТС19
Кріплення		M5 (10-32 UNF)
Ізоляція основи		Немає
Довжина вмонтованого кабелю	м	2
Тип роз'єму		3 x 10 - 32
Місце роз'єму		збоку
Матеріал корпусу		титан (н/сталь)
Маса	г	5 (8)
Розміри	мм	9,6 x 16

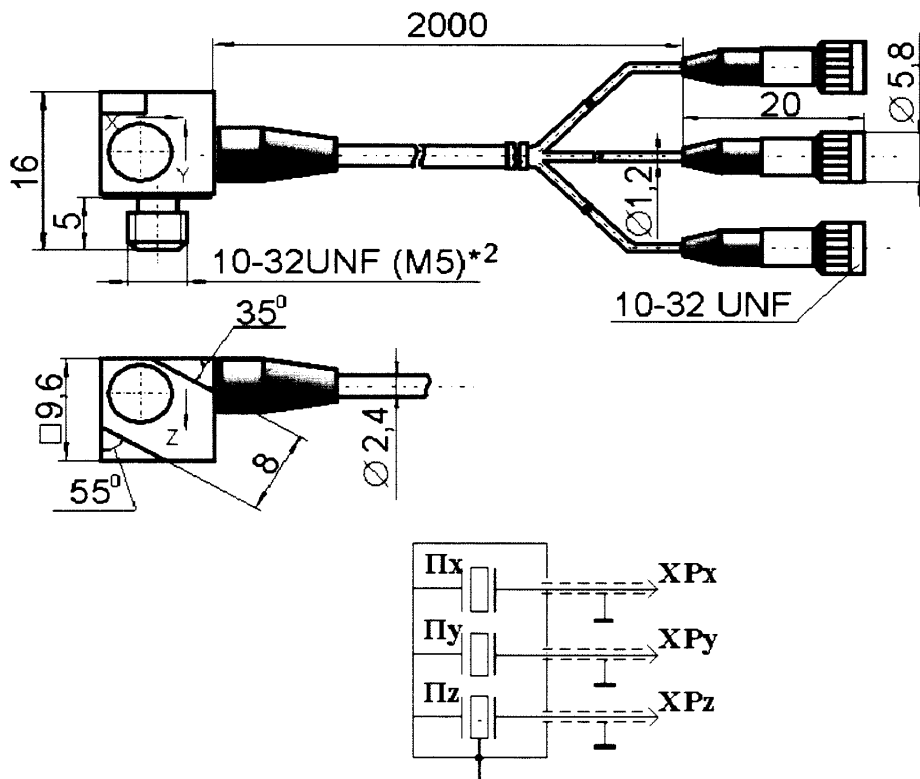


Рис. В.1 Геометричні розміри давача AP21

Приклади запису параметрів вібрації та результати ідентифікації

Приклади запису параметрів роботи (вібрації)ВВМ

27.12.07



Час виміру	Вібрація млина	Струм приводу
6:48:47	1,49	15,28
6:48:48	1,74	15,28
6:48:49	1,85	14,63
6:48:50	1,33	15,19
6:48:51	1,45	15,19
6:48:52	1,45	15,19
6:48:53	1,45	15,19
6:48:54	1,45	15,19
6:48:55	1,50	14,50
6:48:56	1,50	14,50
6:48:57	1,50	15,15
6:48:58	1,50	15,15
6:48:59	1,33	14,63
6:49:00	1,46	14,63
6:49:01	1,46	14,63
6:49:02	1,46	14,63
6:49:03	1,46	15,36
6:49:04	1,27	14,71
6:49:05	1,77	14,71
6:49:06	1,77	15,58
6:49:07	1,31	14,63
6:49:08	2,31	14,63
6:49:09	2,31	15,28
6:49:10	1,74	15,28
6:49:11	1,55	15,28
6:49:12	1,69	15,28
6:49:13	1,87	14,61
6:49:14	1,75	15,34
6:49:15	1,94	15,13
6:49:16	1,94	15,34
6:49:17	1,71	15,34

6:49:18	2,11	15,34
6:49:19	1,79	14,65
6:49:20	1,64	14,65
6:49:21	1,88	14,65
6:49:22	1,88	15,30
6:49:23	1,88	15,30
6:49:24	2,20	14,76
6:49:25	2,36	14,76
6:49:26	2,36	14,76
6:49:27	1,91	14,76
6:49:28	1,71	14,76
6:49:29	2,23	14,76
6:49:30	1,61	15,41
6:49:31	1,73	15,41
6:49:32	2,03	14,63
6:49:33	2,03	15,52
6:49:34	2,03	15,52
6:49:35	1,88	14,43
6:49:36	2,14	14,43
6:49:37	2,14	14,43
6:49:38	1,45	15,13
6:49:39	1,45	15,13
6:49:40	1,45	14,58
6:49:41	1,45	14,58
6:49:42	1,75	15,39
6:49:43	1,75	14,74
6:49:44	1,57	14,74
6:49:45	1,40	15,45

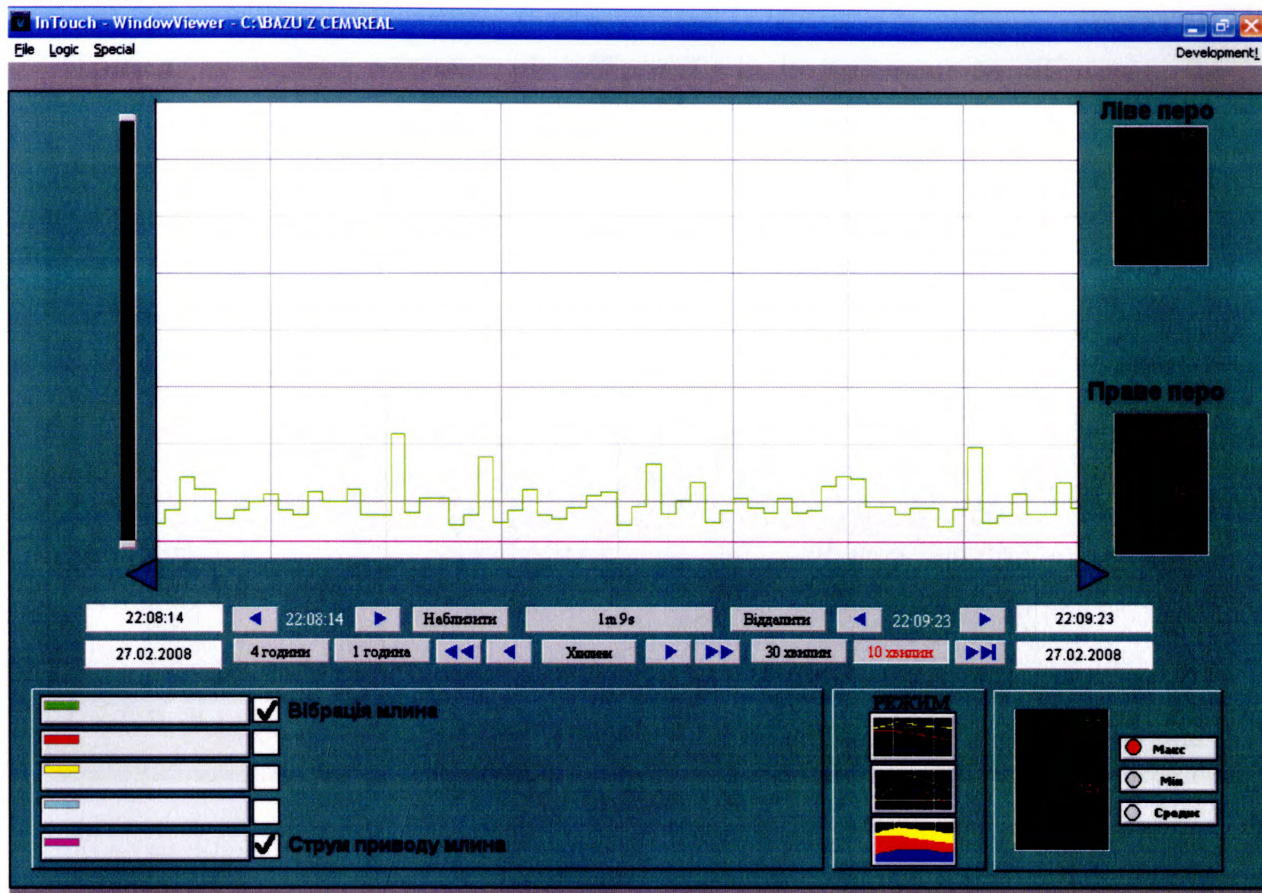
27.02.08



Час заміру	Вібрація млина	Струм привоуду
17:05:51	3,10	12,59
17:05:52	2,46	12,59
17:05:53	7,07	12,59
17:05:54	4,92	12,59
17:05:55	2,53	12,59
17:05:56	2,53	12,59
17:05:57	4,37	12,59
17:05:58	4,91	12,59
17:05:59	3,21	12,59
17:06:00	2,75	12,59
17:06:01	2,42	12,59
17:06:02	2,98	12,59
17:06:03	2,98	12,59
17:06:04	3,67	13,09
17:06:05	3,85	13,09
17:06:06	2,63	12,13
17:06:07	4,80	12,13
17:06:08	3,61	12,13
17:06:09	3,61	12,13
17:06:10	2,72	12,13
17:06:11	2,23	12,13
17:06:12	3,99	12,13
17:06:13	3,05	12,13
17:06:14	3,16	12,13
17:06:15	3,16	12,13
17:06:16	3,16	12,13
17:06:17	3,02	12,13
17:06:18	4,22	12,13
17:06:19	2,70	12,13
17:06:20	2,16	12,13
17:06:21	2,41	12,13

