МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Факультет економіки і підприємництва
Кафедра інформаційних технологій

Допущено до захисту
"_____" _____ 2023 р.
Зав. кафедри, к.т.н., доцент
_____ **Ліщук Р.І.**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Інформаційна система для вібродіагностики електричних машин

Виконав – студент 4 курсу, групи 41-кн
освітньої програми "Комп'ютерні науки"
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
Охотник Віталій Вікторович
Науковий керівник – д.т.н., професор
Кучерук Володимир Юрійович

Умань – 2023

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

ОД	Об’єкт діагностування
СО	Структурна одиниця
ДО	Діагностична ознака
ПД	Пошук дефекту
КТС	Контроль технічного стану
ПТС	Прогнозування технічного стану
ЗТД	Засоби технічного діагностування
ЛО	Людина-оператор
ДМ	Діагностична модель
СКЗ	Середньоквадратичне значення
URL	Uniform Resource Locator
API	Application Programming Interface
СКВ	Середньоквадратичне відхилення
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
МХ	Мультиплексор
PC	Персональний комп’ютер
CRC	Контрольна сума

Вступ

У технічному обслуговуванні електричних машин вібродіагностика займає особливе місце в силу своїх можливостей виявлення змін стану задовго до настання аварійної ситуації. Вібродіагностика, будучи розділом технічної діагностики, є галуззю знань, що включає в себе теорію й методи організації процесів розпізнавання технічних станів машин і механізмів за вихідною інформацією, що міститься у віброакустичному сигналі. Тому вібродіагностиці може піддаватися будь-яке устаткування, функціонування якого супроводжується порушенням коливальних процесів.

Будь-яке відхилення параметрів функціонування встаткування від норми приводить до зміни характеру взаємодії його елементів і до зміни взаємодії віброакустичних процесів.

Вібродіагностика виконує такі основні завдання як: пошук дефекту, визначення технічного стану об`єкта, прогнозування запасу працездатності системи вцілому. Об`єктом даної системи вібродіагностики є електричні машини, які використовуються на промислових підприємствах, адже механічні конструкції і деталі машин у реальних умовах експлуатації піддаються впливу статичного та динамічного навантаження. Предметом дослідження є вібрації – коливання твердого тіла навколо положення рівноваги (при цьому все тіло коливається як одне ціле, не змінюючи своєї форми). Вібрація завжди викликається силами порушення, які можуть бути прикладені ззовні або виникати всередині нього і може призвести до негативних наслідків на виробництві.

Витрати на обслуговування і ремонт є одним із важливих експлуатаційних показників будь-якої технічної системи. Їх мінімізація в тих випадках, коли система є ремонтопридатною, практично неможлива без ефективного контролю стану системи. В сучасних засобах контролю і діагностики, по крайній мірі обертального обладнання, основним видом процесів є вібрація, активно витісняючи більшість інших процесів, в том числі й теплові. Причини не тільки

в тому, що вібраційна діагностика ефективніше і спостерігається тенденція до швидкого зниження витрат на її реалізацію, але і в тому, що почати діагностику по вібрації можна в будь-який час, в тому числі і через декілька років експлуатації обладнання, коли затрати на профілактичні роботи і ремонт перевищують економічно виправдану величину.

В останні десятиліття були розроблені декілька ефективних методів виявлення основних дефектів електричних машин і обладнання по вібрації на етапі їх виникнення. Природно, що вони основані, в основному, на аналізі високочастотної вібрації, для збудження якої не потрібні великі коливальні сили, але й проявляється вона тільки в місці їх дії, швидко затухає при розповсюдженні. Такі методи стали використовуватись діагностами багатьох країн для переходу від вібраційного моніторингу до глибокої діагностики.

Паралельно розвивались методи автоматизації алгоритмів діагностики, що дозволило ряду виробників діагностичних систем замінити програмним забезпеченням висококласних експертів при рішенні типових діагностичних задач. Доля таких задач дуже висока і перевищує 90% від всіх задач, що вирішуються шляхом аналізу сигналів вібрації.

Актуальність

Актуальність інформаційних систем для вібродіагностики електричних машин визначається необхідністю підвищення ефективності контролю, моніторингу та обслуговування електричного обладнання. Вібродіагностика є важливим інструментом для виявлення відхилень у роботі машин та прогнозування можливих поломок. Застосування інформаційних систем у вібродіагностиці електричних машин забезпечує ряд переваг:

1. Підвищення точності діагностики: Інформаційні системи дозволяють обробляти великі обсяги даних і здійснювати комплексний аналіз вібраційних сигналів. Вони можуть використовувати алгоритми штучного інтелекту, машинного навчання та статистичного аналізу для виявлення відхилень від

нормального стану машин і встановлення їх причин. Це дозволяє отримувати більш точні результати діагностики та уникати негативних висновків.

2. Раннє виявлення поломок: Інформаційні системи забезпечують постійний моніторинг стану електричних машин і раннє виявлення небезпечних вібраційних відхилень. Це дозволяє попередити виникнення серйозних поломок, знизити ризик аварій та запобігти неконтрольованому зупиненню обладнання. В результаті зберігаються час і кошти, які були б витрачені на ремонт або заміну машин.

3. Оптимізація обслуговування: Інформаційні системи дозволяють планувати обслуговування електричного обладнання на основі отриманих даних про його стан. Замість регулярних технічних обстежень можна встановити систему контролю вібрацій, яка передає дані в реальному часі і вказує на необхідність проведення обслуговування лише тоді, коли це дійсно необхідно. Це дозволяє економити час і ресурси, збільшувати ефективність обслуговування та підтримувати обладнання в робочому стані.

4. Віддалений моніторинг: Інформаційні системи дозволяють здійснювати віддалений моніторинг стану електричного обладнання. Завдяки цьому, фахівці можуть контролювати роботу машин з будь-якого місця, що забезпечує більш гнучкий підхід до управління технічним обслуговуванням та вирішенню проблем.

5. Звітність і аналітика: Інформаційні системи дозволяють збирати, зберігати та аналізувати дані про стан електричних машин. Це надає можливість генерувати звіти, статистику та аналітичні дані, що полегшує процес прийняття рішень щодо обслуговування та модернізації обладнання.

Отже, інформаційні системи для вібродіагностики електричних машин мають велику актуальність, оскільки вони допомагають підвищити точність діагностики, рано виявляти поломки, оптимізувати обслуговування, забезпечувати віддалений моніторинг та забезпечувати звітність і аналітику. Це

сприяє збереженню часу, коштів і ресурсів, а також забезпечує безперебійну роботу електричного обладнання.

Об’єкт дослідження – процеси, що виникають у інформаційних системах для вібродіагностики електричних машин.

Предмет дослідження – методи та засоби побудови інформаційних системах для вібродіагностики електричних машин.

Мета дослідження

Метою проведених досліджень була розробка інформаційної системи для вібродіагностики електричних машин, корисної в першу чергу для користувача, допомагаючи зробити діагностування з високою достовірністю.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра був проведений аналіз наукової та технічної літератури, технічної документації, міжнародних стандартів у даній предметній галузі, а також проведено розробку математичного та програмного забезпечення системи.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1. Об’єкт та предмет дослідження

Вібродіагностика – область знань, що охоплює теорію, методи і засоби визначення технічного стану об’єкта по віброакустичному сигналу.

Технічний стан – стан, який характеризується у визначений момент часу при визначених умовах зовнішнього середовища значеннями параметрів, встановлених технічною документацією на об’єкт.

Процес визначення технічного стану об’єкта називається діагностуванням. Визначення стану об’єкта передбачає наявність обґрунтованих алгоритмів діагностування.

Алгоритм діагностування – сукупність розпоряджень, які визначають послідовність дій при проведенні діагностування.

Вузол, механізм, машина, обладнання, система, які підлягають (піддаються) діагностуванню, називаються об’єктом діагностування (ОД). Частину ОД, яку при діагностуванні неможливо розділити на більш дрібні, називають елементом (структурною одиницею, СО). Будь-який об’єкт діагностування складається з елементів (принаймні, з одного елемента). Наприклад, бурове долото, насосна штанга, електродвигун установки для видобутку нафти можуть розглядатися як ОД із однієї СО. Результат діагностування, тобто висновок про технічний стан об’єкта, називається діагнозом. Стан ОД оцінюється за діагностичними ознаками.

Діагностичною ознакою ДО називають параметр або характеристику, які використовують при діагностуванні. В даному випадку – це віброакустичний сигнал. Вся сукупність діагностичних показників представляю шукану діагностичну інформацію.

Ця інформація при діагностуванні виробу являє собою відомості про об`єкт, які в подальшому формуються для сприйняття адресатом у вигляді діагнозу.

Характеристика – залежність однієї фізичної величини від іншої, а саме: статична характеристика, якщо величина не залежить від часу, частоти; наприклад, зовнішня характеристика $U = f(I)$ генератора постійного струму (рис. 1.1 (а) при змішаному - 1, незалежному - 2, паралельному - 3 збудженні відповідно; динамічна характеристика, якщо така залежність має місце, наприклад, амплітудно-частотна $A = f(\omega)$ (рис. 1.1 (б), передатна $h(t)$ характеристика (рис. 1.1 (в). Кожному стану відповідає визначене значення ДО.

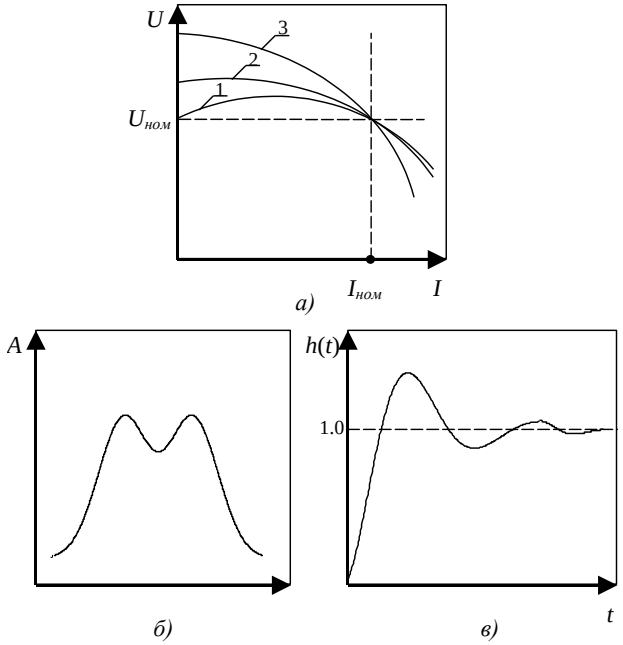


Рисунок 1.1 - Види діагностичних характеристик

Діагностичні ознаки вибираються в результаті аналізу діагностичної моделі, під якою розуміють формальний опис ОД, який враховує зміну її стану (в аналітичній, табличній, графічній та інших формах).

Загальним поняттям теорії надійності і вібродіагностики є поняття працездатності. Це поняття використовується для позначення класу станів ОД, знаходячись в якому, він виконує властиву йому роботу. Стан, при якому значення всіх ДО, що характеризують здатність ОД виконувати задані функції, відповідають встановленим вимогам, називається працездатним. В цьому випадку можна говорити, що обладнання працює в штатному режимі.

Непрацездатний стан – стан, при якому значення хоча б однієї діагностичної ознаки, яка характеризує виконання заданої функції, не відповідає встановленим вимогам. Перехід з класів працездатних станів у клас непрацездатних називається відмовою. При цьому можлива повна відмова, що призводить до втрати працездатності (заклинювання шарошки долота, обрив силового кабелю та інші), та часткова відмова, яка призводить до втрати працездатності і нештатної роботи, тобто обладнання продовжує працювати з погіршеними показниками.

Це аналогічно тому, якби ви хворі прийшли на роботу: будете виконувати свою роботу погано. Ступінь погіршення функціонування може змінюватись від майже штатної роботи до майже повної відмови.

Існує третій тип відмови елемента – “змінна”, яка означає, що вона почергово зникає, а потім знову з`являється. Це ускладнює визначення місцезнаходження елемента, що відмовив, оскільки при перевірці обладнання він може бути працездатним, а через деякий час – непрацездатним.

Причиною втрати працездатності або різкого зниження запасу працездатності є дефект (від лат. слова defectus – вада, недолік).

В ОД, який складається з декількох елементів, дефектом є відмова елемента, порушення зв’язку або поява зв’язку між елементами. Виникнення дефекту в ОД, який складається з декількох елементів, не обов’язково призводить до втрати його працездатності.

При цьому ОД зберігає працездатність при наявності в ньому дефекту за рахунок надлишковості (структурної, часової, інформаційної) або за рахунок того, що втрата працездатності не всіх елементів призводить до втрати його працездатності [1].

В тих випадках, коли в ОД виник дефект, але він не втратив працездатності, говорять, що запас його працездатності знизився, а, отже, підвищилася ймовірність його відмови надалі.

Крім вищеозначених технічних станів, виділяють ще граничний та/чи критичний стан.

