

ЛЕКЦІЯ 1-2

ДЛЯ ЧОГО ПОТРІБНІ ВІБРОІЗОЛЯЦІЯ І УРІВНОВАЖЕННЯ МАШИН

Матеріальний світ, який оточує людину, в значною мірою створений руками самої людини. У міру розвитку цивілізації рукотворна частина постійно збільшуватиметься, у тому числі і за рахунок появи різноманітних за конструкцією і призначенням машин і механізмів. Це супроводжується підвищенням робочих параметрів, навантажень, швидкостей, температур, тиску, зменшенням габаритів і маси, підвищенням вимог до точності функціонування і ефективності роботи (продуктивності, потужності, ККД). Те, що відбувається, є природним результатом науково - технічного прогресу, що допомагає людині в подальшому освоєнні і вивченні її навколишнього середовища, поліпшує і робить комфортнішим її життя.

Але при цьому є і "зворотний бік медалі" - експлуатація машин вимагає від людства все зростаючих витрат, значна частина яких припадає на ремонти, ліквідацію наслідків непередбачених зупинок, аварій і катастроф. Витрати навіть на планові ремонти і технічне обслуговування у декілька разів перевищують вартість нової машини, наприклад, для автомобілів - до 6 разів, для літаків - до 5 разів, для верстатів - до 8 разів і так далі [1].

Істотне недовикористання потенційних можливостей спостерігається у машин, до яких ставляться високі вимоги безвідмовності. Вони, як правило, знімаються з експлуатації набагато раніше терміну служби, що фактично мають у своєму розпорядженні. З особливо великими витратами пов'язан вихід з ладу унікальних машин (атомних і хімічних реакторів, могутніх турбін і насосів і тому подібне). Пов'язану з цим можливу загрозу життю і здоров'ю людей або навіть їх загибель не можна оцінити ніякими економічними показниками.

Вирішення даної проблеми полягає у підвищенні надійності машини, що характеризує здатність машини зберігати її якість протягом усього періоду експлуатації, і в постійному вдосконаленні методів і засобів контролю за якістю машини, що експлуатується, і прогнозуванням її подальшої зміни.

Вирішенням усіх питань, пов'язаних з контролем за якістю машини, яка експлуатується, або, кажучи іншими словами, контролем за її технічним станом, займається технічна діагностика. На відміну від теорії надійності, яка займається вивченням фізики відмов і використовує в розрахунках імовірнісні і середньостатистичні характеристики машини, діагностика ставить собі за мету визначити дійсний стан машини.

Широке застосування у промисловості методів та засобів технічної діагностики забезпечує перехід на якісно новий рівень експлуатації машини, що залежить від її фактичного технічного стану, а не від жорсткого графіка планово-запобіжних ремонтів (ПЗР). Графік ПЗР, що складається на основі середньостатистичних даних про величину міжремонтного періоду, не гарантує безаварійну роботу машини в міжремонтний період.

Використання діагностики дозволяє збільшити міжремонтний період, значно скоротити експлуатаційні витрати, зокрема, за рахунок зниження потреби в запасних частинах і зниження трудомісткості ремонтних робіт.

Вдалі технічні рішення зі створення систем діагностики дозволяють уникати вимушеного простою обладнання, збільшувати міжремонтний пробіг, наприклад,

відцентрових машин з 8-12 тис. годин до 24-40 тис. годин, знижувати на 30% вартість їх ремонту і запобігати аваріям[2]. Витрати на впровадження систем діагностики насосного устаткування АЕС окупаються за 13 місяців[3].

Економічна ефективність від впровадження діагностики визначається таким: зниженням вірогідності аварій, ліквідацією зайвих ремонтів, що порушують припрацювання вузлів машини, і збільшують за рахунок цього знос машини, зменшення кількості і тривалості простоїв, зниження вартості техобслуговування і ремонту.

Досвід використання діагностики, наприклад, турбоагрегату гідроелектростанції, показав, що вона виявилася рентабельною навіть у тому випадку, коли за весь час експлуатації машини (близько 40 років) дозволила уникнути лише однієї аварії, пов'язаної з пошкодженням підшипникового вузла [1].

Згідно за статистикою [1] середня вірогідність виникнення під час експлуатації пошкодження, наприклад, парової турбіни, дуже висока.

Відносна частота її пошкодження за 10 років становить :

- для підшипників 21%;
- для ротора 15%;
- для ущільнення валу 13%;
- для ущільнювальних пристроїв 5%.

За допомогою пристроїв діагностики вдається без попереднього розбирання виявити 36% пошкоджень роторів і 35% пошкоджень підшипників.

Таким чином, розроблення систем діагностики і впровадження їх у промисловість - дуже актуальне і нагальне завдання.

Серед численних методів технічної діагностики особливе місце належить методам віброакустичної діагностики, орієнтованим на використання діагностичної інформації, що міститься в коливальних процесах, що супроводжують роботу машини.

Використання параметрів вібрації машини для оцінки її технічного стану ґрунтується на тому фундаментальному правилі, що призначення машини полягає у перетворенні з мінімальними втратами, у тому числі і на звуковиникненне, одного виду енергії в інший або одного виду руху в інший. Тому збільшення паразитних вібрацій розглядається як ознака відхилення технічного стану машини від норми і, отже, є підставою для пошуку причин зміни віброактивності.

Вібродіагностика є одночасно і стародавньою, і новою галуззю інженерних знань, що переживає в даний час у зв'язку з появою обчислювальної і мікропроцесорної техніки період бурхливого розвитку. Це дозволяє істотно ускладнювати завдання, що вирішується з її допомогою.