17:06:22	2,80	12,13
17:06:23	1,99	12,13
17:06:24	3,11	12,13
17:06:25	2,71	12,13
17:06:26	4,08	12,87
17:06:27	2,97	12,87
17:06:28	2,76	12,87
17:06:29	3,47	12,87
17:06:30	2,85	12,87
17:06:31	2,85	12,87
17:06:32	2,85	12,87
17:06:33	2,11	12,87
17:06:34	2,43	12,09
17:06:35	2,92	12,09
17:06:36	2,78	12,09
17:06:37	2,78	12,09
17:06:38	2,78	13,19
17:06:39	3,22	11,87
17:06:40	2,38	12,52
17:06:41	1,93	12,52
17:06:42	1,93	12,52
17:06:43	2,66	12,52
17:06:44	2,95	12,52
17:06:45	2,09	12,52
17:06:46	2,41	12,52
17:06:47	1,53	12,52
17:06:48	3,58	11,91
17:06:49	3,58	11,91

26.03.08



Час заміру	Вібрація млина
22:08:14	1,53
22:08:15	2,12
22:08:16	3,54
22:08:17	3,02
22:08:18	3,02
22:08:19	1,73
22:08:20	2,09
22:08:21	2,51
22:08:22	2,82
22:08:23	2,09
22:08:24	1,89
22:08:25	2,89
22:08:26	2,89
22:08:27	2,89
22:08:28	3,04
22:08:29	1,92
22:08:30	1,92
22:08:31	5,50
22:08:32	2,00
22:08:33	2,63
22:08:34	2,63
22:08:35	1,47
22:08:36	1,47
22:08:37	1,87
22:08:38	4,45
22:08:39	1,59
22:08:40	2,11
22:08:41	3,04
22:08:42	1,91
22:08:43	1,72
22:08:44	2,22
22:08:45	2,22
22:08:46	2,75
22:08:47	2,90
22:08:48	1,48
22:08:49	2,25
22:08:50	4,12
22:08:51	1,94
22:08:52	1,94
22:08:53	2,56
22:08:54	3,37

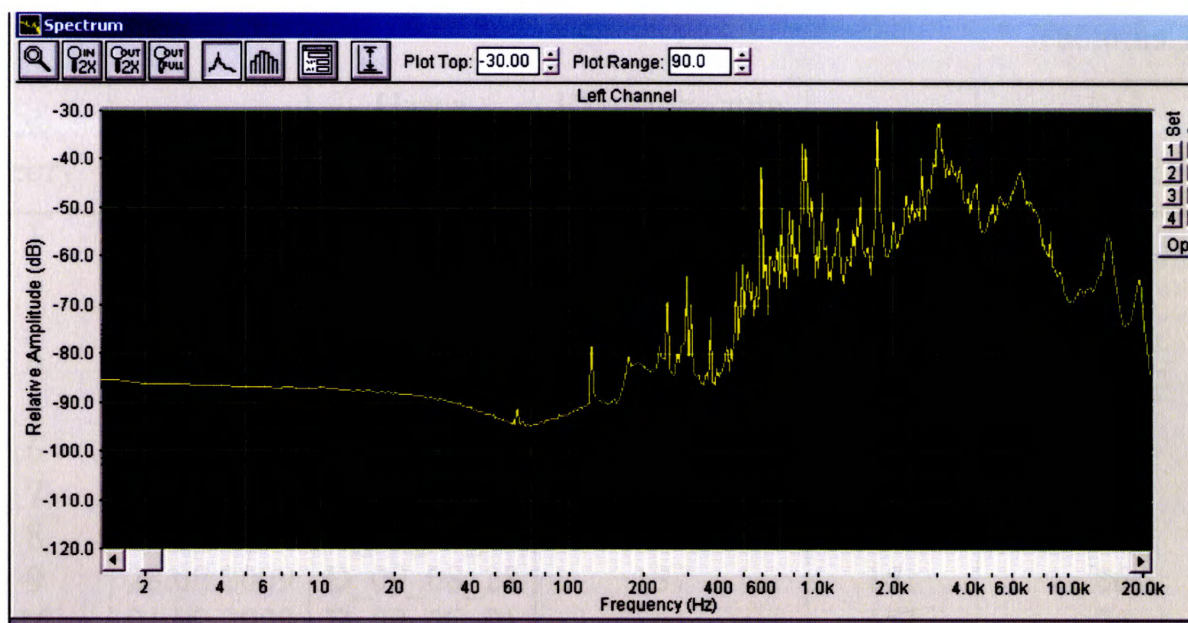
22:08:55	1,56
22:08:56	2,11
22:08:57	2,63
22:08:58	2,20
22:08:59	2,00
22:09:00	2,66
22:09:01	1,99
22:09:02	2,12
22:09:03	3,17
22:09:04	3,17
22:09:05	3,63
22:09:06	3,51
22:09:07	2,30
22:09:08	2,30
22:09:09	1,94
22:09:10	2,24
22:09:11	2,24
22:09:12	1,44

Час заміру	Вібрація млина	Перепад тиску	Струм приводу
18:05:25	1,87	14,37	3,38
18:05:26	1,87	14,37	3,38
18:05:27	2,64	14,37	3,38
18:05:28	2,31	14,37	3,38
18:05:29	1,97	14,37	3,38
18:05:30	2,23	14,37	3,38
18:05:31	2,12	14,37	3,28
18:05:32	1,79	14,37	3,28
18:05:33	1,79	14,37	3,28
18:05:34	1,79	14,37	3,28
18:05:35	3,15	14,37	3,28
18:05:36	2,12	14,37	3,28
18:05:37	2,12	14,37	3,28
18:05:38	2,29	14,37	3,28
18:05:39	2,29	14,37	3,28
18:05:40	1,83	14,37	3,28
18:05:41	2,51	14,37	3,28
18:05:42	2,23	15,15	3,28
18:05:43	2,23	15,15	3,28