Граничний стан відображає такий стан виробу, при якому його подальше використання недопустимо чи недоцільно відповідно до вимог безпеки або відновлення працездатного стану просто неможливо. А критичний стан пов`язаний з таким станом, коли подальше застосування виробу може привести до аварії чи катастрофи з недопустимими наслідками.

Слід відзначити, що в практиці технічної діагностики також застосовуються поняття правильне функціонування та неправильне функціонування [1, 2].

При діагностуванні можуть вирішуватись наступні завдання: $Z_i \in Z$, $i = \overline{1,3}$; Z_1 – контроль технічного стану (КТС); Z_2 – пошук дефекту (ПД); Z_3 – прогнозування технічного стану об’єкта (ПТС).

Які з цих завдань вирішуються в процесі діагностування, залежить від умов його виконання і особливостей ОД.

Перше завдання КТС – контроль працездатності (запасу працездатності) обов’язково вирішується при діагностуванні об’єктів будь-якого призначення. Контроль працездатності передбачає перевірку відповідності значень діагностичних ознак ОД вимогам технічної документації. При цьому можливі два види контролю: якісний (допусковий) і кількісний (запас працездатності). В тому випадку, коли ОД втратив працездатність або запас працездатності значно понизився, при діагностуванні вирішується інше завдання. Доцільність визначення її визначається можливістю відновлення ОД, тобто усунення дефекту, який виник. В свою чергу, усунути дефект можна лише в тому випадку, коли ОД ремонтопридатний, тобто пристосований до усунення дефектів, які виникли в ньому, і обслуговуючий персонал має засоби і час для його відновлення. В цьому випадку пошук дефекту починається, як правило, за умови, що вже відомо про наявність дефекту, і невідомо лише, який саме дефект виник.

При вирішенні третього завдання вивчається характер зміни діагностичних параметрів і на основі сформованих тенденцій передбачається значення параметрів на майбутній період часу. Найбільш розповсюдженим поєднанням завдань, які вирішуються в процесі діагностування, є:

- контроль працездатності (запасу працездатності) і пошук дефекту;

- контроль працездатності (запасу працездатності) і прогнозування стану;

- контроль працездатності (запасу працездатності), пошук дефекту і прогнозування стану.

При вирішенні основних завдань діагностування можливі різноманітні дії з формування діагнозу (рис. 1.2).

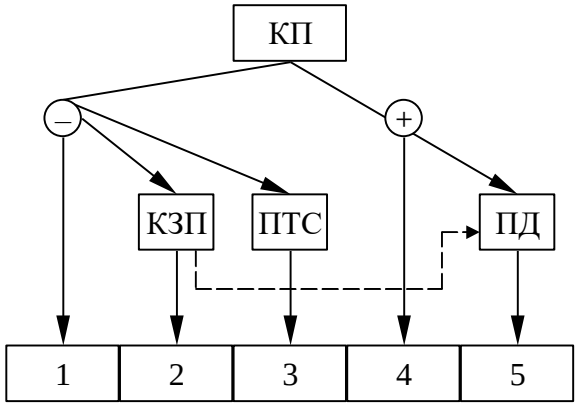


Рисунок 1.2 - Етапи процесу постановки діагнозу

а) при позитивному результаті контролю працездатності:

- видача висновку про працездатність ОД;

- контроль запасу працездатності (КЗП) ОД і видача висновку про його стан;

- прогнозування стану (ПС) об’єкта діагностування і видача висновку про його стан.

б) при негативному результаті контролю працездатності:

- видача висновку про непрацездатний стан ОД;

- пошук дефекту, який виник (ПД), і видача висновку про стан ОД.

У процесі діагностування беруть участь, як правило, ОД, засоби технічного діагностування (ЗТД) і людина-оператор (ЛО). Їх сукупність і

утворює систему діагностування (рис. 1.3). Розглянуті положення необхідно враховувати при проектуванні і організації експлуатації технічних об’єктів, зокрема нафтогазового обладнання, бурового обладнання і систем управління.

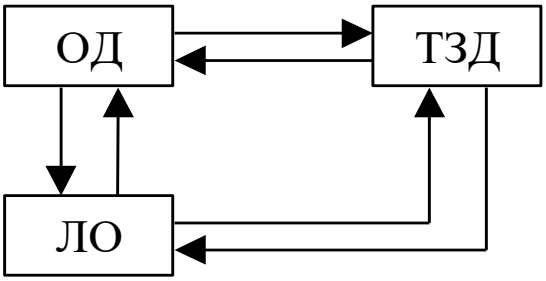


Рисунок 1.3 - Структурна схема системи вібродіагностування

Діагностичною моделлю є формалізований опис об`єкта діагностування, який забезпечує вирішення відповідних завдань діагностування щодо встановлення виду технічного стану, пошуку місця несправності чи виявлення причини цієї несправності, або щодо прогнозування імовірності зміни технічного стану чи визначення залишкового ресурсу.

Це означає, що за допомогою діагностичної моделі виконується опис виробу, що відповідає поставленій задачі діагностування за умови застосування визначених ЗТД і реалізації відповідного виду та методу діагностування.

Слід відзначити, що діагностична модель (ДМ) виступає як своєрідний засіб, що дозволяє створювати певне інформаційне середовище, з використанням якого стає можливим виконання процедури діагностування для встановлення діагнозу відносно певного технічного виробу як ОД.

Необхідність обов`язкового модельного відтворення ОД за допомогою ДМ пояснює узагальнений алгоритм технічного діагностування як інформаційної процедури, зображений на рис. 1.4. Цей алгоритм віддзеркалює основні операції процедури діагностування з: 1) відтворення діагностичних показників ОД з використанням вимірювальних приладів та/або приладів контролю; 2) порівняння діагностичних показників ОД з показниками ДМ, що виступають як еталонні, внаслідок чого визначаються їх якості і надійності розходження між

ними Δ; 3) прийняття рішення відносно діагнозу для ОД на основі аналізу розходження (Δ) реакції ОД з відповідною реакцією ДМ на вхідні дії, що застосовуються при виконанні процедури діагностування.

Всі перераховані операції процедури діагностування можуть доповнюватися різними допоміжними операціями, наприклад, по перетворенню фізичних значень та виду приведення діагностичних показників до зручної форми відносно операцій порівняння та операцій прийняття рішень. Такі доповнення направлені на досягнення відповідних показників всієї процедури діагностування в цілому [3, 4].

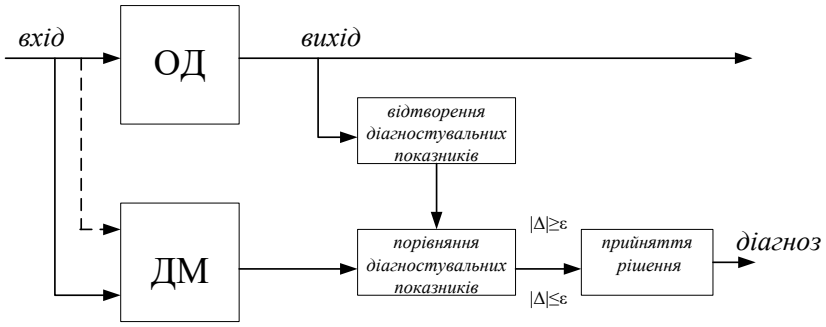


Рисунок 1.4 - Узагальнений алгоритм технічного діагностування

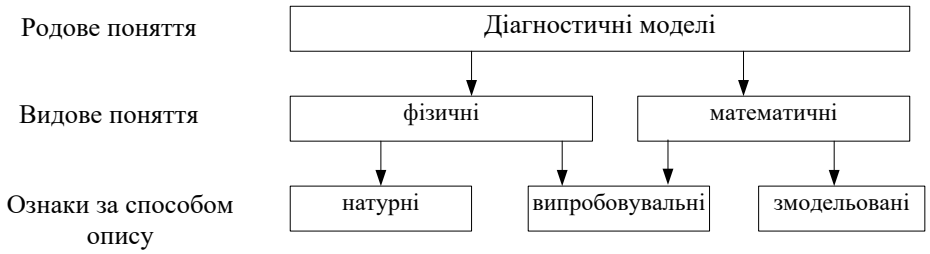


Рисунок 1.5 - Різновиди діагностувальних моделей об`єктів діагностування за способом створення їх опису

ДМ всіх ОД, як це може бути при інших цільових функціях формалізованого опису виробу його моделлю, можуть бути фізичними чи математичними (рис. 1.5). Крім того, в залежності від ознак способу опису ДМ, слід розрізняти моделі натурні, випробувальні та змодельовані. Під натурною моделлю розуміється еталонний виріб, відгук якого в процесі дослідження ОД

вважається зразком для порівняння з відгуком діагносту вального виробу. При цьому застосовується варіант 1 зовнішньої дії на ДМ згідно рис. 1.4.

Коли ж ДМ створюється за результатами окремих випробувань натурних зразків, які віддзеркалюються відповідними математичними моделями, що описують вихідні показники цих зразків, і визначаються як випробувальні ДМ, то в цьому випадку застосовуються зовнішні дії на ДМ за варіантом 2 із рис. 1.4. В разі використання цього варіанта при реалізації процедури діагностування на фізичну модель немає безпосередньої зовнішньої дії, а вона присутня своєю математичною моделлю, побудованою за результатами випробувань зразкових виробів окремо від процесу діагностування [4].

Стосовно вибору математичних моделей слід відзначити, що їх застосування як діагностичних повністю обумовлюється необхідним рівнем формалізованого опису ОД відповідно до задачі, яка вирішується, та застосованих для цього засобів і методів діагностування. Зв`язок таких математичних ДМ із зовнішніми діями на ОД в процесі діагностування може реалізуватись за варіантом 2 (рис. 1.4), коли відносно ДМ тим чи іншим способом враховується зміна вихідних показників ОД під впливом зовнішніх дій по його входу. Оскільки способом створення математичних моделей є моделювання, то ДМ такого типу слід вважати змодельованими.

Найбільш важливою вимогою до діагностичної моделі ОД має бути однозначність відповідності, тобто адекватність між технічним або фізичним станом об`єкта, що відображається набором діагностичних показників (параметрів та/чи ознак), та його віддзеркаленням показниками ДМ. Чим менша їх невідповідність, неадекватність, тим краще може бути забезпечена вірогідність та точність діагнозу в процесі діагностування виробу.

В залежності від умов виконання процедури розрізняють такі види діагностування.

- робоче діагностування;
- тестове діагностування;

- експрес – діагностування;

- прогнозувальне діагностування.

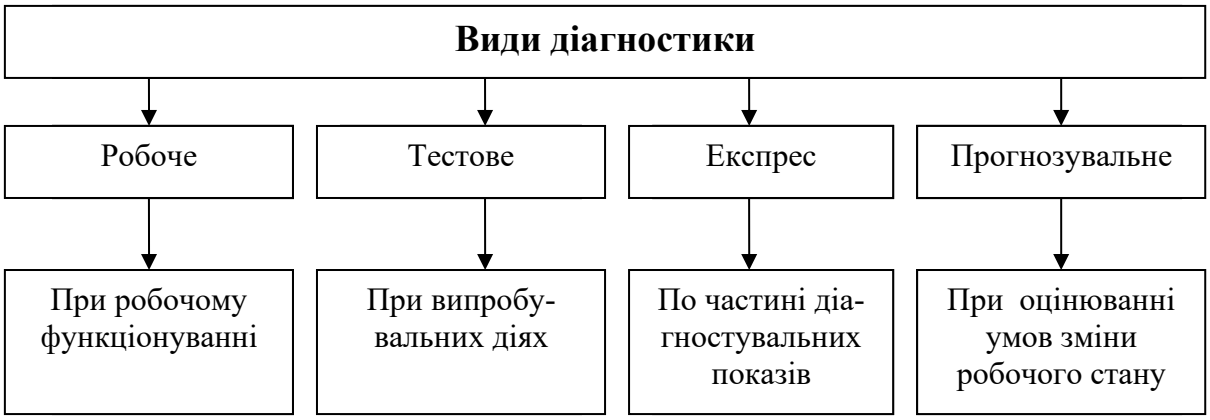


Рисунок 1.6 – Види діагностування в залежності від умов виконання діагностувальної процедури відносно об`єкта, що діагностується

1.2. Методи контролю і вимірювання параметрів вібрації

Існує дві групи методів вимірювання параметрів вібрації: контактні, що припускають механічний зв'язок датчика з досліджуваним об'єктом, і безконтактні, тобто не пов'язані з об'єктом механічним зв'язком.

Контактні методи:

- метод реєстрації вібрацій за допомогою п`єзоелектричних датчиків;

- метод відкритого резонатора;

- амплітудний метод;

- використання сферичних дзеркал;

Безконтактні методи:

1. Засновані на зондуванні об`єкта звуковими і електромагнітними хвилями:

- метод ультразвукової фазометрії;

2. Засновані на зондуванні об’єкта видимим світлом (оптичні методи)

- гомодинний метод;

- гетеродинні методи;

- голографічні методи;

3. Засновані на використанні СВЧ випромінювання

- інтерференційні методи;

- резонаторні методи.