Проблемі вібродіагностики присвячено безліч публікацій (монографій, статей, матеріалів конференцій, дисертацій), викладення матеріалу в яких має розрізнений не систематизований характер, що не дозволяє використовувати будь - яку з них як підручник. Даний курс лекцій спрямований заповнити цей пропуск.

Лекції складаються з двох розділів, в першому з яких сформульовані завдання діагностики і можливості щодо їх рішення, які є у вібродіагностиці. У другому розділі розглядається методологія побудови систем вібродіагностики відцентрових насосів - характерних представників поширеного класу роторних машин.

Діагностика (грец. Diagnostikos) - означає здатний розпізнавати.

Технічна діагностика - галузь науково - технічних знань, яка є розділом науки про вимірювання і займається розробленням теорії, методів і засобів виявлення дефектів об'єктів технічної природи.

Виявлення і пошук дефектів є процесом визначення технічного стану машини і об'єднується загальним терміном "*діагностування*".

Завданнями технічного діагностування є перевірка справності, працездатності і правильності функціонування машини, а також пошук і прогнозування розвитку дефектів, що перешкоджають або знижують ефективність виконання машиною її функцій.

Діагностика необхідна на всіх етапах життєвого циклу машини: при проектуванні і доведенні дослідного зразка, при виробництві серійної продукції, у періоди експлуатації і ремонту. Методи і засоби діагностування, що застосовуються на кожному з етапів, можуть відрізнятися один від одного і деколи істото. Це пояснюється відмінністю виду дефектів, їх природою і необхідною глибиною діагностування.

Найбільший економічний ефект від використання методів діагностики досягається на етапі експлуатації за рахунок усунення непотрібних ремонтів, що виконуються згідно у графіками ПЗР, і пов'язаних з цим необґрунтованих простоїв, виключення раптових аварійних зупинок обладнання, скорочення у зв'язку з цим термінів, вартості і обсягу ремонтів, економії запчастин і паливомастильних матеріалів, підвищення якості функціонування машини і усього пов'язаного з нею виробництва за рахунок відсутності порушення ритмічності його роботи. Необґрунтовані ремонти порушують приприпацювання вузлів і деталей і тим самим прискорюють їх знос, вносять нові непередбачені дефекти у вигляді перекосів осей, підвищених або занижених зазорів, забруднень та інших технологічних дефектів, що скорочують термін служби машини і вимагають нових ремонтних робіт, утворюючи таким чином замкнене коло.

Розірвати це коло, саме і покликана діагностика. Розробленне ефективних методів діагностики є важким завданням, оскільки при вивченні поведінки машини у період її експлуатації доводиться стикатися з достатньо складними і різноманітними за своєю фізичною природою процесами, що є результатом взаємодії елементів машини як між собою, так і з навколишнім її середовищем.

При цьому розрізняють три основні джерела дій [1]:

- дія енергії навколишнього середовища, включаючи і людину –оператора або ремонтника;
- внутрішні джерела енергії, пов'язані як з робочими процесами, що проходять у машині, так і з роботою окремих елементів машини;
- потенціальна енергія, накопичена в матеріалі і деталях машини у процесі її виготовлення (внутрішня напруга у відлмвки, монтажна напруга і так далі).

При роботі машини виникають і взаємодіють складним чином такі види енергії, що впливають на її працездатність [1]: механічна, теплова, хімічна, ядерна, електромагнітна і тому подібне.

Різні види енергії,що діють на машину, викликають в її вузлах і деталях процеси, що мають складну фізико-хімічну природу і що приводять до деформації, зносу,

зламу, корозії та інших видів пошкоджень. Це, у свою чергу, веде до зміни вихідних параметрів машини і, як наслідок, до відмови, тобто до неможливості виконання машиною заданих нею функцій.

Параметри за своєю фізичною природою поділяють, наприклад, на такі групи:

- кінематичні (час, швидкість, прискорення, період, частота періодичного процесу, градієнт швидкості і тому подібне);

- статичні і динамічні (маса, сила, імпульс сили, енергія, потужність, коефіцієнт опору, коефіцієнт пружності, демпфування, добротність і тому подібне);

- теплові (температура, кількість теплоти, температурний градієнт, тепловий потік і тому подібне);

- акустичні (звуковий тиск, об'ємна швидкість, звукова енергія, інтенсивність звуку і тому подібне);

і так далі налічується до 200 фізичних величин.

Вимірювання фізичних параметрів покладене в основу різних методів і способів технічного діагностування. При цьому найчастіше використовують такі види вимірювань: електрометрія, віброакустика, дефектоскопія, інтроскопія, вимірювання механічних властивостей, складу речовини, розміру, сил, деформацій, тиску, температури, часу, маси, вологості, витрати і рівня. Для цього використовують широку номенклатуру випробувальної техніки, приладів і апаратури.

Основне місце в технічній діагностиці займають методи і способи безрозбірної діагностики. При цьому можна вказати безліч фізичних параметрів, що характеризують технічний стан машини, що, у свою чергу, вимагає різноманітного набору методів і способів діагностування. Дана обставина вимагала пошуку уніфікованих параметрів і відповідних їм методів і способів діагностування.

Як показав досвід, даним вимогам здебільшого відповідає віброакустична діагностика.

Завдання віброакустичної діагностики

Віброакустична діагностика (вібродіагностика) визначає технічний стан машини за наслідками аналізу її паразитних вібрацій.