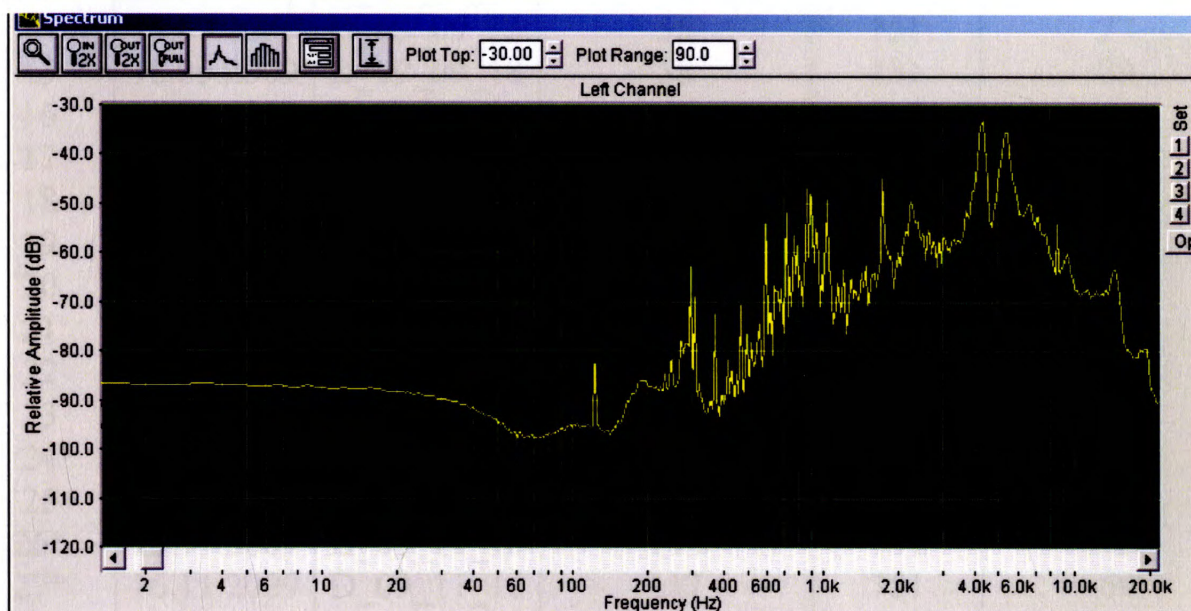
18:05:44	1,91	15,15	3,28
18:05:45	1,49	14,26	3,28
18:05:46	1,77	14,26	3,28
18:05:47	1,66	14,26	3,28
18:05:48	4,41	14,26	3,28
18:05:49	2,14	14,26	3,28
18:05:50	6,40	14,26	3,28
18:05:51	2,30	14,26	3,28
18:05:52	2,15	14,26	3,28
18:05:53	1,74	14,26	3,28
18:05:54	1,50	14,26	3,28
18:05:55	1,63	14,26	3,28
18:05:56	1,63	14,26	3,28
18:05:57	1,63	15,04	3,28
18:05:58	1,63	15,04	3,28
18:05:59	1,89	15,04	3,28
18:06:00	1,89	15,04	3,28
18:06:01	1,89	15,04	3,28
18:06:02	1,45	14,50	3,28
18:06:03	2,28	14,50	3,28
18:06:04	2,28	14,50	3,28
18:06:05	3,28	14,50	3,28
18:06:06	3,07	14,50	3,28
18:06:07	2,34	14,50	3,28
18:06:08	2,34	14,50	3,28
18:06:09	1,82	14,50	3,38
18:06:10	2,60	14,50	3,38
18:06:11	1,50	14,50	3,38
18:06:12	2,21	14,50	3,38
18:06:13	2,47	14,50	3,38
18:06:14	1,89	14,50	3,38
18:06:15	1,60	14,50	3,38
18:06:16	2,93	14,50	3,38
18:06:17	1,87	14,50	3,38
18:06:18	2,05	14,50	3,38
18:06:19	2,17	14,50	3,38
18:06:20	2,17	14,50	3,38
18:06:21	2,23	14,50	3,38
18:06:22	1,56	14,50	3,38
18:06:23	1,83	14,50	3,38

Вібрація: мін- 1,5, макс- 6,4, сер- 2,

Додаток Г1

Приклади запису параметрів вібрації з використанням вібродавача
AP 21

21.05.2008 – X



21.05.2008 – Y

Додаток Д

Перелік проведених експериментів по зняттю перехідних характеристик
ВВМ

Таблиця Д.1

№ тесту	Дата	Назва файлу даних	Кількість днів з початку експерименту	<i>L</i>	<i>n</i>
1	22.07.2009	D_09_07_22	0	501	394
2	31.07.2009	D_09_07_31	9	101	47
3	05.08.2009	D_09_08_05	14	151	84
4	10.08.2009	D_09_08_10	19	151	91
5	13.08.2009	D_09_08_13	22	151	77
6	17.08.2009	D_09_08_17	26	151	67
7	20.08.2009	D_09_08_20	29	151	94
8	25.08.2009	D_09_08_25	34	151	94
9	28.08.2009	D_09_08_28	37	151	86
10	01.09.2009	D_09_09_01	41	151	76
11	04.09.2009	D_09_09_04	44	151	81
12	07.09.2009	D_09_09_07	47	151	75
13	10.09.2009	D_09_09_10	50	151	103
14	15.09.2009	D_09_09_15	55	151	77
15	18.09.2009	D_09_09_18	58	151	89
16	22.09.2009	D_09_09_22	62	151	80
17	29.09.2009	D_09_09_29	69	151	68
18	05.10.2009	D_09_10_05	75	151	74
19	09.10.2009	D_09_10_09	79	151	72
20	12.10.2009	D_09_10_12	82	151	93
21	16.10.2009	D_09_10_16	86	151	73
22	20.10.2009	D_09_10_20	90	752	58
23	23.10.2009	D_09_10_23	93	751	61
24	30.10.2009	D_09_10_30	100	751	75
25	06.11.2009	D_09_11_06	107	751	67
26*	13.11.2009	D_09_11_13	114	751	72
27*	16.11.2009	D_09_11_16	117	751	69
28*	20.11.2009	D_09_11_20	121	751	66
29*	27.11.2009	D_09_11_27	128	751	59

Додаток Д1

Тести matlab-програм та результати їх роботи

Перші оператори програми 9..11 призначені для знищення змінних та графіків попереднього запуску. Оператори 13..15 друкують заголовок виводу. Далі, 17..19 вводяться початкова та кінцева дати експерименту і лічильник тестів.

Операторами 23.. 221 формується цикл WHILE, у якому здійснюється перебіг усіх дат. Оператор вибору SWITCH (24..219), вибирає з них дати проведення тестів. При цьому для кожного тесту відкривається файл даних (наприклад, D_09_07_22), вводиться номер *ni* елемента, з якого починається встановлений режим пускової характеристики (скорочено «хвіст»), визначається кількість днів від початку експерименту *kn* та формується рядок ST, що використовується у заголовку графіка. Тут можна зауважити, що MatLab 6.5 не дозволяє ввід у графіки кирилиці, тому всі надписи на графіках виконуються англійською.

Вказані вище оператори використовуються в кожній з наступних програм без додаткових пояснень.

Команди 202..218 утворюють цикл, який виконується, якщо поточний файл даних не є порожнім. У цьому циклі для кожного тесту формують «хвіст» (203), знаходять для нього середнє значення (204) та друкують його (206). Два цикли з логічними умовами виконання призначені для виділення тестів 1-ої та 2-ої груп. З оператора 222 починається побудова графіку. У 223..236 будуються додаткові функції для штриховки зеленої та жовтої зон постійності середніх. Графік виводиться трьома операторами PLOT (240, 242, 244) з використанням операторів зв'язку HOLD ON. У кінці програми (248..251) виводяться на друк номери тестів 1-ої та 2-ої груп *m1* та *m2*.

Текст програми:

```

A.1 Виділення тестів 1-ої групи
    A.1.1 Текст програми
    >> dbtype all_means

1  %all means
2  % Обчислюються середні "хвостів" для всіх
тестів
3  % та будується графік, що дозволить обрати
ділянки
4  % постійності середних. Тести поділяються
на дві групи:
5  % 1 група -середні у діапазоні 192..194 імп.
6  % 2 група -середні у діапазоні 196..199 імп.
7  % виводяться номери тестів 1-ої та 2-ої груп.
8
9  clear
10 clc
11 close all
12
13 disp('    Середні "хвостів" розгонних хар-к');
14 disp('        тести 1..29');
15 disp('№ теста    Дата        Середні, імп
');
16
17 dat1=datetime(2009,7,22); % початкова
дата
18 dat2=datetime(2009,11,27); % кінцева дата
19 kk=0;
20 ii=0;
21 jj=0;
22 dat=dat1;
23 while dat<=dat2
24     switch dat
25         case datetime(2009,7,22)
26             D_09_07_22
27                 nn=395;
28                 kk=kk+1;
29                 ST(1).title='Test N1, date 22.07.2009';
30                 dn(kk)=dat-dat1;
31         case datetime(2009,7,31)
32             D_09_07_31
33                 nn=46;
34                 kk=kk+1;
35                 ST(2).title=['Test N2, date 31.07.2009'];
36                 dn(kk)=dat-dat1;
37         case datetime(2009,8,05)
38             D_09_08_05
39                 nn=84;
40                 kk=kk+1;
41                 ST(3).title='Test N3, date 05.08.2009';
42                 dn(kk)=dat-dat1;
43         case datetime(2009,8,10)
44             D_09_08_10
45                 nn=91;
46                 kk=kk+1;
47                 ST(4).title='Test N4, date 10.08.2009';
48                 dn(kk)=dat-dat1;
49         case datetime(2009,8,13)
50             D_09_08_13
51                 nn=77;
52                 kk=kk+1;
53                 ST(5).title='Test N5, date
13.08.2009';
54                 dn(kk)=dat-dat1;
55         case datetime(2009,8,17)
56             D_09_08_17
57                 nn=67;
58                 kk=kk+1;
59                 ST(6).title='Test N6, date 17.08.2009';
60                 dn(kk)=dat-dat1;
61         case datetime(2009,8,20)
62             D_09_08_20
63                 nn=94;
64                 kk=kk+1;
65                 ST(7).title='Test N7, date
20.08.2009';
66                 dn(kk)=dat-dat1;
67         case datetime(2009,8,25)
68             D_09_08_25
69                 nn=94;
70                 kk=kk+1;
71                 ST(8).title='Test N8, date
25.08.2009';
72                 dn(kk)=dat-dat1;
73         case datetime(2009,8,28)
74             D_09_08_28
75                 nn=86;
76                 kk=kk+1;
77                 ST(9).title='Test N9, date
28.08.2009';
78                 dn(kk)=dat-dat1;
79         case datetime(2009,9,1)
80             D_09_09_01
81                 nn=76;
82                 kk=kk+1;
83                 ST(10).title='Test N10, date
01.09.2009';
84                 dn(kk)=dat-dat1;
85         case datetime(2009,9,4)
86             D_09_09_04
87                 nn=81;
88                 kk=kk+1;
89                 ST(11).title='Test N11, date
04.09.2009';
90                 dn(kk)=dat-dat1;
91         case datetime(2009,9,7)
92             D_09_09_07
93                 nn=75;
94                 kk=kk+1;
95                 ST(12).title='Test N12, date
07.09.2009';
96                 dn(kk)=dat-dat1;
97         case datetime(2009,9,10)
98             D_09_09_10
99                 nn=103;
100                kk=kk+1;
101                ST(13).title='Test N13, date
10.09.2009';
102                dn(kk)=dat-dat1;
103                case datetime(2009,9,15)