Для вимірювання вібрацій широко використовуються електричні вібровимірювальні прилади, принцип дії яких базується на перетворенні кінематичних параметрів коливного руху в електричні величини, котрі вимірюються та реєструються за допомогою електричних приладів [5].

Основні елементи цих приладів — датчики. В якості первинних вимірювальних перетворювачів використовують ємнісні, індукційні, п'єзоелектричні перетворювачі, котрі сприймають коливальні зміщення, швидкість та прискорення.

Найчастіше використовуються п'єзоелектричні перетворювачі віброприскорення — акселерометри.

Вібровимірювальними приладами з давачами можна вимірювати вібрації в багатьох точках, їх перевага — дистанційність вимірювання параметрів вібрації, проста будова, відсутність інерційності.

Кількість вимірювань параметрів вібрації повинна бути не менше трьох для кожної октавної смуги частот. Вимірювальними параметрами вібрації є пікові аби середньоквадратичні значення віброзміщення, віброшвидкості або віброприскорення в октавних або 1/3- октавних смугах частот [5].

Об'єктами вібраційних вимірювань і досліджень є насамперед, корпуса підшипників. Розглядаючи вібрацію точки в трьох ортогональних напрямках, ми виявляємо, що точка в процесі коливань рухається по траєкторії, що має вид складної, майже завжди замкнутій кривій, форма якої міняється в часі. Теоретичним фундаментом технічної діагностики вважається загальна теорія розпізнавання образів [5, 6].

Діагностичні алгоритми, або алгоритми розпізнавання використовують діагностичні моделі й моделі відмов. Діагностичні моделі встановлюють зв'язок

між станом системи і їхнє відображення в просторі діагностичних параметрів. Моделі відмов досліджувані теорією надійності, дозволяють завчасно пророчити час можливої відмови.

Теорія розпізнавання образів пропонує два основних методи: імовірнісний і детерміністський. Імовірнісний метод використає статистичні зв'язки між станом об'єкта й діагностичних параметрів, у результаті реалізації деякого алгоритму при цьому перебуває найбільш імовірний діагноз і по можливості визначається ступінь його вірогідності.

Детерміністський метод встановлює зв'язок стану об'єкта з координатами в просторі діагностичних параметрів на основі вивчених закономірностей, зокрема з використанням теорії коливань.

Скористаємося принципом віртуального моделювання, як складовій частини детерміністського методу.

Вимірювання рівня вібрації виконані одним типом датчиків, в однаковому частотному діапазоні (як правило), у єдиних одиницях вимірювання, а точка , як ми знаємо, рухається в просторі по певній траєкторії - орбіті, отже, взаємне розташування точок контролю відбиває реальне положення в просторі об'єкта, у даний момент часу.

Вібрації – коливання твердого тіла навколо положення рівноваги (при цьому все тіло коливається як одне ціле, не змінюючи своєї форми), або коливання частинок, з яких складається тіло.

Коливальний рух твердого тіла може бути повністю описаний у вигляді комбінації шести найпростіших типів руху: поступального в трьох взаємно перпендикулярних напрямках (x, в, z у декартовых координатах) і обертального щодо трьох взаємно перпендикулярних осей (Ox, Oy, Oz). Будь-яке складне переміщення тіла можна розкласти на ці шість складових. Тому про такі тіла говорять, що вони мають шість ступенів волі [7].

Вібрація тіла завжди викликається якимись силами порушення. Ці сили можуть бути прикладені до об'єкта ззовні або виникати всередині нього самого.

Далі ми побачимо, що вібрація конкретного об'єкта повністю визначається силою порушення, її напрямком і частотою. Саме із цієї причини вібраційний аналіз дозволяє виявити сили порушення при роботі машини. Ці сили залежать від стану машини, і знання їхніх характеристик і законів взаємодії дозволяє діагностувати дефекти останньої.

Вібрації, як будь-який коливальний процес, можна охарактеризувати такими основними параметрами: 1) частотою коливань; 2) амплітудою, амплітудою швидкості і амплітудою прискорення; 3) енергією коливань.

Для опису й вимірювання механічних вібрацій використаються наступні поняття:

Частота коливань - величина зворотна періоду, визначає кількість циклів коливання за період, вона виміряється в герцах (1Гц = 1/секунду). Вимірювання амплітуди вібрації.

Максимальна Амплітуда (Пік) - це максимальне відхилення від нульової точки, або від положення рівноваги [8-10].

Розмах (Пік-Пік) - це різниця між позитивним і негативним піками. Для синусоїдального коливання розмах у точності дорівнює подвійній піковій амплітуді. На рис. 1.7 наведено графічну інтерпретацію визначення амплітуди вібрацій.

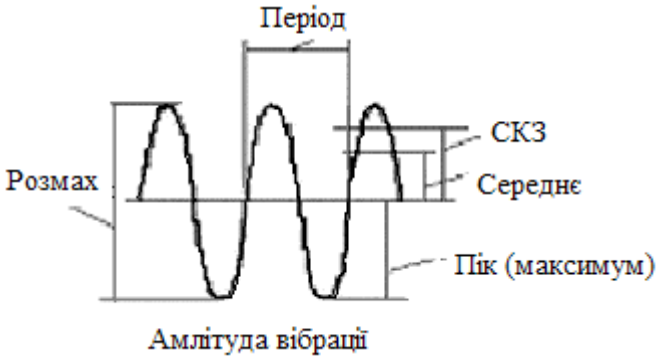


Рисунок 1.7 – Графічна інтерпретація визначення амплітуди вібрацій

Середньоквадратичне значення амплітуди (СКЗ) дорівнює квадратному кореню із середнього квадрату амплітуди коливання. СКЗ є важливою

характеристикою амплітуди вібрації. Для її розрахунку необхідно звести у квадрат миттєві значення амплітуди коливань і усереднити величини, що вийшли, за часом. Для одержання правильного значення, інтервал усереднення повинен бути не менше одного періоду коливання. Після цього виносять квадратний корінь і виходить СКЗ. СКЗ повинне застосовуватися у всіх розрахунках, що ставляться до потужності й енергії коливання.

Електродвигун складається з двох основних частин: статора і ротора. Статор — нерухома частина електродвигуна. В електродвигуні статором служить електромагніт.

Ротор — обертова частина двигуна. Він складається з якоря з обмоткою з ізольованого проводу і колектора, що забезпечує проходження по обмотці електричного струму від джерела. Коли по обмотці якоря йде електричний струм, ротор під дією електромагніта обертається і внаслідок обертання виникають вібрації. Виводи обмотки якоря з'єднані з колектором. Сердечник якоря зібраний зі сталевих пластин. Ротор електродвигуна - приводний елемент, що забезпечує перетворення спільно зі статором, електричної енергії в механічну, в обертовий рух вала. Підшипникові опори двигуна й насоса включають в себе підшипники, що служать опорами для валів і які забезпечують обертання з мінімальним коефіцієнтом тертя разом із системою змазування, а також корпусні деталі - підтримують підшипники, повинні забезпечувати правильне розташування валів. Сполучний елемент призначений для передачі обертового моменту від приводного вала до веденого, компенсації кутового й радіального зсуву валів. Вал - деталь, що обертається навколо своєї осі й призначена для передачі крутного моменту. Виконавчий елемент - робочі лопатки насоса призначені для перетворення механічних параметрів системи.

Для охолодження обмоток служить вентилятор, що встановлюється на валові ротора.

Електродвигуни мають великі переваги в порівнянні з іншими видами двигунів (паровими, внутрішнього згоряння): вони екологічно чисті — при

роботі не виділяють шкідливих газів, диму або пари; економічні — для них не потрібний запас палива і води їх легко установити в будь-якому доступному місці (на стіні, під підлогою трамвая, тролейбуса, у корпусі магнітофона і т.д.). Електродвигуни розрізняються не тільки розмірами, але і призначенням, конструкцією, частотою обертання ротора.

Вібраційний сигнал є фізичним носієм інформації про стан елементів працюючого механізму (насосної установки). Вібрація й шум - природні процеси, що відбуваються у машинах і встаткуванні, і збуджуються вони тими ж динамічними силами, які є причинами зношування й різних видів дефектів і ушкоджень. Вібрація й шум трансформуються одне в одного на межах газового й твердого середовищ, а людина безпосередньо сприймає звук, і лише в обмеженому низькочастотному діапазоні - вібрацію.

Найпростішою формою вібрації є гармонійне коливання тіла, що як функція часу являє собою синусоїду.

$$S(t) = A \cdot sin(\omega t + \phi), \qquad (1.1)$$

де A - амплітуда коливань; φ - початкова фаза коливань; ω- кутова швидкість.

При гармонійних коливаннях: $A, \varphi, \omega = const.$ При майже гармонійних коливаннях: A, φ, ω - повільно мінливі функції часу, деякі з них можуть бути постійними, деякі зростаючими або убутними. Наприклад, амплітуда, кутова швидкість при запуску або при зупинці механізму. У реальних умовах ця класична форма вібрації зустрічається рідко. Більша частина коливань, що зустрічаються на практиці, є полігармонійними - це такі коливання, які можуть бути представлені у вигляді суми двох або більше гармонійних коливань (гармонік), частоти гармонік кратні основній частоті. Основними параметрами вібраційних процесів, що представляють інтерес у даній роботі, є:

1. Частота вібрації f = 1/T (Гц), - період (час повного циклу коливань), с; ω = 2πf –кутова швидкість.

2. Вібропреміщення S (мм, мкм) - складова переміщення, що описує вібрацію. Вібропереміщення, як діагностичний параметр, становить інтерес у

тих випадках, коли необхідно знати відносний зсув елементів об'єкта або деформацію.

3. Віброшвидкість V (мм/с) - похідна віброперемещения за часом. Віброшвидкість використають при визначенні технічного стану машин при полігармонійному характері вібрації. Цей параметр звичайно зв'язують із енергією механічних коливань, спрямованої на руйнування деталей.

4. Віброприскорення а (м/с^2) - похідна віброшвидкості за часом. Віброприскорення використовують при визначенні ступеня ушкодження, наявності дефектів і сили ударів у підшипниках й зубчастих передач. На рис. 1.8 наведено вібраційний сигнал представлений у вигляді віброперемещення, віброшвидкості й віброприскорення.

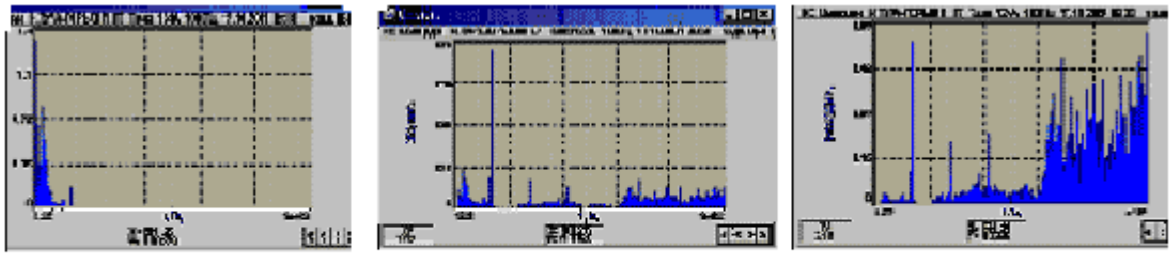


Рисунок 1.8 – Представлення вібраційного сигналу у вигляді віброперемещення, віброшвидкості й віброприскорення

Взаємозв'язок коливальних величин при гармонійних процесах:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot S = a \cdot 10^3/(2 \cdot \pi \cdot f); \quad (1.2)$$

$$S = V/2 \cdot \pi \cdot f = a \cdot 10^3/(2 \cdot \pi \cdot f)^2; \quad (1.3)$$

$$a = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot S \cdot 10^{-3} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V \cdot 10^{-3}. \quad (1.4)$$

Таким чином, вібрація - це механічні коливання тіла біля положення рівноваги. Ідеальна машина, не повинна створювати механічних коливань, тому що в ній вся енергія повинна перетворюватися в корисну роботу. На практиці при роботі будь-яких механічних і електромагнітних систем виникають коливання, викликані різними причинами. За природою виникнення вібрація буває: механічна, аерогідродинамічна, електромагнітна, електродинамічна. За

конструктивним вузлом (елементом) її зухвалим: роторна, лопаткова, підшипникова, зубчаста.

Пошук діагностичних ознак технічного стану безупинно функціонуючих об'єктів - одна з найважливіших операцій. Як діагностичні ознаки можуть фігурувати різні статистичні характеристики коливальних процесів: частота й амплітуда спектрального компонента або їхня сукупність, модуляційні характеристики, імовірнісні характеристики сигналів або їхні взаємозв'язки й ряд інших. Пошук ушкоджень проводиться на заздалегідь виявлених частотах можливих ушкоджень конкретного механізму, що називаються інформативними.