Термін „вібродіагностика” слід розуміти не буквально, а як найменування наукового напрямку технічної діагностики, для якого джерелом інформації про стан машини є загальне поняття, - вібропараметр, що включає інформацію про всі коливальні і періодичні процеси, що виникають при функціонуванні машини. Ця інформація може містити дані про відносні і абсолютні рухи вузлів і деталей, про пульсацію швидкостей і тиску в робочих середовищах, про поля силових дій і акустичну емісію у вузлах тертя і т.п. У зв'язку з цим частотний діапазон віброакустичних параметрів тягнеться від часток 1Гц до сотень кілоГерц.

Практично всі види дефектів змінюють характеристики вібропараметрів, що робить їх незамінними при використанні в цілях діагностування.

Широкий частотний і динамічний діапазони, мала інерційність, велика швидкість поширення обумовлюють швидко реакцію віброакустичного сигналу на зміну стану машини. Важлива також достатня простота перетворення віброакустичного сигналу в електричний і можливість подальшої його обробки за допомогою сучасної мікропроцесорної техніки. Істотну допомогу при цьому надають експертні системи - одне з відгалужень систем штучного інтелекту. Розглянемо методологію побудови систем вібродіагностики.

Вібродіагностика є міждисциплінарною галуззю знань, наукові основи якої розробляються на базі загальної теорії технічної діагностики, яка є частиною більш загальної теорії вимірювань, теорії інформації, теорії сигналів, математичної статистики, розпізнавання образів, теорії коливань, електроніки, обчислювальної техніки та ін.

Розглянемо загальні принципи побудови діагностичних систем.

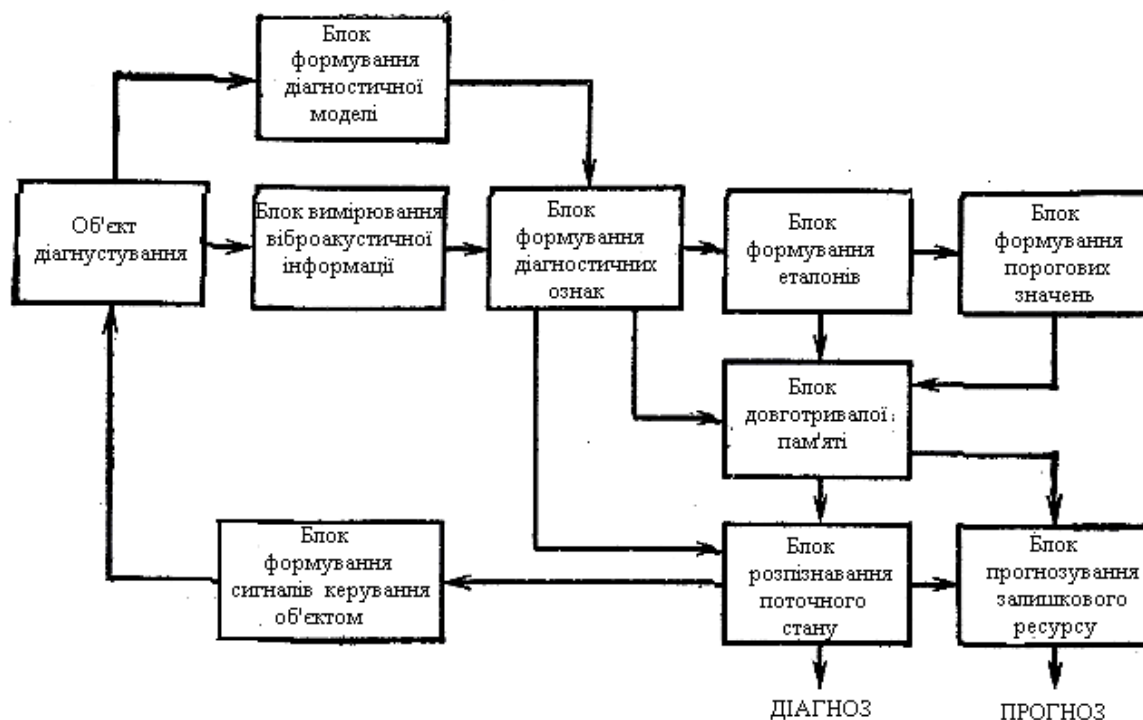
Структурна схема системи діагностування

Здійснення процесу діагностування у загальному випадку припускає обов'язкову наявність:

- об'єкта діагностування;
- технічних засобів діагностування;
- людини-оператора.

При цьому для забезпечення оператора відповідною діагностичною інформацією необхідна певна організація взаємодії об'єкта і засобів діагностування, що у результаті утворює систему діагностування.

Структурну схему системи діагностування стосовно вібродіагностики можна подати у вигляді, зображеному на рис. 1.



Рисунком 1 - Структурна схема діагностування.

Згідно з даною схемою така система включає наступні взаємодіючі між собою складові частини, що реалізують певні операції у процесі діагностування:

- об'єкт діагностування, що змінює свій технічний стан;
- підсистему формування діагностичної моделі, що забезпечує взаємозв'язок між технічним станом і вібрацією;

- підсистему вимірювання, що поставляє початкову для аналізу інформацію, що міститься у вібраційному сигналі;
- підсистему формування діагностичних ознак, що перетворює отриману при вимірюваннях інформацію у форму, зручну для розпізнавання поточного технічного стану;
- підсистему формування еталонів, що встановлює відповідність між фіксованим технічним станом і набором діагностичних ознак;
- підсистему вирішальних правил, що містить правила, згідно з яким здійснюється розпізнавання технічного стану;
- підсистему розпізнавання поточного стану, в якій на підставі вирішальних правил ставиться діагноз технічного стану;
- підсистему прогнозування, де на основі аналізу трендових характеристик параметрів технічного стану визначається залишковий ресурс.