```

```

104     D_09_09_15
105     nn=77;
106     kk=kk+1;
107     ST(14).title='Test N14, date
15.09.2009';
108     dn(kk)=dat-dat1;
109     case datenum(2009,9,18)
110     D_09_09_18
111     nn=89;
112     kk=kk+1;
113     ST(15).title='Test N15, date
18.09.2009';
114     dn(kk)=dat-dat1;
115     case datenum(2009,9,22)
116     D_09_09_22
117     nn=80;
118     kk=kk+1;
119     ST(16).title='Test N16, date
22.09.2009';
120     dn(kk)=dat-dat1;
121     case datenum(2009,9,29)
122     D_09_09_29
123     nn=68;
124     kk=kk+1;
125     ST(17).title='Test N17, date
29.09.2009';
126     dn(kk)=dat-dat1;
127     case datenum(2009,10,5)
128     D_09_10_05
129     nn=74;
130     kk=kk+1;
131     ST(18).title='Test N18, date
05.10.2009';
132     dn(kk)=dat-dat1;
133     case datenum(2009,10,9)
134     D_09_10_09
135     nn=72;
136     kk=kk+1;
137     ST(19).title='Test N19, date
09.10.2009';
138     dn(kk)=dat-dat1;
139     case datenum(2009,10,12)
140     D_09_10_12
141     nn=93;
142     kk=kk+1;
143     ST(20).title='Test N20, date
12.10.2009';
144     dn(kk)=dat-dat1;
145     case datenum(2009,10,16)
146     D_09_10_16
147     nn=73;
148     kk=kk+1;
149     ST(21).title='Test N21, date
16.10.2009';
150     dn(kk)=dat-dat1;
151     case datenum(2009,10,20)
152     D_09_10_20
153     nn=58;
154     kk=kk+1;
155     ST(22).title='Test N22, date
20.10.2009';
156     dn(kk)=dat-dat1;
157     case datenum(2009,10,23)
158     D_09_10_23
159     nn=61;
160     kk=kk+1;
161     ST(23).title='Test N23, date
23.10.2009';
162     dn(kk)=dat-dat1;
163     case datenum(2009,10,30)
164     D_09_10_30
165     nn=75;
166     kk=kk+1;
167     ST(24).title='Test N24, date
30.10.2009';
168     dn(kk)=dat-dat1;
169     case datenum(2009,11,06)
170     D_09_11_06
171     nn=67;
172     kk=kk+1;
173     ST(25).title='Test N25, date
06.11.2009';
174     dn(kk)=dat-dat1;
175     case datenum(2009,11,13)
176     D_09_11_13
177     nn=72;
178     kk=kk+1;
179     ST(26).title='Test N26, date
13.11.2009';
180     dn(kk)=dat-dat1;
181     case datenum(2009,11,16)
182     D_09_11_16
183     nn=69;
184     kk=kk+1;
185     ST(27).title='Test N27, date
16.11.2009';
186     dn(kk)=dat-dat1;
187     case datenum(2009,11,20)
188     D_09_11_20
189     nn=66;
190     kk=kk+1;
191     ST(28).title='Test N28, date
20.11.2009';
192     dn(kk)=dat-dat1;
193     case datenum(2009,11,27)
194     D_09_11_27
195     nn=59;
196     kk=kk+1;
197     ST(29).title='Test N29, date
27.11.2009';
198     dn(kk)=dat-dat1;
199     otherwise
200     D_09
201     end
202     if ~isempty(h)           % якщо h - не
пустий
203     h=[h(nn:end)];
204     Me(kk)=mean(h);
205     s1=' %s  %7.4f\n';
206     fprintf(s1, ST(kk).title, Me(kk))
207     % тести 1-ої групи
208     if 192<Me(kk) & Me(kk)<194
209     ii=ii+1;
210     m1(ii)=kk;           % номери тестів
1-ої групи
211     Me1(ii)=Me(kk);

```

```

212     end
213     %тесті 2-ої групи
214     if 196<Me(kk) & Me(kk)<199
215         jj=jj+1;
216         m2(jj)=kk;           % номери
тестів 2-ої групи
217         Me2(jj)=Me(kk);
218     end
219 end
220 dat=dat+1;
221 end
222 % побудова графіка
223 for i=1:120 % зелена зона штриховки
224     if mod(i,2)==0
225         first(i)=194;
226     else
227         first(i)=192;
228     end
229 end
230 for i=1:120 % жовта зона штриховки
231     if mod(i,2)==0
232         second(i)=198;
233     else
234         second(i)=196;
235     end
236 end
237 lin=linspace(1,30,120);
238 xxx=dn; % масив проміжків між
тестами у днях
239 figure
240 plot(Me),grid
241 hold on
242 plot(lin,first,'g')
243 hold on
244 plot(lin,second,'y')
245 title('Change of mean');
246 xlabel('Test number');
247 ylabel('Impulses');
248 disp('   Номери тестів 1-ої групи')
249 m1
250 disp('   Номери тестів 2-ої групи')
251 m2

```

>>

А.1.2 Вихід програми

Середні "хвостів" розгонних хар-к

тести 1..29		
№ теста	Дата	Середні, імп
Test N1,	date 22.07.2009	189.7290
Test N2,	date 31.07.2009	196.0893
Test N3,	date 05.08.2009	197.2059
Test N4,	date 10.08.2009	196.1148
Test N5,	date 13.08.2009	198.0800
Test N6,	date 17.08.2009	195.4353
Test N7,	date 20.08.2009	190.0517
Test N8,	date 25.08.2009	193.3793
Test N9,	date 28.08.2009	192.6212
Test N10,	date 01.09.2009	193.0921
Test N11,	date 04.09.2009	193.0141
Test N12,	date 07.09.2009	196.2987
Test N13,	date 10.09.2009	196.0408
Test N14,	date 15.09.2009	197.1467
Test N15,	date 18.09.2009	192.4444
Test N16,	date 22.09.2009	196.6250
Test N17,	date 29.09.2009	196.8095
Test N18,	date 05.10.2009	197.5256
Test N19,	date 09.10.2009	192.6125
Test N20,	date 12.10.2009	190.0169
Test N21,	date 16.10.2009	192.7468
Test N22,	date 20.10.2009	196.2345
Test N23,	date 23.10.2009	198.3647
Test N24,	date 30.10.2009	192.6839
Test N25,	date 06.11.2009	190.8949
Test N26,	date 13.11.2009	193.4279
Test N27,	date 16.11.2009	192.4597
Test N28,	date 20.11.2009	202.2799
Test N29,	date 27.11.2009	199.3131

Номери тестів 1-ої групи

m1 =

```

Columns 1 through 7
   8   9  10  11  15  19  21
Columns 8 through 10
  24  26  27

```

Номери тестів 2-ої групи

m2 =

```

Columns 1 through 7
   2   3   4   5  12  13  14
Columns 8 through 12
  16  17  18  22  23

```

>>

Результати ідентифікації за методом Симою

Характерними особливостями програми є наступні:

- як і раніше, оператор SWITCH (команди 26..89) містить лише дані проведення тестів 1-ої групи;
- основна ділянка програми виконується у тілі оператора IF (90..130);
- з початку формується вхідний випадковий сигнал; для цього виділяється «хвіст» пускової характеристики і забирається його постійна складова;
- командами 94..102 задається попередня фільтрація вказаного сигналу за допомогою смугового фільтру Баттерворта з граничними частотами 4 Гц та 16 Гц;
- оператор 103 використовує функцію AR, причому остання застосовується для фільтрованих даних, порядок моделі складає 1, задається метод Берга рядком 'Burg';
- оператор 104 визначає знайдений полюс моделі у Z-площині;
- за допомогою 105..108 здійснюється перевід полюса у більш звичну S-площину та друк його значення;
- команди 109..129 призначені для роботи з моделями більш високих порядків: вони реалізують логіку, що дозволяє відкинути фізично неможливі значення полюсів і сформувати глобальну матрицю POL, яка містить лише реальні полюси;
- кінець програми (143..154) призначений для побудови графіка.