Для розробки автоматизованої системи пошуку несправностей необхідно знати чисельні значення інформативних частот. У табл. 1.1 зведені можливі дефекти насосного агрегату й відповідні їм інформативні частоти.

Таблиця 1.1. Дефекти механізмів, що виявляються вібродіагностичними методами контролю та відповідні інформативні частоти

Вид несправності	**Причина**	**Інформативна частота**
Порушення врівноваженості ротора - дисбаланс	Центр мас ротора не лежить на осі обертання	$f_{пошк}=f_{вр}$
Неспіввісність валів	Нерівномірне теплове розширення деталей механізму, не точна вивірка валів; недостатня жорсткість кріплень	$f_{пошк}=f_{вр}$
Ушкодження в муфтах	Зношування, ушкодження елементів; порушення центрування валів	$f_{пошк}=zf_{вр}$, де z - кількість зубців(пальців) муфти

Продовження таблиці 1.1

Ушкодження підшипників кочення	Відколи, віспини, тріщини на бігових доріжках і тілах кочення	$f_{пошк} = 0{,}5 \cdot z \cdot f_{вр} \cdot (1 - d \cdot cos\,\beta\,/D)$ z- число тіл кочення; d- діаметр тіл кочення; β - кут контакту; D - діаметр окружності, що проходить через центри тіл кочення
Ушкодження підшипників ковзання	Зношування, задир, еліпсність шийки валу, продавлювання масляної плівки, автоколивання	$f_{повр}=1…7f_{вр}$
Ушкодження лопаток	Зрив потоку з лопаток через зношування, ушкоджень	$f_{повр}=zf_{вр}$, де z - кількість лопаток
Електромагнітні дефекти	Нерівномірний повітряний зазор	$f_{пошк}=50i$, где i = 1, 2, …, zп - кількість пар полюсів; $f_{пошк}=1/2f$

1.3. Математична модель вібрацій

Вібрації, що виникають у механізмі передаються на корпус двигуна через підшипникові вузли [5]. Елементи опорного вузла утворять механічну систему. На рис. 1.9 наведена схема опорного вузла вала, що представляє собою структурну схему моделі.

У систему входять: обертовий вал з лопатками, що є джерелом полігармонійної вібрації; підшипник кочення - елемент, що володіє пружними властивостями й передає вібраційними збурюваннями на корпус механізму; опора, призначена для фіксації положення вала, демпфірування механічних коливань. На цій схемі вал у зборі масою m_1, що обертається з кутовою частотою ω_1, навантажений періодичною силою $P_0 \cdot sin\,\omega \cdot t$, що виникає в результаті дефектів, дії технологічних і динамічних навантажень. P_0 - статичне навантаження на підшипник; $\omega = 2\pi f$ - кутова частота обертання, викликана дефектом або несправністю.

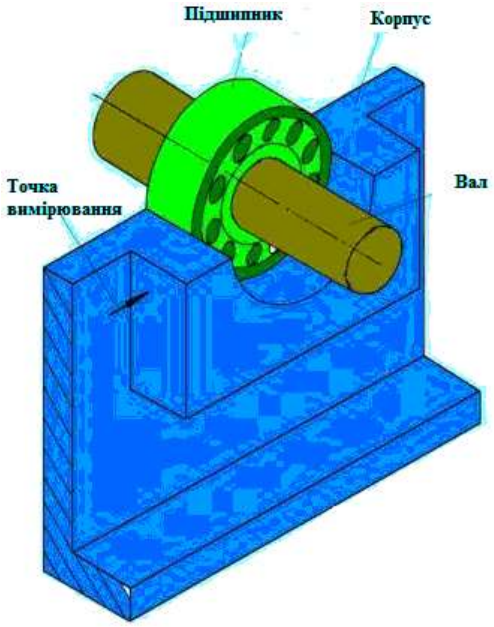


Рисунок 1.9 - Структурна схема опорного вузла вала електричної машини

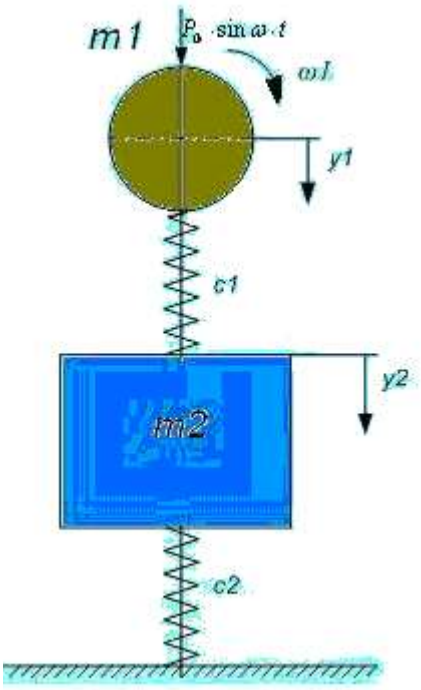


Рисунок 1.10 - Розрахункова схема опорного вузла вала електричної машини

З табл. 1.1 можна визначити, що інформативна частота підшипника кочення з ушкодженим зовнішнім кільцем визначається як:

$$f_{пошк} = 0{,}5 \cdot z \cdot f_{вр} \cdot (1 - d \cdot cos\,\beta\,/D) \qquad (1.5)$$

Вал встановлений на підшипнику кочення із жосткістю c_1 на опорі массою m_2 із жосткістю c_2. Між валом і підшипником діє демпфер b_1, між підшипником і опорою - демпфер b_2. Спрощуємо модель зневажаючи демпфіруванням вала й підшипника b1=b2=0. Необхідно визначити механічні коливання вала насосного агрегату y_1. Розрахункова схема, складена на підставі структурної моделі наведена на рис. 1.10.

Об'єкт складається із двох компонентів: 1 - вал, 2 - опора вала. На розглянутий об'єкт ззовні діє гармонійна сила $P_0 \cdot sin\,\omega \cdot t$.

Вихідними величинами є віброперeміщення компонентів - c_1 і c_2. Для одержання диференціальних рівнянь, що описують механічні коливання системи із двома ступенями волі запишемо загальне рівняння Лагранжа [5]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial q'}\right) - \frac{\partial T}{\partial q} = -\frac{\partial П}{\partial q'} \tag{1.6}$$

Тут t - час, q - узагальнена координата, q' - узагальнена швидкість, Т - кінетична енергія, П - потенційна енергія.

В якості узагальненої координати приймаємо віброперeміщения - c_1 - для вала, c_2- для опори вала. Знайдемо кінетичну енергію двох мас

$$T = \frac{m_1 \cdot y_1'}{2} + \frac{m_2 \cdot y_2'}{2}. \tag{1.7}$$

Знайдемо потенційну енергію деформації

$$П = \frac{c_2 \cdot y^2{}_2}{2} + \frac{c_1 \cdot (y_1 - y_2)^2}{2}. \tag{1.8}$$

Утворимо похідні, необхідні для підстановки в рівняння Лагранжа:

$$\frac{\partial T}{\partial q'} = \frac{\partial T}{\partial y_1'} = m_1 \cdot y_1'; \frac{\partial T}{\partial y_2'} = m_2 \cdot y_2'; \frac{\partial П}{\partial y_1} = c_1(y_1 - y_2); \tag{1.9}$$

$$\frac{\partial П}{\partial y_2} = c_2 \cdot y_2 + c_1(y_2 - y_1); \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial y_1'}\right) = m_1 \cdot y_1''; \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial y_2'}\right) = m_2 \cdot y_2''. \tag{1.10}$$

Записуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} m_1 \cdot y_1'' + c_1(y_1 - y_2) = P_0 \cdot sin\,\omega \cdot t; \\ m_2 \cdot y_2'' + c_1(y_2 - y_1) + c_2 \cdot y_2 = 0. \end{cases} \tag{1.11}$$

Дана система рівнянь являє собою рівняння стану розглянутого об'єкта. Вхідною величиною, що збурює, є гармонійна сила $P_0 \cdot sin\,\omega \cdot t$ [5], де $\omega =$

$\omega_{пошк} + \omega_{вр}$ - сумарна кутова частота обертання; $\omega_{вр} = 2 \cdot \pi \cdot f_{вр}$-кутова частота обертання вала.

З використанням параметрів з табл. 1.1 запишемо можливі частоти ушкоджень:

- кутова частота обертання, викликана ушкодженням підшипника

$$\omega_{пошк} = 2 \cdot \pi \cdot f_{пошк} = 2 \cdot \pi \cdot 0{,}5 \cdot z \cdot f_{вр} \cdot \left(1 - d \cdot \frac{cos\,\beta}{D}\right), \quad (1.12)$$

де D - діаметр окружності, що проходить через центри тіл кочення підшипника кочення; d - діаметр тіл кочення; z -кількість тіл кочення; β - кут контакту; кутові частоти обертання, викликані електромагнітними дефектами.

Ексцентричність ротора:

$$\omega_{пошк} = 2 \cdot \omega_{вр} = 4 \cdot \pi \cdot f_{вр} \quad (1.13)$$

Проблеми статора:

$$\omega_{пошк} = 0{,}5 \cdot \omega_{вр} = 0{,}5 \cdot \pi \cdot f_{вр} \quad (1.14)$$

- кутові частоти обертання, викликані ушкодженням лопаток:

$$\omega_{пошк} = z \cdot \omega_{вр} = z \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{вр}, \quad (1.15)$$

де z - кількість лопаток насоса.

В ході математичного моделювання були отримані результати, що приведені на рис. 1.11-1.14.

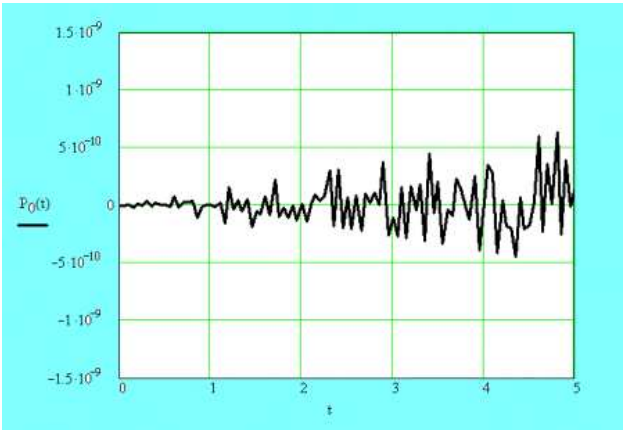


Рисунок 2.11- Збурююча сила, викликана дисбалансом ротора двигуна

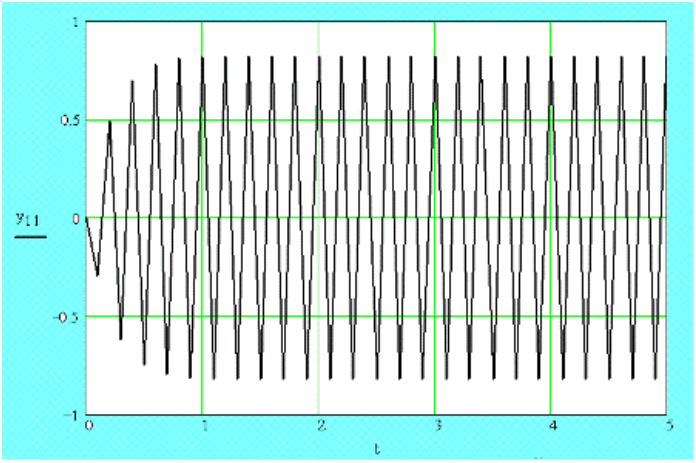


Рисунок 1.12 - Механічні коливання валу викликані дисбалансом ротора двигуна

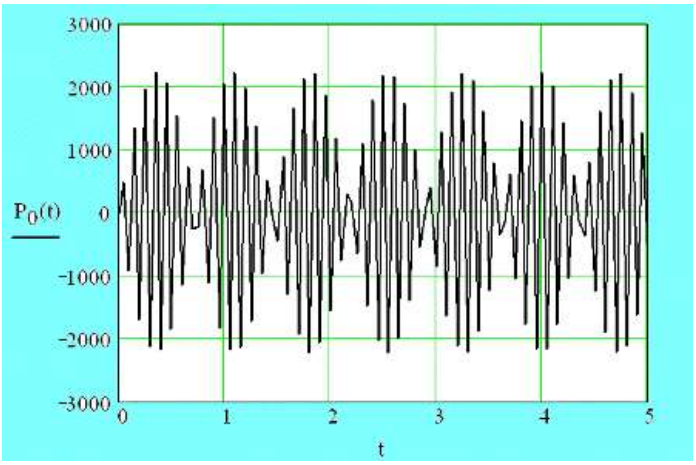


Рисунок 1.13 - Збурююча сила, викликана дефектами підшипників

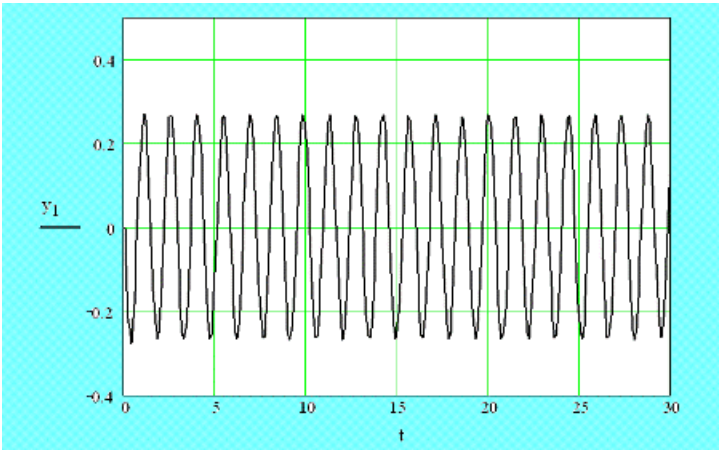


Рисунок 1.14 - Механічні коливання, викликані дефектами підшипників

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА ВИБІР НЕОБХІДНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ

2.1. Розробка структурної схеми

Структурна схема інформаційної системи (рис. 2.1) вібродіагностики електричних машин буде складатися з таких основних функціональних блоків: *g/U* – датчик вібрації, акселерометр, призначений для вимірювання віброприскорення; МХ– мультиплексор; ∆/# - АЦП; MCU – мікроконтролер; USB – інтерфейс; PC – персональний комп'ютер.