Розглянемо докладніше кожен із названих вище підсистем.

Машина як об'єкт діагностування

Чинники, що впливають на віброакустичні параметри машини в процесі її функціонування

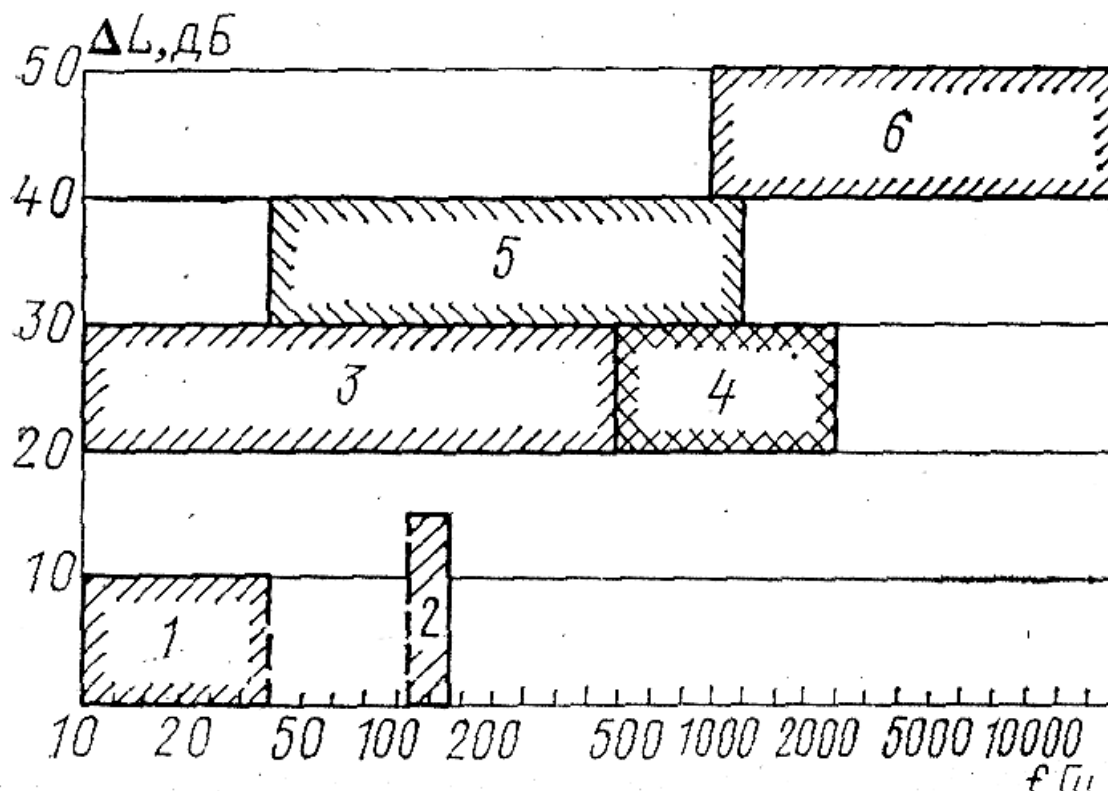
Машина є комплексом взаємозв'язаних елементів, що взаємодіють не тільки між собою, але і з навколишнім середовищем. Відмова одного з елементів спричиняє за собою порушення працездатності всієї машини. Наявність складних функціональних і акустичних зв'язків між елементами машини, велика кількість структурних і регулювальних параметрів, високий рівень віброактивності, що закладаються ще на етапі проектування, посилювані при виготовленні і в процесі експлуатації, істотно затрудняють розроблення і формалізацію процедури діагностики.

Відносно переміщення великої кількості взаємодіючих елементів породжує в машині динамічні процеси, збуджує пружні коливання як машини в цілому, так і окремих її вузлів і деталей.

Конкретною причиною динамічних процесів є, наприклад, неврівноважені деталі, що обертаються і коливаються, циклічна зміна жорсткості при обертанні або іншому стаціонарному робочому русі, геометрична недосконалість контактуючих деталей, що сполучаються, і так далі.

При збудженні коливань одночасно всіма кінематичними парами машини утворюється єдине хвильове поле, і завдання діагностики полягає в поділі сумарного процесу на складові так, щоб можна було оцінити внесок в технічний стан кожної кінематичної пари (вузла механізму).

На рис. 2. наведені діапазони частот, в яких найчастіше згідно зі статистикою наголошується зміна рівня вібрації роторних машин при виникненні їх типових дефектів. По осі абсцис на рисунку відкладена в децибелах середньостатистична величина зміни рівня вібрації, що реєструється при появі і подальшому розвитку дефекту.



Рисункок 2 - Діапазони частот і найбільш вірогідний ступінь зміни рівня вібрацій при рядові типових дефектів машин:

- 1 - дисбаланс ротора; 2 - неспіввісність валів;
- 3 - хвилястість доріжок підшипника; 4 - руйнування підшипників;
- 5 - порушення мастила підшипників, кавітація

Для встановлення відповідності законів розвитку несправностей і їх прояву у вібраціях машини з метою їх успішної діагностики необхідне розуміння фізичної суті зв'язку між робочими процесами, що проходять у машині, і деградацією її технічного стану.

Розв'язання подібної задачі здійснюється за рахунок побудови діагностичної моделі машини.

Діагностична модель машини.

Модель, моделювання є фундаментальними поняттями, якими оперує дослідник у процесі вивчення дійсності, що його оточує.

У найбільш загальному вигляді під моделлю розуміється спрощений тією чи іншою мірою розгляд явища, що нас цікавить, спрямований на виявлення його ґрунтовних закономірностей.