Текст програми:

```

>> dbtype simoju_1_filtr_mean
1  %simoju_1_filtr_mean
2  % Фільтрація розгінної хар-ки для тестів 1-ої
   групи.
3  % Ідентифікація методом Симою
4
5  clear, clear global
6  clc
7  close all
8
9  global SQUA;   % площі Симою
10
11 dat1=datetime(2009,7,22); % початкова дата
12 dat2=datetime(2009,11,27); % кінцева дата
13 kds=dat2-dat1; % загальна кількість днів
   спостережень
14 fprintf('   Загальна кількість днів
   спостережень: %d \n', kds)
15 disp('   Ідентифікація за допомогою моделі
   AR, 1 полюс');
16 disp(' ')
17 kk=0;          % лічильник тестів
18 dt=0.02;       % інтервал дискретизації
19 dat=dat1;
20 while dat<=dat2 % поки тривають
   спостереження
21     switch dat   % перебирання дат і вибір
   заданих
22         case datetime(2009,8,25)
23             D_09_08_25
24             nn=94;
25             kk=kk+1;
26             ST(8).title='Test N8, date 25.08.2009';
27             dn(kk)=dat-dat1;
28         case datetime(2009,8,28)
29             D_09_08_28
30             nn=86;
31             kk=kk+1;
32             ST(9).title='Test N9, date 28.08.2009';
33             dn(kk)=dat-dat1;
34         case datetime(2009,9,1)
35             D_09_09_01
36             nn=76;
37             kk=kk+1;
38             ST(10).title='Test N10, date
   01.09.2009';
39             dn(kk)=dat-dat1;
40         case datetime(2009,9,4)
41             D_09_09_04
42             nn=81;
43             kk=kk+1;
44             ST(11).title='Test N11, date
   04.09.2009';
45             dn(kk)=dat-dat1;
46         case datetime(2009,9,18)
47             D_09_09_18
48             nn=89;
49             kk=kk+1;
50             ST(15).title='Test N15, date
   18.09.2009';
51             dn(kk)=dat-dat1;
52         case datetime(2009,10,9)
53             D_09_10_09
54             nn=72;
55             kk=kk+1;
56             ST(19).title='Test N19, date
   09.10.2009';
57             dn(kk)=dat-dat1;
58         case datetime(2009,10,16)
59             D_09_10_16
60             nn=73;
61             kk=kk+1;
62             ST(21).title='Test N21, date
   16.10.2009';
63             dn(kk)=dat-dat1;
64         case datetime(2009,10,30)
65             D_09_10_30
66             nn=75;
67             kk=kk+1;
68             ST(24).title='Test N24, date
   30.10.2009';
69             dn(kk)=dat-dat1;
70
71         case datetime(2009,11,13)
72             D_09_11_13
73             nn=72;
74             kk=kk+1;
75             ST(26).title='Test N26, date
   13.11.2009';
76             dn(kk)=dat-dat1;
77         case datetime(2009,11,16)
78             D_09_11_16
79             nn=69;
80             kk=kk+1;
81             ST(27).title='Test N27, date
   16.11.2009';
82             dn(kk)=dat-dat1;
83         otherwise
84             D_09
85         end
86         if ~isempty(h) % якщо h не пустий
87             L=151;     % встановлення
   однакої довжини
88             % фільтр ковзаючого середнього
89             h = tsmovavg(h, 's', 4,4,1);
90             h = tsmovavg(h, 's', 8,8,1);
91             h = tsmovavg(h, 's', 0,65,1);
92             sr=mean([h(nn:L)]); % середнє на
   "хвості"
93             h=[h(1:L)]/sr;   % безрозмірна
   відносна форма
94             h=1-h;          % необхідно за
   методом Симою
95             lh=length(h);   % довжина h
96             % Ідентифікація
97             t=1:lh;         % масив часу с одиничним
   інтервалом

```

```

98     m=0;    % порядок поліному
чисельника
99     n=1;    % порядок поліному
знаменника
100    % Моменти
101    % Інтегрування проходить у
відносному часі,
102    % коли інтервал дорівнює одиниці,
але для
103    % урахування реального часу
значення інтегралу
104    % помножається на інтервал
дискретизації у
105    % степеню номера моменту і. При
цьому площі та
106    % полюси мають розмірність секунд
у
107    % відповідному степеню.
108    for i=1:(m+n)
109        mom(i)=(dt)^i/factorial(i-1)*trapz((h.*((-
t).^(i-1))));
110    end
111    % Площі
112    S(1)=mom(1);
113    for i=2:(m+n)
114        P=0;
115        for j=1:(i-1)
116            P=P+S(i-j)*mom(j);
117        end
118        S(i)=mom(i)+P;
119        if S(i)<0 % перевірка стійкості за
Стодолою
120            disp('Втрата стійкості!');
121        end
122    end
123    for j=1:m+n
124        SQUA(kk,j)=S(j);
125    end
126 end
127 dat=dat+1;
128 end
129    % Друк результатів
130 disp('    1-а група, 10 обраних тестів ')
131 disp(' NN      Тест
Полюс');
132    % рядок номерів тестів 1-ої групи
133 NN=[8 9 10 11 15 19 21 24 26 27];
134 for i=1:kk
135     s1=ST(NN(i)).title;
136     pol(i)=-1./SQUA(i,1);
137     fprintf(' %3d %s %8.4f \n', i,s1,pol(i))
138 end
139 xxx=dn; % масив проміжків між тестами у
днях
140    % апроксимація поліномом 3-го порядку
QUA
141 x0=[1 1 1 1]; % початковий вектор
142    % оптимальний масив коефіцієнтів QUA
143 [xx,resnorm]=lsqcurvefit('qua', x0,xxx,pol);
144 [yy]=qua(xx,xxx); % оптимальний масив
ординат
145 figure
146 plot(dn,pol,'b', dn,yy,'r'),grid
147 title('Value of the root ');
148 xlabel('Days');
149 ylabel('1/sec');

>>

Вихід програми

Загальна кількість днів спостережень: 128
Ідентифікація за допомогою моделі AR, 1
полюс

1-а група, 10 обраних тестів
NN      Тест      Полюс
1 Test N8, date 25.08.2009 -2.3014
2 Test N9, date 28.08.2009 -2.3194
3 Test N10, date 01.09.2009 -3.2768
4 Test N11, date 04.09.2009 -2.6452
5 Test N15, date 18.09.2009 -1.8007
6 Test N19, date 09.10.2009 -2.4561
7 Test N21, date 16.10.2009 -3.6219
8 Test N24, date 30.10.2009 -3.9369
9 Test N26, date 13.11.2009 -4.4102
10 Test N27, date 16.11.2009 -4.2100
Maximum number of function evaluations
exceeded;
increase options.MaxFunEvals
>>

```

Результати ідентифікації за AR-моделлю тестів 1-ої групи №№ 8, 9, 10, 11, 15, 19, 21, 24, 26, 27.

Середнє значення встановленої швидкості 192..194 імп.
Один полюс, 0 нулів.