На вхід мультиплексора поступають вхідні сигнали з чотирьох вимірювальних каналів, мультиплексор – призначений для керування потоками даних для вибору каналу за якими проводиться вимірювання та інших задач пов'язаних з керуванням потоками інформації. В нашому випадку мультиплексор має можливість вибрати чотири канали передачі даних. Керування мультиплексором здійснює мікроконтролер. Усі чотири канали мають на своєму виході аналогову величину, яку не потрібно підсилювати до певного рівня. Мультиплексор в даній схемі виконують роль електричних ключів, але при цьому дозволяють значно зменшити кількість задіяних ліній вводу-виводу мікроконтролера.

Перетворення аналогового сигналу в цифровий код проводить аналого-цифровий перетворювач, призначений для перетворення вихідної безперервної величини в якій міститься вимірювальна інформація про вібрацію електричної машини. Мікроконтролер, призначений для обробки вимірювальної інформації, яка після аналого-цифрового перетворення поступає на його входи. Також він здійснює керування потоками інформації, забезпечення обміну даними між окремими частинами інформаційної системи та зовнішніми пристроями, в даній дипломній роботі це пристрої регулювання віброприскорення. Мікроконтролер за допомогою певних двійкових комбінацій керує мультиплексором.

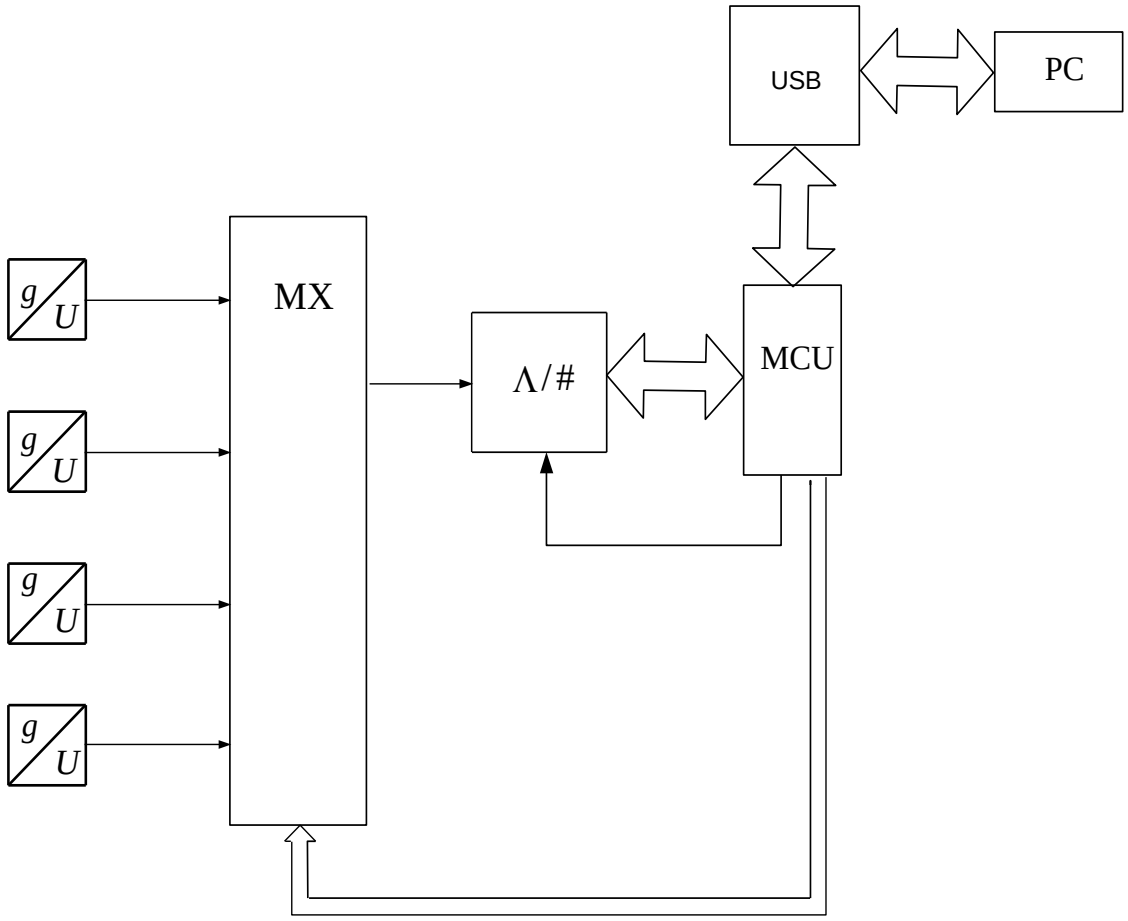


Рисунок 2.1 – Структурна схема інформаційної системи вібродіагностики електричних машин

Інтерфейс є важливим функціональним вузлом в сучасних системах вібродіагностики. Інтерфейсом називають сукупність правил, протоколів, апаратного та програмного забезпечення, призначених для обміну даними. Інтерфейси стандартизуються міжнародною електротехнічною комісією або іншими установами. Від вибору інтерфейсу залежать багато параметрів системи, а саме: швидкість обміну даними, відстань передачі даних, точність передачі, “життєздатність” інтерфейсу. В даному випадку був використаний USB інтерфейс, так як багато виробників нових поколінь сучасних ПК відмовляються від використання COM–порту, тобто від використання інтерфейсу RS232. Це дає змогу зробити систему як портативною, так і стаціонарною.

Отже, можна відзначити такі характеристики вищенаведеної структурної схеми інформаційної системи вібродіагностики електричних машин: надійність системи, швидкодія, простота реалізації, мобільність.

Оскільки поставлена задача створити систему, яка має вихід до персонального комп'ютера, то буде більш доцільно побудувати систему, в якій використовується цифрова елементна база.

Систему потрібно розробити таким чином, щоб її можна було використати у виробництві. Дана система діагностики є чотирьохканальною, оскільки використано 4 датчики вібрації, два датчика вібрації (або акселерометри), які є трьохкоординатними (трьохкомпонентними) і які вимірюють три взаємоперпендикулярних вектори віброприскорення, що проходять через одну точку, що знаходиться в центрі п`єзоелемента вібродатчика, та два датчика, що вимірюють віброприскорення в одному напрямку. Таким чином буде задіяний весь спектр вимірювання параметрів вібрації електричної машини, що дасть змогу більш точно визначити технічний стан електричної машини. Для реалізації системи потрібно включити в неї АЦП для того, щоб він перетворював аналоговий сигнал у цифровий код, так як основною метою роботи є створення автоматизованої системи з використанням новітніх технологій. В нашому випадку АЦП вже вбудований в мікроконтролер MSP430F5529.

В системі також передбачено наявність інтерфейсу для зв'язку з персональним комп'ютером, в даному випадку за умовою це інтерфейс USB.

Оскільки в системі використовується цифрова елементна база, то підвищується швидкодія системи, точність вимірювання і надійність.

Після того, як були виміряні параметри вібрації електричної машини вони зіставляються з оптимальними параметрами, які записані в базі знань і за допомогою діагностичної моделі і спеціалізованого програмного забезпечення створюється певне інформаційне середовище, з використанням якого стає можливим виконання процедури діагностування, визначення технічного стану, та встановлення діагнозу електричної машини та її складових елементів.

Результати технічного діагностування виводяться за допомогою засобів відображення (принтер).

2.2. Вибір мікроконтролера

Найбільшими виробниками мікроконтролерів в світі є Atmel Corporation, Texas Instruments, Analog Devices, Microchip. Менш потужними є Intel, Winbond, Scenix, Motorola [6].

Основним структурним елементом системи є мікроконтролер. Тому на основі проведених досліджень було обрано мікроконтролер типу MSP430F5529 [11], який здійснює основні функції управління, збору і передачі інформації.

Мікроконтролер має всі ознаки комп'ютера такі як: наявність процесора або арифметико-логічного пристрою, оперативної пам'яті, портів введення-виведення та інших периферійних засобів. На теперішньому етапі розвитку науки і техніки мікроконтролери дуже широко використовуються в усіх галузях промисловості: від вирішення найпростіших задач до реалізації найскладніших автоматизованих систем.

Вибір мікроконтролера є дуже важливим при побудові систем вібродіагностики. Для поставленої задачі нам потрібно вибрати такий мікроконтролер, який би мав не високе енергоспоживання та в разі збою роботи головного сервера (комп'ютера) зміг би забезпечити роботу локальної вимірювальної системи.

Зростаючий попит на продукцію з автономним (батарейним) живленням викликав необхідність створення мікроконтролерів з низьким і наднизьким енергоспоживанням. Компанія Texas Instruments розробила й серійно випускає сімейство мікроконтролерів MSP430, що задовольняє вимоги найвимогливішого розроблювача пристроїв на мікроконтролерах. Застосовуючи мікроконтролери MSP430, розроблювачі одержують потужний інструмент для роботи з аналоговими й цифровими сигналами при наднизькому споживанні енергії

батареї. Енергії літієвої батареї досить для живлення приладу протягом 5 років [11].

В зв`язку з широким розповсюдженням технології підключення через інтерфейс USB зростає потреба у вбудованих інтелектуальних процесорних рішеннях, які здатні забезпечити пролонговану автономну роботу, портативність і універсальність. Тому сімейство MSP430F5xx є наступним кроком у розвитку мікроконтролерів MSP430 компанії Texas Instruments.

Мікроконтролери MSP430F5xx з USB (12 Мбіт/с) (рис. 2.2) розроблялися спеціально для забезпечення тривалої роботи пристрою від батареї в портативних застосуваннях забезпечують ультранизький рівень енергоспоживання і мають широкий набір аналогових периферійних пристроїв.

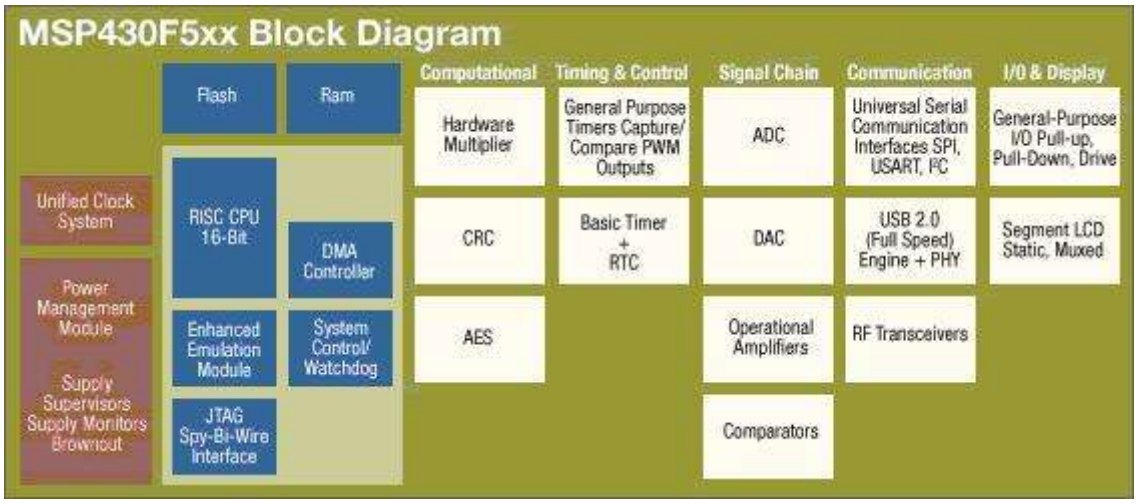


Рисунок 2.2 – Блок схема архітектури мікроконтролерів сімейства MSP430F5xx

Його особливості:

- П`ять різних режимів енергоспоживання: в активному режимі (200 мкА/МГц); в режимі очікування (2,5 мкА);

- Час пробудження триває менше 5 мкс;

- Розмір флеш-пам`яті від 8 до 128 КБ;

- Аналогова перефирія включає в себе 10- розрядний або 12 розрядний АЦП, який споживає менше 200 мкА під час роботи, а також субмікроамперний компаратор з наднизьким енергоспоживанням;

- Апаратний помножувач;

- 16-розрядні таймери;

- До чотирьох послідовних комунікаційних інтерфейсів - UART, SPI і I2C;

- контролери пропонуються в корпусах 48 QFP, QFN; 64 QFN; 80 QFP, BGA;

- контролер містить LDO, що дозволяє використовувати одне живлення 5 В.