Моделюванням відповідно називається процедура розроблення моделі явища і подальшого вивчення з її допомогою особливостей цього явища.

Залежно від виду використовуваної моделі моделювання ділиться на математичне, фізичне і змішане.

Моделювання в діагностиці дозволяє:

•сформуванати умови працездатности, тобто умови поділу безлічі станів M , в яких перебуває машина протягом свого життєвого циклу, принаймі, на дві підмножини: працездатне $M1$ і непрацездатне $M2$;

•отримати критерії для оцінки ступеня працездатности машини (тобто розрізняти зони $M1i$ в підмножині $M1$);

•встановити ознаки несправностей (тобто розрізняти зони $M2j$ в підмножині $M2$);

•встановити відповідність між параметрами, що визначають працездатність M (простором станів) і діагностичними ознаками D (простором діагностичних ознак).

Розглянемо докладніше, як вирішується це завдання при використанні вказаних вище моделей.

Математичне моделювання

При математичному моделюванні машину умовно розглядають як якийсь перетворювач A параметрів її технічного стану x_i (величини зазорів, натягу, перекіс осей і тому подібне) в параметри вібрації y_i (рівень і спектральний склад виброзсуву, віброшвидкості, віброприскорення і тому подібне), що виникає при її функціонуванні:

$$\{Y\} = A\{X\}, \quad (1)$$

де $\{Y\}=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ – вектор діагностичних ознак розмірністю n складений з параметрів вібрації y_i , які використовуються при діагностуванні і названі тому діагностичними ознаками;

$\{X\}=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ – вектор структурних параметрів, розмірність якого m визначається кількістю параметрів технічного стану x_i , які виявляються у процесі діагностування.

Розмірності n і m у загальному випадку не рівні між собою, причому діагностування можливе лише при виконанні умови $n > m$.

вібродіагностики полягає в побудові залежності, зворотної формулі (1)

$$\{X\} = G^{-1}\{Y\}. \quad (2)$$

У простому випадку залежність (2) може бути функціональною:

$$x_i = F_i(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

конкретний вид якої встановлюється в період навчання, передуючий етапу встановлення діагнозу. Цю функцію або систему функцій можна розглядати як відображення простору технічних станів, заданого координатами x_1, x_2, \dots, x_m , в простір діагностичних ознак з координатами y_1, y_2, \dots, y_n . При цьому виникає і становить особливий інтерес питання однозначності цього відображення.

Якщо кожному з параметрів стану x_i вдається поставити у відповідність тільки одну характерну діагностичну ознаку y_i , то система (3) розпадається на m незалежних співвідношень вигляду

$$x_i = F_i(y_i), \quad (4)$$

причому $n=m$. Діагностичні ознаки в цьому випадку вибираються з фізичних міркувань на основі математичного моделювання динаміки машини.

При побудові моделі розглядаються істотні властивості машини, виключно важливі для встановлення діагнозу. Заміна реальних пристроїв їх моделями, що ідеалізуються, дозволяють відмовитися від їх фізичної природи і за допомогою різних математичних методів формалізувати вирішення діагностичних.

Діагностичні моделі розглядають, як правило, як моделі, представлені у вигляді системи алгебраїчних рівнянь і диференціальних рівнянь, феноменологічних моделей, логічних співвідношень, функціональних, структурних, регресійних та інших типів моделей.

Вибір того або іншого типу моделі залежить від цілого ряду чинників (умови експлуатації машини, конструктивного виконання, частотний діапазон вібрацій, що генеруються нею, і тому подібне). Розрахункова модель (схема) складається з урахуванням найбільш істотних властивостей машини, що визначають її динамічну поведінку.

Розглянемо, наприклад, роторну машину масою M (рис. 1), ротор якої обертається з кутовою швидкістю ω . Машина встановлена на податливій підставі, жорсткість якої дорівнює c . При деформації підстави в ньому виникають сили опору, пропорційні швидкості деформації \dot{x} ; коефіцієнт пропорційності позначений через b . Машина може переміщатися тільки у напрямі осі X , маючи одну міру свободи. Узагальнена координата x відлічується від положення статичної рівноваги. Передбачається, що центр інерції ротора зміщений щодо осі обертання на величину e (ексцентриситет). Маса ротора m_p .

Тоді, склавши рівняння Лагранжа, отримаємо

$$M\ddot{x} + m_p e \omega^2 \sin \omega t = -cx - b\dot{x} \quad (5)$$

або

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = -\frac{m_p e}{M} \omega^2 \sin \omega t, \quad (6)$$

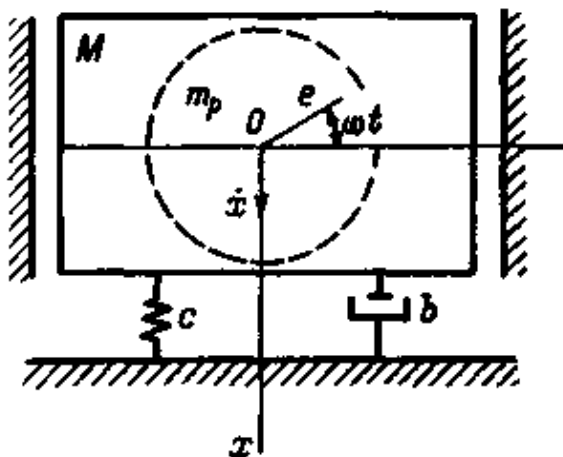
де $\omega_0 = \left(\frac{c}{M}\right)^{0.5}$ – власна частота системи, а $2n = \frac{b}{M}$.