Текст програми

```
>> dbtype AR_1_10
1  %AR_1_10
2  % 1-я група тестів, 1 полюс, 0 нулів
3  % Смуговий фільтр Баттерворта
4
5  clear, clear global
6  clc
7  close all
8
9  global POL;
10
11  nnn=1; % кількість коефіцієнтів моделі
12
13  dat1=datetime(2009,7,22); % початкова
дата
14  dat2=datetime(2009,11,27); % кінцева дата
15  kds=dat2-dat1; % кількість днів
спостережень
16  fprintf(' Кількість днів спостережень: %d
\n', kds)
17  disp(' Ідентифікація за допомогою моделі
AR');
18  disp(' Полюс у S-площині');
19  s='№ Re(p1) Im(p1)';
20  disp(s);
21  kk=0;
22  kkk=0;
23  dt=0.02;
24  dat=dat1;
25  while dat<=dat2 % на протязі терміну
спостережень
26  switch dat % вибір дати тесту
27  case datetime(2009,8,25)
28  D_09_08_25
29  nn=94;
30  kk=kk+1;
31  ST(8).title='Test N8, date 25.08.2009';
32  dn(kk)=dat-dat1;
33  case datetime(2009,8,28)
34  D_09_08_28
35  nn=86;
36  kk=kk+1;
37  ST(9).title='Test N9, date 28.08.2009';
38  dn(kk)=dat-dat1;
39  case datetime(2009,9,1)
40  D_09_09_01
41  nn=76;
42  kk=kk+1;
43  ST(10).title='Test N10, date
01.09.2009';
44  dn(kk)=dat-dat1;
45  case datetime(2009,9,4)
46  D_09_09_04
47  nn=81;
48  kk=kk+1;
49  ST(11).title='Test N11, date
04.09.2009';
50  dn(kk)=dat-dat1;
51  case datetime(2009,9,18)
52  D_09_09_18
53  nn=89;
54  kk=kk+1;
55  ST(15).title='Test N15, date
18.09.2009';
56  dn(kk)=dat-dat1;
57  case datetime(2009,10,9)
58  D_09_10_09
59  nn=72;
60  kk=kk+1;
61  ST(19).title='Test N19, date
09.10.2009';
62  dn(kk)=dat-dat1;
63  case datetime(2009,10,16)
64  D_09_10_16
65  nn=73;
66  kk=kk+1;
67  ST(21).title='Test N21, date
16.10.2009';
68  dn(kk)=dat-dat1;
69  case datetime(2009,10,30)
70  D_09_10_30
71  nn=75;
72  kk=kk+1;
73  ST(24).title='Test N24, date
30.10.2009';
74  dn(kk)=dat-dat1;
75  case datetime(2009,11,13)
76  D_09_11_13
77  nn=72;
78  kk=kk+1;
79  ST(26).title='Test N26, date
13.11.2009';
80  dn(kk)=dat-dat1;
81  case datetime(2009,11,16)
82  D_09_11_16
```

```

83     nn=69;
84     kk=kk+1;
85     ST(27).title='Test N27, date
16.11.2009';
86     dn(kk)=dat-dat1;
87     otherwise
88         D_09
89     end
90     if ~isempty(h)
91         h=[h(nn:end)]; % формування "хвіста"
92         h=h-mean(h); % видалення постійної
складової
93         n=length(h);
94         %Фільтрація
95         k_filt=15; % порядок фільтру
96         N_freq=1/dt/2; % частота Найквіста, Гц
97         F1=4; % нижня межа
частота смуги, Гц
98         F2=16; % верхня межа
частота смуги, Гц
99         W1=F1/N_freq; % нижня відносна
частота
100        W2=F2/N_freq; % верхня відносна
частота
101        [B,A]=butter(k_filt,[W1 W2]); %
коефіцієнти фільтра
102        h_filt=filter(B,A,h); %
фільтрація
103        MM=ar(h_filt,nnn);
104        [ze,po]=zpkdata(MM,'v');
105        % перехід до полюсів у S-площині
106        pol=1/dt*log(po);
107        s1='%2d %9.4f %-9.4f \n';
108        fprintf(s1, kk, real(pol(1)),imag(pol(1)));
109        % Формування матриці POL, що
містить
110        % лише реальні корені
111        flag1=0;
112        flag2=0;
113        for j=1:nnn
114            if real(pol(j))>=0 % втрата стійкості
115                flag1=flag1+1;
116            end
117            if isreal(pol(j)) % рахуємо дійсні
корені;
118                flag2=flag2+1;
119            end
120        end
121        % корень повинен бути дійсним і
мати від'ємну
122        % дійсну частину;
123        if (flag1==0) & (mod(flag2,2)~=0)
124            kkk=kkk+1;
125            nomer(kkk)=kk;
126            POL(kkk,1)=kk;
127            POL(kkk,2:nnn+1)=pol';
128            zat(kkk)=max(real(pol));
129        end
130    end
131    dat=dat+1;
132 end
133 disp('Реальні полюси у S-площині');

```

```

134        s1='%2d';
135        s2=' %9.4f %-9.4f';
136    for l=1:kkk
137        fprintf(s1,POL(l,1))
138        for k=1:nnn
139            fprintf(s2,real(POL(l,k+1)),imag(POL(l,k+1)));
140        end
141        disp(' ');
142    end
143    % Побудова графіка
144    xxx=dn; % масив проміжків між тестами у
днях
145    % апроксимація поліномом 3-го порядку
qua
146    x0=[1 1 1 1]; % початковий вектор
147    % оптимальний масив коефіцієнтів qua
148    [xx,resnorm]=lsqcurvefit('qua', x0,xxx,zat);
149    [yy]=qua(xx,xxx); % оптимальний масив
ординат
150    figure
151    plot(dn,zat,'b',dn,yy,'r'),grid
152    title('Damping');
153    xlabel('Days');
154    ylabel('1/sec');
>>

```

A.4.2 Вихід програми

```

Кількість днів спостережень: 94
Ідентифікація за допомогою моделі AR
Полюс у S-площині
№ Re(p1) Im(p1)
1 -44.0262 0.0000
2 -68.1702 0.0000
3 -63.9977 0.0000
4 -58.3261 0.0000
5 -73.1788 0.0000
6 -60.4230 0.0000
7 -89.6851 0.0000
8 -157.3386 0.0000
9 -131.4677 0.0000
10 -130.2725 0.0000
Реальні полюси у S-площині
1 -44.0262 0.0000
2 -68.1702 0.0000
3 -63.9977 0.0000
4 -58.3261 0.0000
5 -73.1788 0.0000
6 -60.4230 0.0000
7 -89.6851 0.0000
8 -157.3386 0.0000
9 -131.4677 0.0000
10 -130.2725 0.0000
Maximum number of function evaluations
exceeded;
increase options.MaxFunEvals
>>