На рис. 2.3 зображено зовнішній вигляд мікроконтролера MSP430F5529.



Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд мікроконтролера MSP430F5529

На рис. 2.4 зображена функціональна схема мікроконтролера MSP430F5529.

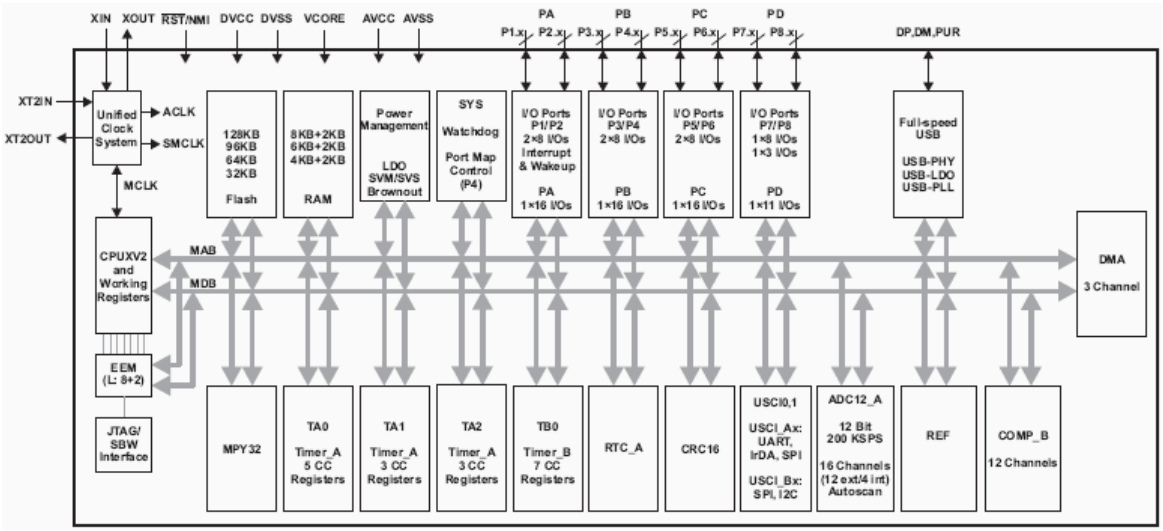


Рисунок 2.4 - Функціональна схема мікроконтролера MSP430F5529

На рис. 2.5 зображено виводи мікроконтролера MSP430F5529. MSP430F5xx виробляються за новою технологією, у зв'язку із чим знизилася напруга живлення ядра й безлічі периферійних модулів. Модуль керування

напругою живлення (PMM) - це зовсім новий модуль у складі MSP430. До нього підключена більша частина логіки MSP430F5xx. Його завдання, як уже зрозуміло з назви й попередніх двох пропозицій, полягає в регулюванні напруги живлення MSP430x5xx. PMM здійснює контроль спадання напруги живлення. Рівні припустимого спадання напруги живлення регулюються програмно, що можна використати для динамічного перемикання між чотирма рівнями напруги, у результаті чого знижується енергоспоживання додатка в ті моменти, коли не потрібна максимальна продуктивність.

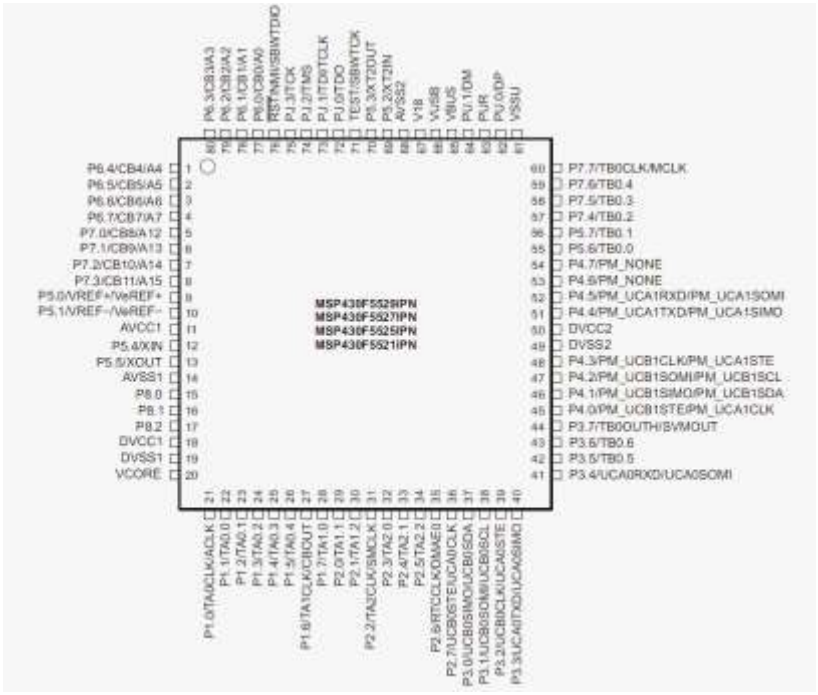


Рисунок 2.5 – Виводи мікроконтролера MSP430F5529

У систему синхронізації мікроконтролерів MSP430F5xx доданий новий низькочастотний вбудований осцилятор, названий REFO. Цей осцилятор дозволяє обійтися без 32-кілогерцового кварцу як джерело опорного сигналу системи синхронізації. Вбудований осцилятор із цифровим керуванням (DCO) виводить мікроконтролер з режимів низького енергоспоживання в активний режим менше ніж за 5 мкс. Використовуються три системних тактових сигнали: ACLK, MCLK й SMCLK. Для MSP430x5xx немає різниці, який з осциляторів

буде джерелом для цих сигналів, що надає системі синхронізації нових мікроконтролерів неперевершену гнучкість.

Системний модуль SYS - новий модуль для MSP430 - бере на себе частина системних функцій, наявних у попередніх сімействах, а також вирішує кілька завдань, властивих тільки MSP430F5xx. До складу системного модуля входить сторожовий таймер. Системний модуль обробляє всі функції скидання й немаскуючі переривання (NMI), а також дескриптори мікроконтролера.

Дескриптори являють собою таблиці з інформацією про мікроконтролер (тип, ревізія, доступні периферійні пристрої). Ця функція корисна при розробці систем, що вбудовують, коли система може налаштовувати драйвера залежно від доступних ресурсів. Ці таблиці також можуть бути використані різними відладочними засобами для настроювання підключення.

Розрядність сторожового таймера збільшена до 32 біт. Також є зміни в логіці обробки помилок тактування сторожового таймера. Тепер при відмові ACLK або SMCLK (від яких тактується сторожовий таймер) автоматично відбувається перемикання на осциллятор VLO.

Мікроконтролери MSP430x5xx підтримують чотирипровідний і двопровідний (Spy-Bi-Wire) інтерфейси JTAG. Режим завантаження вибирається за допомогою подачі певної послідовності сигналів на виводи TEST/SBWTCK й RST/NMI/SBWTDIO.

Система пам'яті MSP430F5xx значно відрізняється від системи пам'яті MSP430F2xx й MSP430x4xx. Ці зміни необхідні для розширення адресного простору, підтримки нових периферійних пристроїв і подальших удосконалень. Область пам'яті для периферійних пристроїв розширилася до 4 КБ. Доступ до більшості регістрів периферійних пристроїв можна здійснювати у форматі байт і слів (16-битий), однак є виключення.

Область пам'яті ОЗУ MSP430F5xx починається з адреси 01C00h. Розмір цієї області залежить від обсягу ОЗУ конкретного мікроконтролера. Таблиця векторів переривань перебуває там же, вгорі адресного простору, але число

векторів переривань збільшилося до 64. Область пам'яті для завантажника збільшилася до 2 кбайт, тому що завантажник підтримує більша кількість режимів завантаження, у тому числі й режим, генерований користувачем.

Модуль CRC є новим для MSP430, він апаратно обчислює циклічний надлишковий код для перевірки коректності даних.

32-бітний апаратний помножувач MPY32 являє собою розширену версію 16-бітного помножувача, що використовується в мікроконтролерах MSP430x2xx й MSP430x4xx, може здійснювати 32-бітні множення. На відміну від попередника, MPY32 може працювати із дробовими числами у форматах Q. Додано режим насичення для запобігання переповнення.

До регістрів універсального послідовного комунікаційного інтерфейсу USCI тепер можна звертатися у форматі байтів і слів (16-битий). Покращилася система переривань комунікаційного інтерфейсу: виділено два вектори переривання, один для USCI_A, іншої для USCI_B, що значно полегшує обробку переривань від кожного з модулів.

Цифрові виводи містять резистори, що підтягують. Крім цього, з'явилася можливість управляти навантажувальною здатністю виводу. Тобто, у тих випадках, коли не потрібно видавати максимальне значення струму в навантаження, за допомогою запису одного біта в регістр керування можна перевести вивід у стан з низькою навантажувальною здатністю. При цьому знижується енергоспоживання й рівень електромагнітних перешкод мікроконтролера.

12-бітний АЦП ADC12_A являє собою поліпшену версію ADC12, що використається в багатьох пристроях MSP430x2xx й MSP430x4xx. Одним з найважливіших відмінностей MSP430F5529 від попередників є наявність USB-інтерфейсу. Поширеність USB-інтерфейсу обумовлює його привабливість для додатків, що здійснюють обмін даними із ПК або іншими мікроконтролерами, періодичне завантаження даних або відновлення прошивання ззовні. Дуже часто такі пристрої є портативними, як, наприклад, медичні й промислові пристрої, що

здійснюють нагромадження даних з наступною їхньою передачею в головний пристрій для аналізу й постобробки. Через портативність пристроїв застосування USB повинне бути економічним з погляду енергоспоживання й ціни.

Одна із причин поширеності USB - простота використання. Однак за простотою використання ховається складність технології USB, що дуже часто недооцінює користувач при спробі розробити USB-додаток. Спливає безліч нових термінів і процедур, не розібравшись із якими, користувач не може домогтися правильного функціонування. У результаті цього розтягуються строки, збільшується вартість розробки.

В MSP430F5529 технологія USB інтегрована таким чином, що користувачеві немає необхідності розбиратися з її організацією. Для використання USB у схему пристрою необхідно додати тільки USB-коннектор і кілька дискретних компонентів (рис. 2.6), а в програмний код включити API-стеки, пропоновані компанією-виробником і реалізуючі три найбільш популярні класи пристроїв.

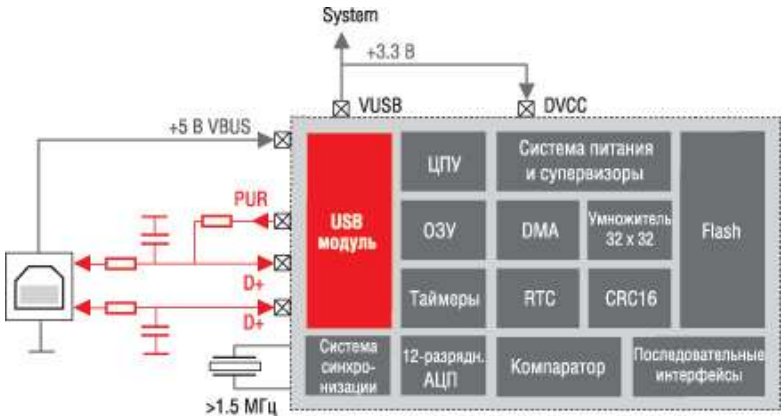


Рисунок 2.6 - Використання USB-мікроконтролера MSP430F5529

Стеки API-функцій беруть на себе всю чорнову роботу з обробки процедур USB, є інтуїтивно зрозумілими для розроблювача, дозволяють значно прискорити процес розробки й вихід нового пристрою на ринок.

По своїй природі, MSP430 оптимізовані для роботи з низьким енергоспоживанням. Ця тенденція зберігається й у нових мікроконтролерах, незалежно від того, використовується USB-інтерфейс чи ні. MSP430 має п'ять

режимів енергоспоживання. В активному режимі, при максимальній продуктивності, струм споживання становить усього 160 мкА/МГц. У режимі очікування це значення знижується до 1,5 мкА, причому перехід в активний режим займає 5 мкс. Значного скорочення енергоспоживання можна також домогтися за рахунок використання контролера прямого доступу до пам'яті.