Сила $G(t) = -m_p e \omega^2 \sin \omega t$, що в цьому випадку вимушує коливання, $G(t) = -m_p e \omega^2 \sin \omega t$ є проекцією відцентрової сили ротора на вісь X .

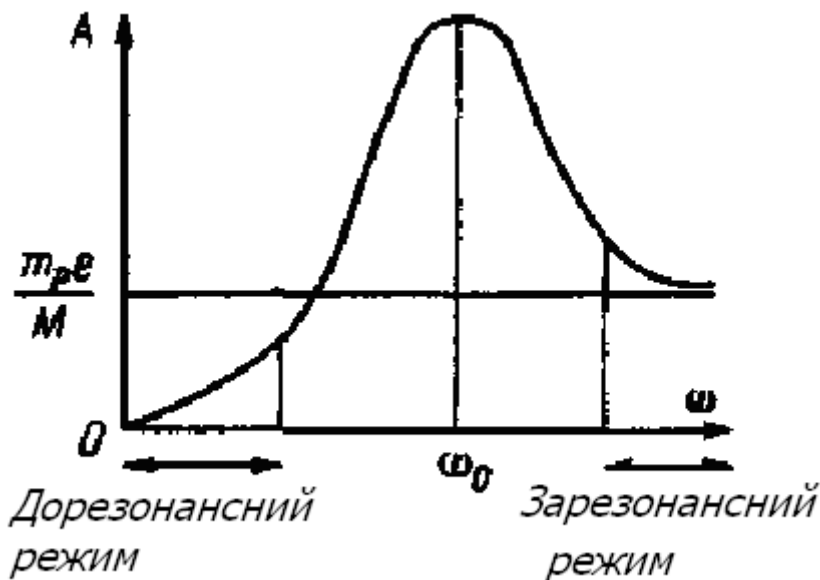
Амплітуда коливань машини відповідно до розв'язання рівняння (6) дорівнює

$$A = \frac{m_p e \omega^2}{M} \times \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4n^2 \omega^2}}. \quad (7)$$

Графік залежності побудований на рис. 4 Як правило, потрібно зробити амплітуду коливань машини як можна меншою. З графіка видно, що для цього досить забезпечити виконання умови, тобто домогтися того, щоб власна частота системи була значно більшою за кутову швидкість ротора. Якщо ця умова виконується, то говорять, що машина працює в дорезонансному режимі. Якщо дорезонансний режим неможливий, необхідно, щоб машина працювала в зарезонансному режимі, при якому $\omega \gg \omega_0$.



Рисункок 3 - Модель неврівноваженої роторної машини



Рисункок 4 - Амплітуда коливань віброізолюваної машини при зміні частоти

Зменшити значення A можна зменшенням маси ротора m_p , зменшенням ексцентриситету e , тобто підвищенням точності балансування, збільшенням маси всієї машини. Зменшення маси ротора і підвищення точності балансування, природно, можливі на практиці лише в обмежених межах. Найбільш простий спосіб зменшення амплітуди — збільшення маси M , для цього, як правило, машину

сполучають з масивним фундаментом. При розгоні ротора машина, що працює в зарезонансному режимі, неминуче проходить через область резонансу, в якій $\omega \approx \omega_0$. Щоб при цьому в системі не розвивалися резонансні коливання, прагнуть прискорити проходження через резонанс, збільшуючи для цього потужність двигуна.

Вплив шуканого дефекту на параметри машини як динамічної системи дуже багатогранний. У одних випадках дефект змінює характер збурення G , в інших - робить вплив на матриці жорсткості, демпфірування і інерції. Тому в конструкції реальної машини параметри елементів системи можуть відрізнятися від розрахункових значень і змінюватися у процесі експлуатації і із зміною технічного стану. Тому у вібродіагностиці існує необхідність аналізу впливу зміни технічного стану на зміну параметрів системи аналітичним шляхом, тобто на основі відомої математичної моделі.

Для вирішення даного завдання використовують **методи теорії чутливості**. Рівняння стану системи має вигляд

$$F(\ddot{x}, \dot{x}, x, q, t), \quad (8)$$

де \ddot{x}, \dot{x}, x – вектори прискорення, швидкості і переміщення системи розмірності n ;

q – вектор структурних параметрів системи розмірності r .

У результаті ряду перетворень визначають функції

$$U_{i,j} = \frac{\partial x(t)_i}{\partial q_j}, \quad (9)$$

які характеризують вплив структурного параметра вектора q на координату (діагностична ознака) вектора системи. Ці функції мають назву функцій чутливості (або впливу), вираз

$$\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}} \ddot{U} + \frac{\partial F}{\partial \dot{x}} \dot{U} + \frac{\partial F}{\partial x} U = - \frac{\partial F}{\partial q} \quad (10)$$

є рівнянням чутливості, а система таких рівнянь – моделлю чутливості.

Розв'язання отриманих рівнянь – *функції чутливості*. Рівняння чутливості лінійні навіть у разі нелінійності початкового рівняння стану. Для вібродіагностики найбільш очевидним є спосіб оцінки змін структурних параметрів конструкції на відхилення діагностичних ознак (компонент вектора фазових координат: амплітуд виброприскорення, виброшвидкості або вибропереміщення), оскільки будь-які зміни конструктивних пружно-інерційних параметрів неминуче позначаються на амплітудно-частотній характеристиці системи.

Ефективність залежить від показників точності вимірювання компонент вектора фазових координат і від абсолютного значення чутливості їх зміни до зміни конструктивних параметрів.