```

Мікроконтролерна система діагностування

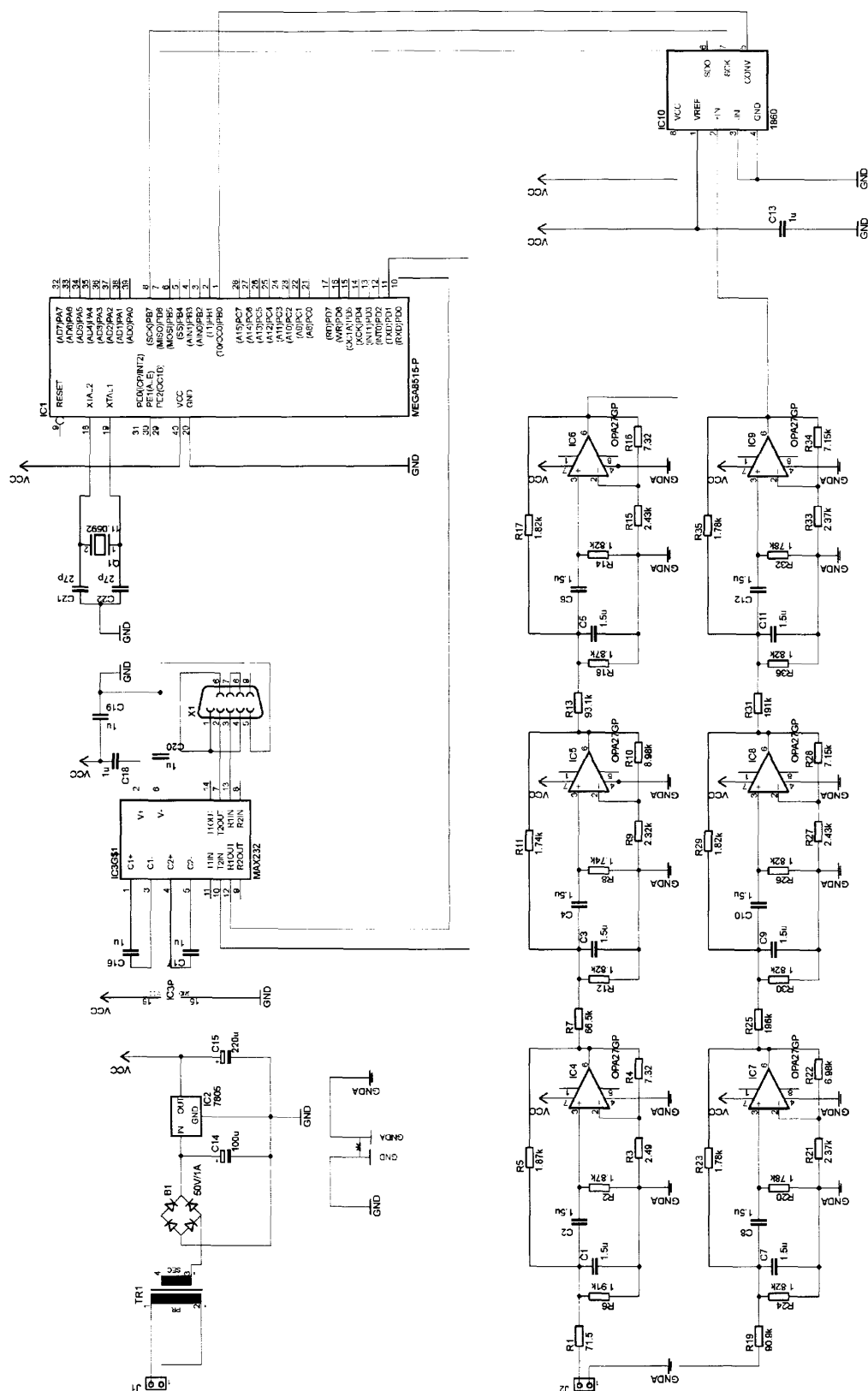


Рис. Е.1 Мікроконтролерна система діагностування. Схема електрична
принципова

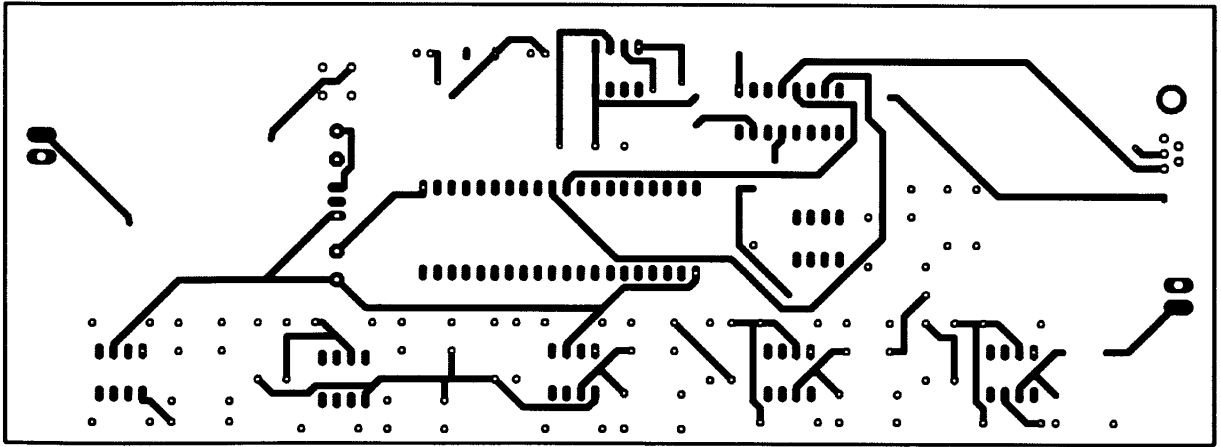


Рис. Е.2 Мікроконтролерна система діагностування. Друкована плата. Вигляд зі сторони пайки

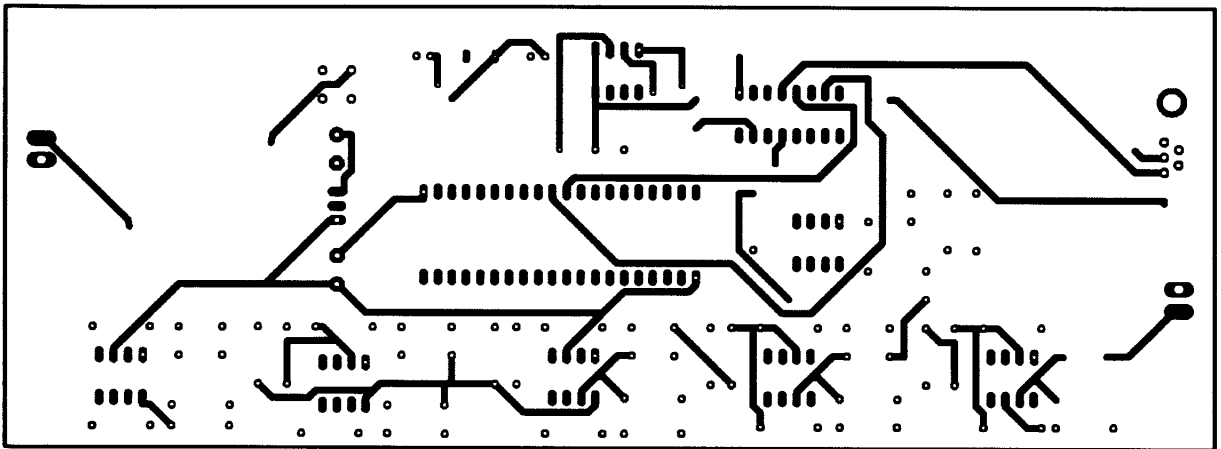


Рис. Е.3 Мікроконтролерна система діагностування. Друкована плата. Вигляд зі сторони деталей

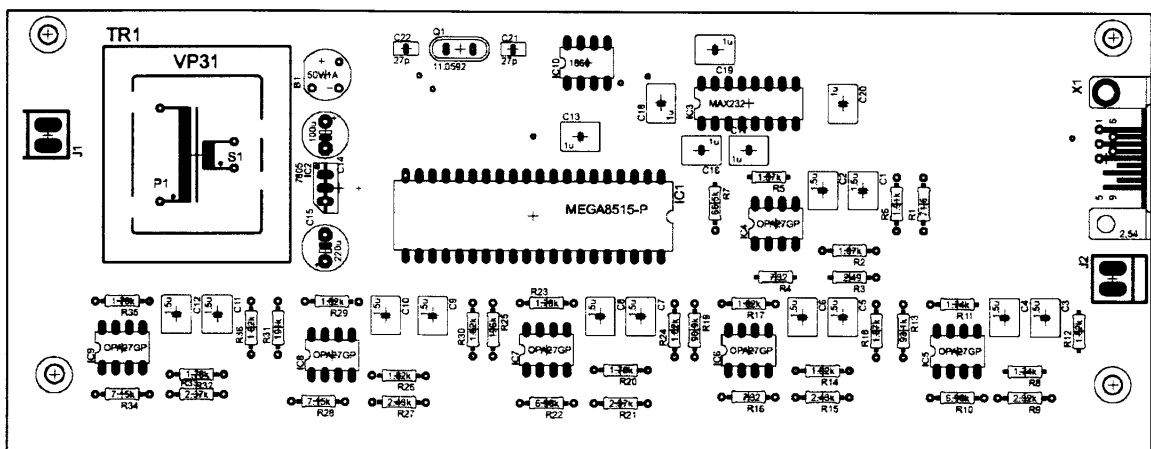


Рис. Е.4 Мікроконтролерна система діагностування. Друкована плата. Складальне креслення