Одним з переваг використання USB у портативних додатках є можливість подачі напруги живлення через інтерфейс. В ідеальному випадку, коли пристрій підключений до хосту, воно взагалі не витрачає заряд батареї. Через USB-протокол подається напруга 5 В, для його зниження до 3,3 В потрібен перетворювач. Завдяки наявності LDO, MSP430 прекрасно справляється із цим завданням, скорочуючи тим самим число зовнішніх компонентів і розміри пристрою.

Напруга від USB-інтерфейсу, крім усього іншого, може використатися для підзарядки батареї (рис. 2.7). Сімейство зарядних пристроїв BQ2407x/3x було спеціально розроблене для таких цілей.

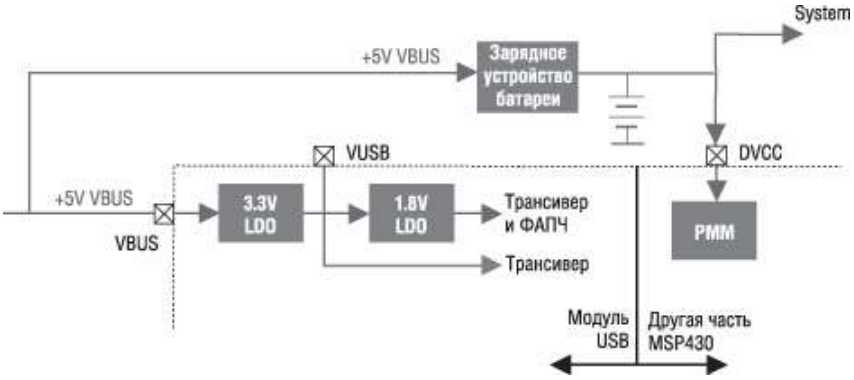


Рисунок 2.7 - Підзарядка батареї від USB-інтерфейсу

Безпосередньо для MSP430F552x у корпусі LQFP доступна плата MSP-TS430PN80USB з 80-вивідною ZIP-колодкою для програмування й налагодження мікроконтролерів у корпусах TQFP через JTAG- або Spy-Bi-Wire-інтерфейс [11]. Середовище розробки й JTAG-програматор можуть поставлятися в комплекті або окремо (рис. 2.8).

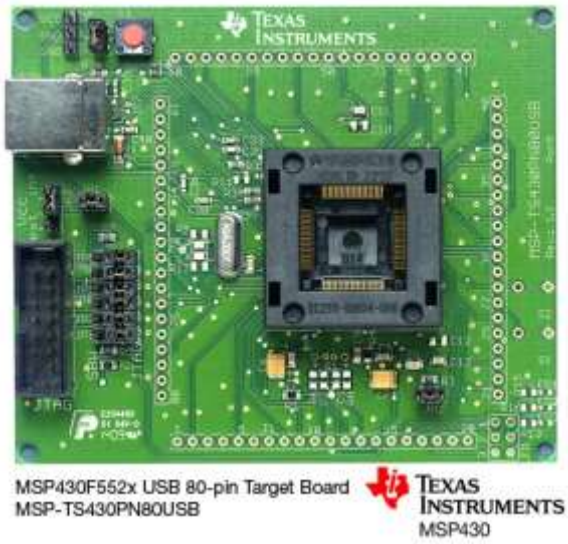


Рисунок 2.8 - Плата MSP-TS430PN80USB

Як програмне середовище розробки для всіх мікроконтролерів MSP430 пропонується використати Code Composer Essentials або IAR Embedded Workbench, у які входить Сі-компілятор, асемблер, компоновщик, редактор і безліч інших модулів, що полегшують написання програмного коду і його налагодження. Серед JTAG-программаторов найбільшою популярністю користується MSP-FET430UIF.

2.3. Вибір джерела живлення

Живлення всіх елементів має бути стабільним, щоб уникнути збоїв у роботі системи. Для забезпечення високої стабільності використаємо джерело опорної напруги. Найкращими джерелами, які випускаються в теперішній час є: REF-02, AD586, AD780, LM113, TL431. Одним з найкращих джерел опорної напруги є мікросхема AD780. Схема підключення опорного джерела живлення. AD780 показана на рис. 2.9.

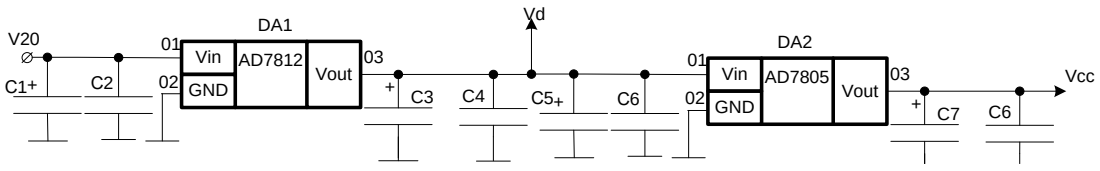


Рисунок 2.9 – Схема включення джерела живлення

Джерело опорної напруги AD780 має такі технічні характеристики: відхилення напруги від опорного значення: ± 0,02 В; струм споживання 2 μA; діапазон струму навантаження: від 0 до 10 mA; температурний коефіцієнт вихідної напруги: 10^{-5}/ ºС.

Для того щоб вхідний сигнал якомога менше спотворити, при його проходженні через резистори, які будемо використовуватися для ділення напруги та схем включення мікроелементів – будуть прецензійними.

2.4. Інтерфейс USB

USB (англ. Universal Serial Bus) - універсальна послідовна шина, призначена для підключення периферійних пристроїв. Шина USB являє собою послідовний інтерфейс передачі даних для високо-, середньо- і низькошвидкісних периферійних пристроїв.

Розробка специфікацій на шину USB виробляється в рамках міжнародної некомерційної організації USB Implementers Forum (USB-IF), що поєднує розроблювачів і виробників устаткування із шиною USB.

Для підключення периферійних пристроїв до шини USB використовується чотирьохпровідний кабель, при цьому два проведення (кручена пари) у диференціальному включенні використовуються для прийому й передачі даних, а два проведення - для живлення периферійного пристрою. Завдяки вбудованим лініям живлення, USB дозволяє підключати периферійні пристрої без власного джерела живлення (максимальна сила струму, споживаного пристроєм по лініях живлення шини USB, не повинна перевищувати 500 мА).

До одного контролера шини USB можна приєднати до 127 пристроїв по топології "зірка", у тому числі й концентратори, до яких можна ще приєднати 127 пристроїв.

У цей час широко використовуються пристрої, виконані у відповідності зі специфікацією USB 2.0. Ведеться впровадження у виробництво пристроїв специфікації USB 3.0.

Причиною виникнення нового стандарту для передачі інформації, послужило бажання спростити з'єднання ПК із периферійними пристроями. Основна мета стандарту - створити для користувачів можливість користуватися таким інтерфейсом, який би мав максимальну простоту, універсальність, і використав принципи Plug&Play (автоматичне розпізнавання підключеного пристрою) і гаряче з'єднання (hot-plugin).

Основна мета стандарту, поставлена перед його розроблювачами, - забезпечити користувачам реальну можливість роботи в режимі Plug&Play (автоматичне распознование підключеного пристрою) і гаряче з'єднання (hot-plugin) з периферійними пристроями. Це означає, що повинне бути передбачене підключення пристрою до працюючого комп'ютера, автоматичне розпізнавання його негайно після підключення й наступної установки відповідних драйверів (якщо це необхідно). Крім того, бажано забезпечити подачу живлення для малопотужних пристроїв із самої шини. Швидкість шини повинна бути достатньою для переважної більшості низькошвидкісних периферійних пристроїв. При цьому контролер USB займає тільки одне переривання незалежно від кількості підключених до шини пристроїв. Це дозволило б підключати до ПК під час роботи різні пристрої вводу-виводу, з умовою негайного автоматичного розпізнавання типу й моделі підключеного пристрою.

Специфікація USB 1.1 вийшла у вересні 1998 року, у ній були виправлені помилки версії 1.0.

Hewlett-Packard, Intel, Lucent (нині Alcatel-Lucent), Microsoft, NEC, і Philips спільно виступили з ініціативою по розробці більше швидкісної версії USB. Специфікація USB 2.0 була опублікована у квітні 2000 року, і наприкінці 2001 року ця версія була стандартизована USB Implementers Forum. USB 2.0 є сумісною з усіма попередніми версіями USB.

У цей час USB активно впроваджується виробниками комп'ютерної периферії, а фірма Apple випускає комп'ютери тільки з USB як зовнішня шина.

2.5. Обґрунтування вибору датчика вібрації

Вимірювання вібрації, виконані в промислових умовах мають вимоги, відмінні від вимог при лабораторних вимірюваннях. Багато додатків вимагають наявності перетворювача для сертифікації на відповідність нормам безпеки. Визначальними міркуваннями в такому застосуванні є:

1. Міцність — фізичне оточення усередині працюючого агрегату вимагає міцної конструкції корпуса датчика. Кабельне рознімання, кабель і кріплення повинні могти витримувати щоденний вплив промислового оточення.

2. Герметичне заливання — промислове середовище допускає попадання вологи й інших рідких речовин на поверхню. Герметичний корпус повинен захищати датчик від таких впливів, забезпечуючи його роботу протягом тривалого періоду часу.

3. Частотна характеристика - це залежність електричного вихідного сигналу акселерометра від зовнішнього механічного впливу в частотному діапазоні з фіксованою амплітудою. Це один з основних параметрів, від якого залежить вибір того або іншого компонента. Діапазон частот звичайно визначається серією експериментів і вказується в специфікації. Звичайно цей параметр указується з точністю ±5% від опорної частоти (звичайно 100 Гц).

Багато компонентів специфіковані на ±1 дб або ±3 дб. Ці значення вказують на точність акселерометра в заданому частотному діапазоні.

4. Кількість осей вимірювання. Сьогодні випускаються компоненти з однією й трьома вимірювальними осями. Ще одна можливість побудови складної системи - це організація трьох акселерометрів в один вимірювальний блок [8].

5. Вага акселерометра. При зіткненні акселерометра й об'єкта вимірюване прискорення зміниться. Цього ефекту можна уникнути, якщо не забувати про вагу самого датчика. Як емпіричне правило можна прийняти те, що вага акселерометра не повинна перевищувати вагу предмета не більше ніж на 10%.

6. Чутливість і розрізнювальна здатність. Коли необхідні датчики з малим вихідним сигналом або широким динамічним діапазоном, варто звернути увагу на розрізнювальну здатність і чутливість.

Для промислового використання за вищеперерахованими параметрами найкраще підходять п'єзоелектричні акселерометри типу АР2038.

Трьохкоординатний «однокристальний» акселерометр вимірює три взаємоперпендикулярних вектори віброприскорення, що проходять через одну точку, що знаходиться в центрі п`єзоелемента вібродатчика. Інформація з електродів п`єзоелемента перетворюється багатоканальним диференційним підсилювачем-суматором і виводиться на три BNC виходи x, y, і z.

Вібродатчик дозволяє визначити об’ємний фазовий портрет віброприскорення в точці його закріплення на об’єкті. Зовнішній вигляд датчика зображено на рис. 2.10 і показано його габарити на рис. 2.11.

Призначення: Вимірювання вібраційного і ударного прискорення в діагностичних системах і при лабораторних вимірюваннях в умовах сильних електромагнітних полів [8].

Основні особливості акселерометрів: поєднання високих значень осьової чутливості, власної частоти і ударної стійкості; низька чутливість до електромагнітних полів; вбудований перед підсилювач стандарту ICP; широкий діапазон напруги живлення і струму; низький рівень власного шуму.