Якщо динамічний стан системи описується векторно-матричним диференціальним рівнянням, то будують векторно-матричне рівняння чутливості. Матриці чутливості дозволяють визначати чутливі і інваріантні до вектора стану параметри. Ця інформація встановлює, які параметри найбільшою мірою визначає вібраційну картину машини. Відзначимо, що матриця чутливості дозволяє значно *спростити модель конструкції, що діагностується, залишивши в моделі лише ті параметри, які найбільшою мірою визначають вібраційний стан системи.*

Інший спосіб полягає в оцінці зміни параметрів технічного стану конструкції за заданими функціями чутливості і відносно невеликим спектром власних частот. Для вирішення поставленої задачі необхідно визначити функції чутливості до зміни власних частот системи, тобто

$$U_{ij} = U_{a_j}^{\lambda_i} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, r \quad (11)$$

де U_{ij} – функція чутливості;
 λ_i – власна частота системи;
 a_j – параметр системи.

Далі проводиться оцінка параметричних змін, оскільки вектор власних частот є функцією параметрів системи. Тобто за невеликим (близько 10%) експериментально вимірним зсувом вектора власних частот конструкції можна оцінити зміну вектора параметрів математичної моделі, визначивши заздалегідь матрицю чутливості.

Для розроблення математичних моделей елементів машинних конструкцій, що характеризуються розподіленими і зосередженими параметрами, застосовуються алгоритми інтегральної і параметричної ідентифікації. У першому випадку модель подається у вигляді передавальної функції, а в другому – у вигляді диференціальних рівнянь у частинних похідних. Моделювання дефектних станів здійснюється на основі розрахунку динамічних характеристик за допомогою методу кінцевих елементів.

При цьому дефект інтерпретується зміною параметрів кінцевих елементів або розривом зв'язків між відповідними кінцевими елементами. Динаміку конструкцій можна досліджувати як в лінійній, так і в нелінійній постановці.

Розроблення досконаліших розрахункових моделей пов'язане із застосуванням методів теорії коливань. У цій теорії, окрім класичних про вільні та вимушені коливання лінійних систем з одним, двома і більше ступенями вільності, розглядаються коливання систем з розподіленими параметрами, методи визначення критичних параметрів таких систем, наближені методи визначення частот коливань різних пружних об'єктів і т.ін.

У ряді випадків, ґрунтуючись на тому, що технічний стан машини, а отже, і її вібрація залежать від багатьох чинників, пропонується будувати модель багатогранної залежності функції відгуку (характеристики параметра вібрації y_j) від параметрів технічного стану x_i . При цьому доводиться розв'язувати задачу множинного регресійного аналізу.

При навчанні системи діагностики інженер-діагност реєструє діагностичні ознаки і величини структурних параметрів, що характеризують технічний стан машини. У результаті навчання утворюється матриця результатів спостережень

$$\begin{pmatrix} y_1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1p} \\ y_2 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2p} \\ y_3 & x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3j} & \dots & x_{3p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_i & x_{i1} & x_{i2} & x_{i3} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{ip} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_n & x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (12)$$

де n – кількість дослідів;
 p – число чинників;
 x_{ij} – значення j -го чинника для i -го досліду;
 y_i – значення функції відгуку для i -го досліду.

Завдання множинного регресійного аналізу полягає в побудові такого рівняння площини в $(p+1)$ -вимірному просторі, відхилення результатів спостережень y_i від якої були б мінімальними. Або, іншими словами, необхідно обчислити значення коефіцієнтів b_0, b_j у лінійному поліномі

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_j x_j \quad (13)$$

що рівнозначно мінімізації виразу

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + b_3 x_{i3} + \dots + b_j x_{ij} + \dots + b_p x_{ip})]^2, \quad (14)$$

де \hat{y}_i – обчислювані, передбачувані, вирівнювані значення досліджуваної характеристики.

Для відшукування мінімуму виразу (2.13) необхідно знайти часні похідні за всіма невідомими $b_0, b_1, b_2, \dots, b_j, b_p$ і прирівняти їх до нуля. Отримані рівняння утворюють систему нормальних рівнянь. У результаті проведення всіх цих операцій отримуємо поліном першого ступеня (15) з відомими коефіцієнтами b_0, b_j . Цей поліном є апроксимацією функції

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_p) \quad (15)$$

якої невідом.

Вже при $n > 20$ і $p > 3$ розрахунки коефіцієнтів рівняння регресії дуже трудомікі, тому процедура регресійного аналізу орієнтована головним чином на застосування комп'ютерів.

Теоретично точність апроксимації можна підвищити, підвищуючи ступінь полінома, для поліномів високих ступенів при проведенні матричних операцій накопичуються значні похибки округлення, що стає неможливим підвищувати точність обчислень. На практиці, як правило, обмежуються побудовою полінома другого порядку і проведенням крокового регресійного аналізу з включенням або виключенням змінних.

Розроблення регресійної моделі може бути виправдане при діагностуванні унікальних одиничних виробів. У разі ж масового серійного виробництва, наприклад, в насособудуванні, даний підхід до побудови діагностичної моделі не можна визнати доцільним. Тут потрібний інший підхід, що базується на аналізі загальних закономірностей, що пов'язують структурні і діагностичні параметри.

У зв'язку з цим становить інтерес структурно-дослідна модель, що дозволяє виявляти, з одного боку, закономірні зв'язки між діагностичними і структурними параметрами незалежно від типу механізму і, з іншого боку, звертати увагу на ті або інші особливості, характерні для даного типу механізму.

Подібна модель, що подається у вигляді діагностичної таблиці несправностей.