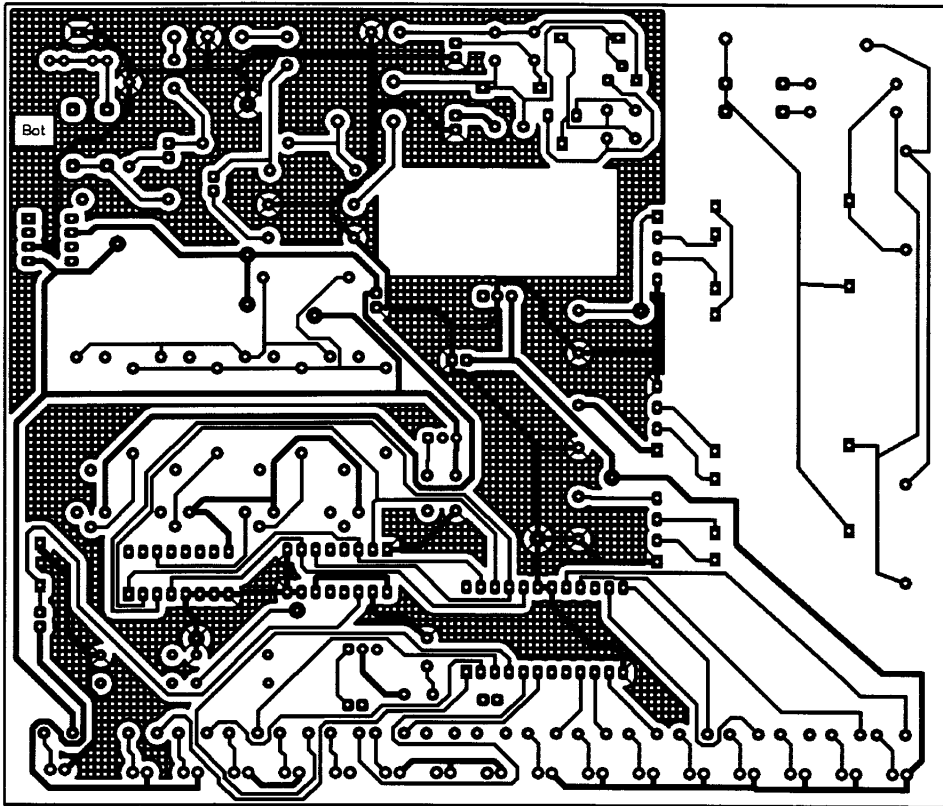


Рис. Е.5 Підсилювач віброакустичного перетворювача. Вигляд зі сторони

пайки

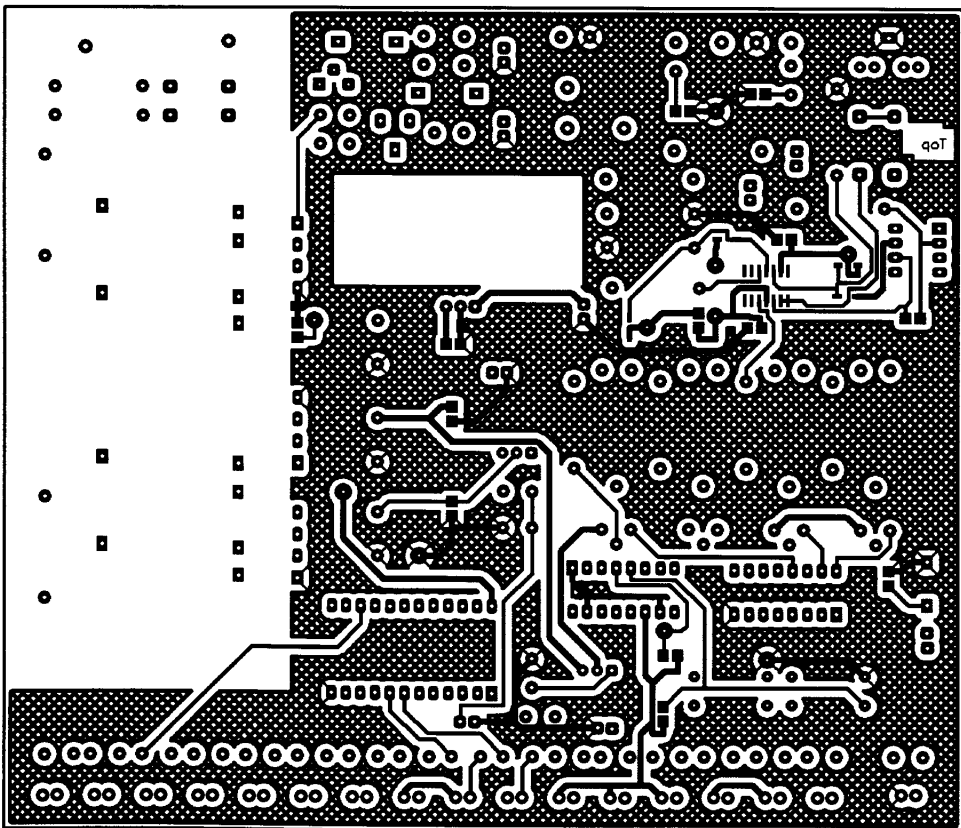


Рис. Е.6 Підсилювач віброакустичного перетворювача. Вигляд зі сторони

монтажу

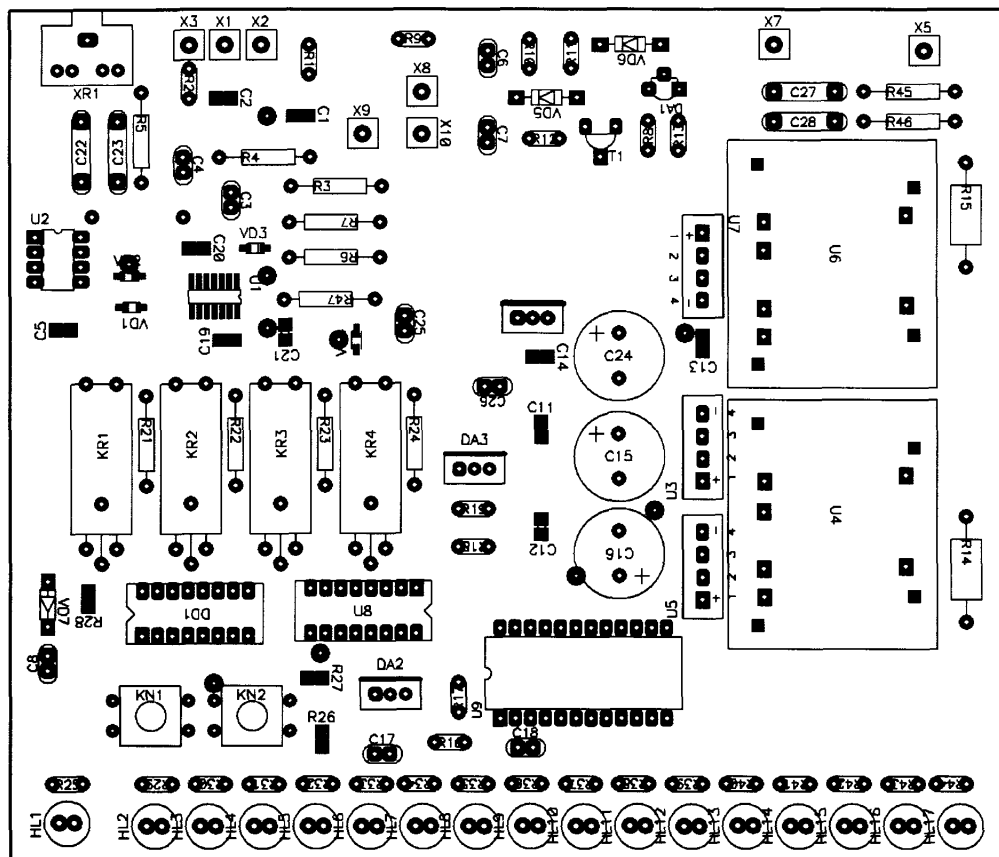


Рис. Е.7 Підсилювач віброакустичного перетворювача. Складальне креслення

2009 р.

А К Т
впровадження у навчальний процес результатів
закінчених науково-дослідних робіт

**тема № 13/2009 (ВАТ „Івано-Франківськцемент”)
керівник Заміховський Л.М.**

Ми, що нижче підписалися завідувач кафедри КТіСУ

Заміховський Л.М.

проректор з наукової роботи

Карпаш Олег Михайлович

свідчуємо, що результати Науково-дослідної роботи

„Розроблення методики діагностування технічного стану вертикального валкового

Млина PFEIFFER AG-MPS 180 BK”

впроваджено у навчальний процес науково-технічна продукція (потрібне підкреслити):

нової техніки,
нових технологій,
нових матеріалів,
методів теорій,
інше

кафедра: ***Комп’ютерних технологій в системах управління та
автоматики***

Дисципліна «Основи теорії надійності і технічної діагностики систем», «Методи і засоби діагностування об’єктів нафтогазового комплексу», «Автоматизоване проектування систем управління і діагностування об’єктами нафтогазового комплексу», «Системи передавання даних», «Системи передачі і обробки інформації в нафтогазовій галузі».

Проректор з наукової роботи



Карпаш О.М.

Завідувач кафедри комп’ютерних технологій
в системах управління та автоматки



Заміховський Л.М.

Л. М. Заміховський
О. М. Карпаш

13.09.2009

Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ



управління

«Івано-Франківськцемент»

Заяць Б.Й.

15 жовтня 2010р.

АКТ

Ми, що нижче підписалися, представники від ВАТ «Івано-Франківськцемент» головний інженер виробництва в'язучих матеріалів М.В. Маковійчук, начальник цементного цеху А.Г. Демків, начальник служби автоматизації і метрології В.М. Мандрик з одного боку, і представники кафедри комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики (КТіСУ) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) завідувач кафедри д.т.н., професор Л.М. Заміховський та асистент Р.Б. Скрип'юк, з другого боку, склали цей акт в тому, що розроблена на кафедрі КТіСУ, згідно договору №13/2009 з ВАТ «Івано-Франківськцемент» «Розробка методики діагностування технічного стану вертикального валкового млина PFEIFFER AG MPS-180 ВК», методика діагностування робочих органів – помольних валків та бігової доріжки помольної чаші млина MPS-180 ВК, разом з технічними засобами для її реалізації, пройшла промислову апробацію в період з січня 2010 року по жовтень 2010 року і прийнята для подальшого впровадження.

Від ВАТ «Івано-Франківськцемент»

Від ІФНТУНГ

Головний інженер виробництва
в'язучих матеріалів

 М.В. Маковійчук

Начальник цементного цеху


 А.Г. Демків
Начальник служби автоматизації
і метрології

 В.М. Мандрик

Завідувач кафедри КТіСУ, д.т.н., проф.


 Л.М. Заміховський

Асистент кафедри КТіСУ


 Р.Б. Скрип'юк
НТБ
ІФНТУНГ

d396