Рисунок 2.10 - Зовнішній вигляд акселерометра АР2038

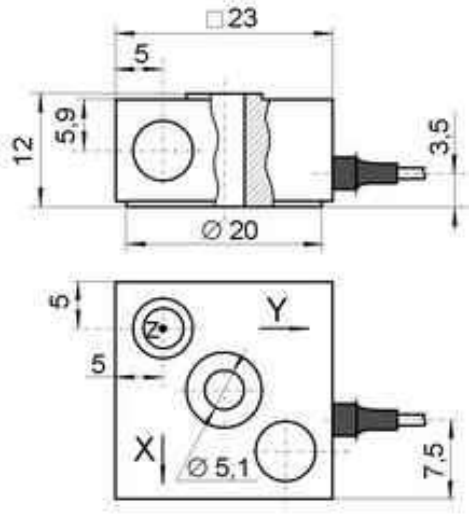


Рисунок 2.11 – Габарити акселерометра АР2038

В табл. 2.1 наведено основні технічні характеристики акселерометра АР2038, а на рис. 2.12 наведена електрична схема акселерометра АР2038.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики акселерометра АР2038

Технічні характеристики акселерометра АР2038	
Осьова чутливість (± 10 %)	10 мВ/g
Відносна поперечна чутливість	< 5 %
Амплітудний діапазон	± 500 g
Максимальний удар пікове значення	± 500 g
Робочий температурний діапазон	-40...+125 °С
Частотний діапазон (нерівномірність±1 дБ)	0,5Гц- 12 кГц
Маса	34 г. (титановий сплав)
Напруга живлення	+(15...30) В
Струм споживання	2-20мА
Напруга на виході, В	5
Похибка	1%
Тип з`єднання	3 х BNC/10-32UNF
Кабель	2*м (вбудований)

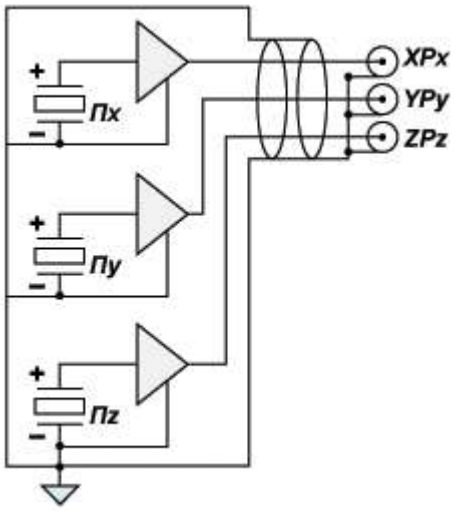


Рисунок 2.12 - Електрична схема акселерометра АР2038

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

3.1. Розробка алгоритму

Інформаційна система вібродіагностики електричних машин повинна виконувати наступні завдання:

- вимірювати віброприскорення;
- передавати дані на персональний комп’ютер;
- здійснювати пошук дефекту;
- визначати технічний стан електричної машини;
- визначати контроль запасу працездатності.

Дана інформаційна система працює за наступним алгоритмом:

- спочатку відбувається ініціалізація мікроконтролера;
- зчитується інформація з першого, другого, третього, четвертого вимірювального каналу;
- інформація, що надходить з вимірювальних каналів фіксується в оперативній пам’яті мікропроцесора;
- після цього інформація передається на ПК, де вже здійснюється обробка отриманих даних з вимірювальних каналів;
- порівняння даних з даними, що знаходяться в базі знань;
- виведення діагнозу про технічний стан електричних машин на екран;
- друк діагнозу на папері.

На рис. 3.1 наведена блок-схема інформаційної системи вібродіагностики електричних машин (Додаток А).

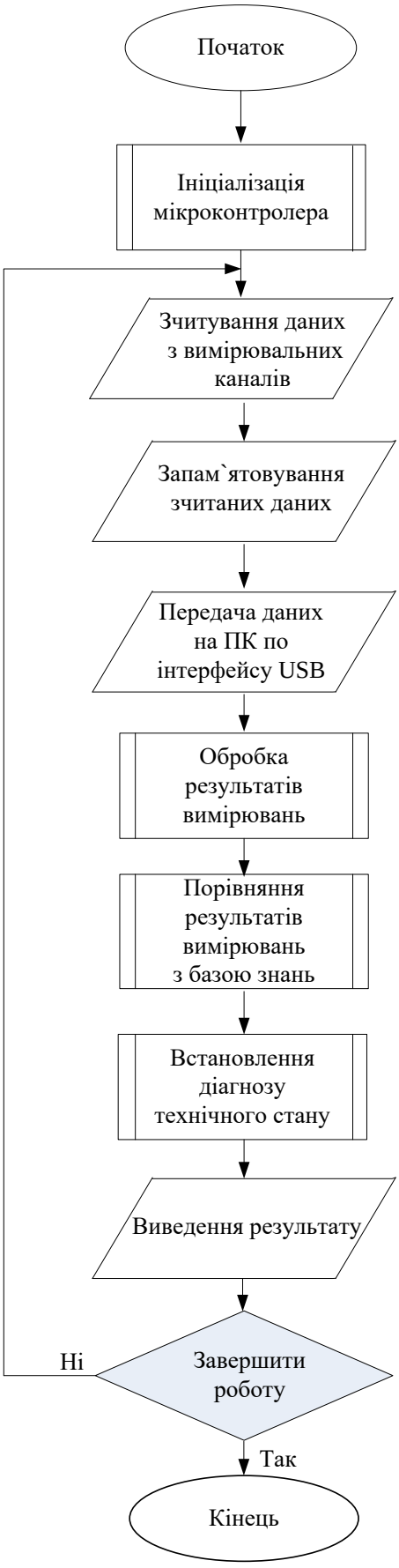


Рисунок 3.1 - Алгоритм роботи інформаційної системи вібродіагностики електричних машин

3.2. Програмне забезпечення

Напишемо програму на мові програмування С для мікроконтролера MSP430F5529 для зчитування інформації із акселерометра по АЦП та передачі інформації з нього на персональний комп'ютер по інтерфейсу USB (Додаток Б). Пояснимо роботу цієї програми.

1. Підключення бібліотек та визначення прототипів функцій:

```
#include <msp430.h>
#include <stdint.h>
```

Ці рядки підключають необхідні бібліотеки для роботи з мікроконтролером MSP430 та стандартні типи даних, такі як uint16_t (16-бітне беззнакове ціле число).

2. Функція ADC_Init():

```
void ADC_Init()
 {
   ADC12CTL0 = ADC12SHT0 | ADC12ON; // Встановлюємо параметри ADC
   ADC12CTL1 = ADC12SHP; // Використовуємо внутрішній сигнал тактування
   ADC12CTL2 |= ADC12RES_12BIT; // 12-бітний режим роздільної здатності
  ADC12MCTL0 |= ADC12INCH_0; // Вибираємо канал A0
  ADC12IER0 |= ADC12IE0; // Увімкнути переривання для каналу A0
 }
```

У цій функції виконується налаштування аналого-цифрового перетворювача (ADC). За допомогою регістрів ADC12CTL0 і ADC12CTL1 встановлюються параметри ADC, такі як час зарядки (ADC12SHT0), увімкнення ADC (ADC12ON) та використання внутрішнього сигналу тактування (ADC12SHP). Регістр ADC12CTL2 встановлює роздільну здатність ADC в 12 біт (ADC12RES_12BIT). Регістр ADC12MCTL0 вибирає канал введення ADC (ADC12INCH_0), в цьому прикладі це канал A0. Нарешті, ввімкнення переривання для каналу A0 (ADC12IE0) дозволяє генерувати переривання при завершенні зчитування з ADC.

3. Функція USB_Init():

```
// Функція ініціалізації USB
void USB_Init()
{
   WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD;   // Вимкнути Watchdog Timer

   P5SEL |= BIT4 | BIT5;   // Налаштування P5.4 та P5.5 для USB-передачі даних
```

```
  USBKEYPID = 0x9628;    // Розблокувати доступ до реєстру USB

  // Налаштування USB-периферії
  USBCNF |= PUR_EN;      // Увімкнути опір зарядки USB
  USBPWRCTL |= VUSBEN;   // Увімкнути напругу VBUS
  USBCNF |= USB_EN;      // Увімкнути USB-периферію

  USBIFG = 0;            // Скидання прапорців переривань USB
  USBIE |= SETUPIE;      // Увімкнути переривання SETUP

  __enable_interrupt();  // Увімкнути переривання}
}
```

У цьому коді спочатку вимикається Watchdog Timer (WDT) за допомогою регістру WDTCTL, щоб уникнути його спрацювання під час налаштування USB. Потім виконується налаштування портів введення/виведення P5.4 та P5.5 за допомогою регістру P5SEL, щоб визначити їх як виводи для передачі даних через USB.

Далі, за допомогою регістру USBKEYPID, доступ до реєстру USBKEY є розблокованим, щоб забезпечити належну конфігурацію USB-периферії. Для включення USB, регістр USBCNF встановлюється таким чином, щоб увімкнути опір зарядки USB (PUR_EN), увімкнути напругу VBUS (VUSBEN) та увімкнути саму USB-периферію (USB_EN).

На останок, скидаються прапорці переривань USB (USBIFG), увімкнуте переривання SETUP (SETUPIE) за допомогою регістру USBIE та ввімкнення загальних переривань за допомогою функції __enable_interrupt().

4. Функція USB_SendData():

```
// Функція передачі даних через USB
void USB_SendData(uint16_t data)
{
uint8_t buffer[2];

  buffer[0] = data & 0xFF;         // Нижній байт даних
  buffer[1] = (data >> 8) & 0xFF;  // Верхній байт даних
  while (!(USBIFG & TXIFG));   // Очікування готовності передачі
  USBTXBUF = buffer[0];        // Відправлення нижнього байта даних
  while (!(USBIFG & TXIFG));   // Очікування готовності передачі
  USBTXBUF = buffer[1];        // Відправлення верхнього байта даних
}
```

У цьому коді спочатку вимикається Watchdog Timer (WDT) за допомогою регістру WDTCTL, щоб уникнути його спрацювання під час передачі даних через USB. Потім викликається функція USB_Init() для ініціалізації USB-периферії.

Функція USB_SendData() приймає 16-бітне значення data, розбиває його на два 8-бітних байта та передає їх через USB-порт.

5. Функція main():

```
int main(void)
{
  WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD;  // Вимикаємо Watchdog Timer

  ADC_Init();   // Ініціалізуємо ADC
  USB_Init();   // Ініціалізуємо USB

  __enable_interrupt();  // Увімкнути переривання

  while (1)
  {
    ADC12CTL0 |= ADC12ENC | ADC12SC;   // Увімкнути ADC та розпочати зчитування

    __bis_SR_register(LPM0_bits | GIE); // Перевести мікроконтролер в режим очікування
                                        // та дозволити переривання
    __no_operation();               // Незначний NOP-оператор

    // Зчитування результату з ADC
    uint16_t result = ADC12MEM0;

    // Передача даних через USB
    USB_SendData(result);
  }
}
```

У функції main() спочатку вимикається Watchdog Timer (якщо він активний) і ініціалізуються АЦП та USB. Після цього увімкнені переривання, і мікроконтролер переходить у режим очікування (LPM0_bits), дозволяючи перериванням активуватися при завершенні зчитування з АЦП. Зчитане значення зберігається в змінну result, і потім передається через USB за допомогою функції USB_SendData().

6. Функція переривання ADC12_ISR():

```
#pragma vector = ADC12_VECTOR
__interrupt void ADC12_ISR(void)
{
```

```
  __bic_SR_register_on_exit(LPM0_bits);   // Вихід з режиму очікування
}
```

Ця функція викликається як обробник переривання при завершенні зчитування з АЦП. Виклик функції __bic_SR_register_on_exit() виходить з режиму очікування (LPM0_bits), дозволяючи основному циклу програми продовжити виконання.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі бакалавра була розроблена інформаційна система вібродіагностики електричних машин, яка характеризується високою швидкодією, простотою обробки інформації, яка знижує ймовірність помилок, а також простотою конструкції, що відповідно підвищує його надійність.

Розглянуті основні поняття, методи, види та засоби вібродіагностики, описано математичну модель вібрацій.

Описано вибір структурної схеми і описано принцип дії системи вібродіагностики електричних машин.

Розроблений алгоритм системи та її програмне забезпечення на мові програмування С.

Особливістю розробленої системи є використання USB інтерфейсу передачі даних, що дає змогу системі бути як портативною, так і стаціонарною, адже до портативного комп`ютера - ноутбука систему можна підключити лише за допомогою USB.

Особливістю розробленої інформаційної системи для вібродіагностики електричних машин є простота реалізації, мобільність, за рахунок використання USB інтерфейсу, тобто система може бути як стаціонарною, так і портативною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Барков О.В. Діагностування і прогнозування стану підшипників кочення по сигналу вібрації // Суднобудування, 3, 1985, с. 21-23.

2. Войтюк В.Д. Теоретичне обґрунтування об’єктів і засобів діагностування при їх сертифікації - К.: Центр навчальної літератури, 2022.- 264 с.

3. Пріб К.А., Патика Н.І. Діагностика в системі управління. – К.: ЦУЛ, 2019 – 432 с.

4. Володарський Є.Т., Поджаренко В.О., Кухарчук В.В., Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. – Вінниця: ВДТУ, 2001. -219с.

5. Шубов І.Г. Шум і вібрація електричних машин. – К.: Наука, 1986. - 456с.

6. Кухарчук В.В, Кучерук В.Ю., Долгополов В.П., Грумінська Л.В. Метрологія та вимірювальна техніка. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252с.

7. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник- Львів: «Бескид Біт», 2003.- 544с.

8. http://www.vibrotek.com/russian/articles/dost/index.htm

9. http://www.vibrotek.com/russian/articles/nov_pok/new_pok.htm

10. http://www.vibrotek.com/russian/articles/bumprom1-rus/index.htm

11. http://www.ti.com