Ці таблиці і схеми складаються на основі зіставлення тих або інших дефектів, що виявляються при ремонті машини, з параметрами вібрації, що передували її зупинці на ремонт.

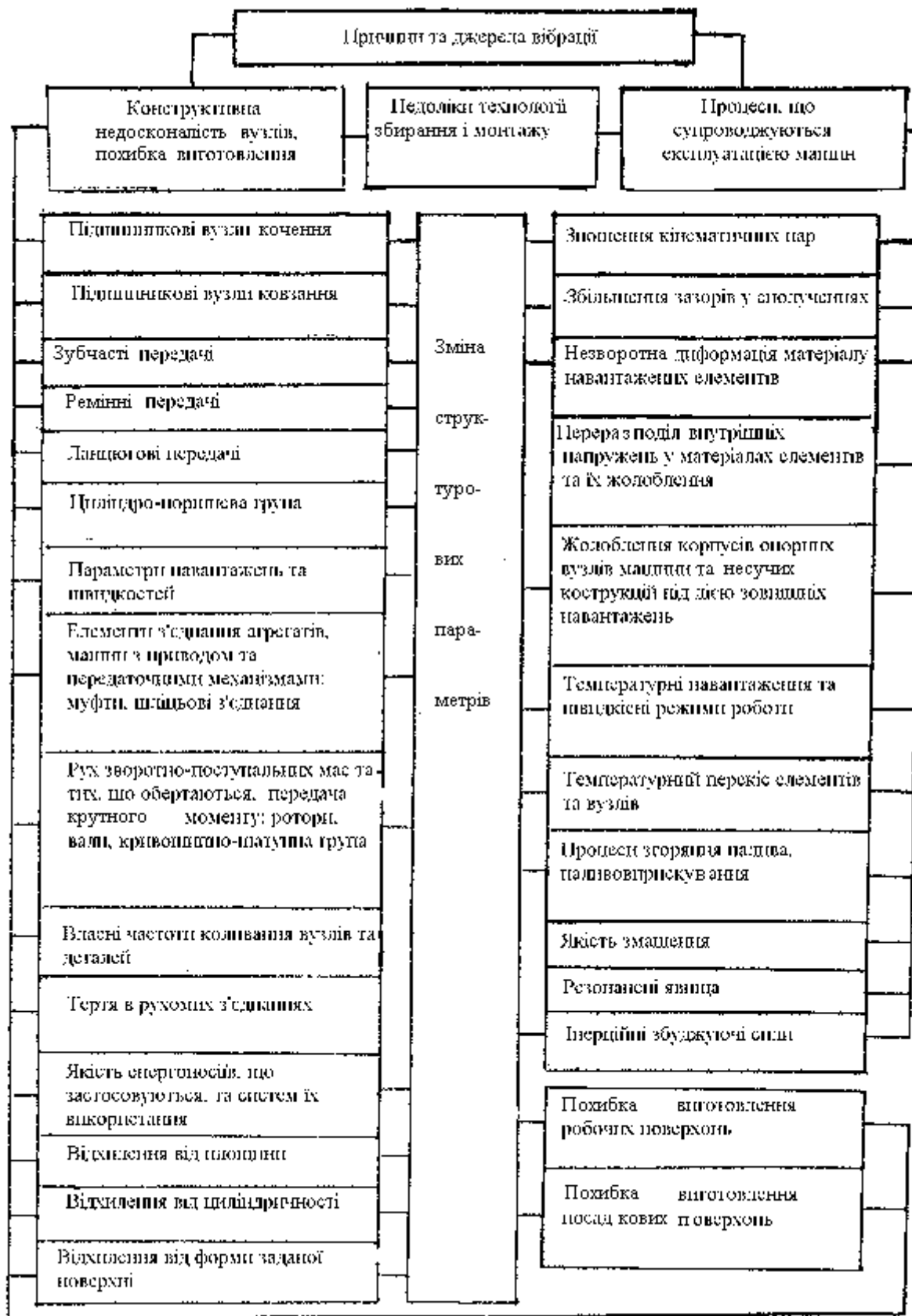


Рисунок 5 - Причини і джерела вібрації механічного походження.

Таблиця 1 - Діагностична таблиця несправностей підшипника кочення

Дефект	Основні частоти	Напрямок вимірювання коливань	Примітка
Неврівноваженість ротора	$f_{об}$	Радіальне	Найбільш ймовірна причина збільшення віброактивності машин
Відхилення від співвісного вала	Як правило, $f_{об}$, часто $2f_{об}$, іноді 3 і $4f_{об}$	Радіальне, осьове	Звичайний дефект
Зазор у підшипнику ковзання	Субгармоніки $f_{об}$, особливо $\frac{1}{2}$ та $\frac{2}{3} f_{об}$	Переважно радіальне	Дефект виникає тільки на робочій швидкості та робочій температурі
Руйнування масляної плівки у підшипнику ковзання (утворення піни та вихорів)	$(0,42-0,48)f_{об}$	Переважно радіальне	Має місце тільки у високошвидкісних (турбо) машинах
Механічний люфт	$2f_{об}$	Радіальне і осьове	А також суб- та комбінаційні гармоніки
Неврівноваженість у механізмах і машинах зворотно-поступального принципу дії	$f_{об}$ і/або $kf_{об}$, k – кількість незбалансованих деталей	Переважно радіальне	Збільшується із зростанням частоти обертання
Вібрація, що викликається електричними силами	$f_{об}$ або $f_{об}$ і $2f_{об}$, синхронізована частотою електродвигуна	Радіальне і осьове	Зникає при відключенні електродвигуна