

Реферат

Магістерська робота: 103 с., 25 рис., 22 табл., 148 джерел.

Мета роботи. Удосконалення методів діагностики дефектів та оцінювання загального технічного стану АД шляхом аналізу сигналу споживаної потужності.

Об'єкт дослідження. Процеси перетворення енергії в асинхронному двигуні.

Предмет дослідження. Діагностичні ознаки сигналу споживаної потужності для виявлення дефектів асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором.

Показники відмов електричних машин в усьому світі приблизно наступні із загального числа ушкоджених електродвигунів близько 80 % ремонтується, а 20 % замінюються резервними. Згідно з різними статистичними джерелами, найчастіше вихід з ладу АД трапляється через пошкодження обмоток статора та відмову підшипникового вузла. Серед інших типових відмов слід виділити пошкодження обмоток ротора, неспіввісність ротора і виконавчого механізму, дефекти кріплень АД до основи і виконавчого механізму до ротора АД.

Таким чином, постає задача діагностики АД з метою виявлення наявних пошкоджень та ступеня їх розвитку, що надає можливість виведення АД у ремонт за фактичним станом, та є шляхом оптимізації використання виробничого обладнання.

Серед поширених методів оцінювання поточного технічного стану і діагностики АД виділяють систему планово-попереджувальних ремонтів (ППР), що вимагає виведення устаткування з виробничого процесу і часткового розбирання обладнання; вібродіагностику, що потребує використання відносно дорогого обладнання; аналіз спектра струмів. Останні два підходи є більш перспективними, оскільки дозволяють виконувати діагностику безпосередньо у виробничому процесі. Проте більшість з розроблених методів застосовуються для машин або великої потужності, або спеціального призначення, і потребують використання дорогого діагностичного обладнання. При цьому залишається проблема діагностики та визначення поточного технічного стану АД малої та середньої потужності, коли неможливо або недоцільно встановлювати дороге обладнання.

Положення що виносяться на захист:

– теоретичне обґрунтування застосування аналізу сигналу споживаної потужності для задач діагностики асинхронних двигунів;

–математичне моделювання режимів роботи АД для виявлення діагностичних ознак найбільш розповсюджених дефектів;

– розробка методики діагностики дефектів АД, оцінювання ступеня їх розвитку та працездатності двигуна у поточних експлуатаційних режимах

ЗМІСТ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ | 7 |
| ВСТУП | 8 |
| Розділ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ І МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ | 11 |
| 1.1 Аналіз статистики пошкодження асинхронних двигунів | 11 |
| 1.2 Аналіз найбільш типових пошкоджень асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором | 13 |
| 1.3 Аналіз методів діагностики та контролю технічного стану асинхронних двигунів | 20 |
| 1.4 Огляд сучасних математичних методів обробки діагностичної інформації | 27 |
| Розділ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗА АНАЛІЗОМ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ | 29 |
| 2.1 Теоретичні основи діагностики асинхронних двигунів на основі аналізу фазних струмів | 29 |
| 2.2 Теоретичні основи аналізу спектра сигналу потужності | 33 |
| 2.3 Теоретичні основи аналізу сигналу напруги | |
| Розділ 3. ОЦІНЮВАННЯ ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ДІАГНОСТИКА ДЕФЕКТІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СИГНАЛУ СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ | 39 |
| 3.1 Розробка методу аналізу енергетичних показників роботи асинхронних двигунів на основі аналізу експериментальних сигналів фазних струмів і напруг статора | 39 |
| 3.2 Розробка критеріїв діагностики асинхронних двигунів за аналізом сигналу потужності | 49 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3 Розробка методу діагностики АД на основі аналізу сигналу потужності | 60 |
| Розділ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ | 77 |
| 4.1 Створення експериментального обладнання для дослідження зміни технічного стану асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності | 77 |
| 4.2 Експериментальна перевірка розроблених методів | 89 |
| ВИСНОВОКИ | 97 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ | 98 |
| ДОДАТКИ | 115 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

| | | |
|---------------------|---|----------------------------------------------------|
| АД | — | асинхронний двигун |
| Φ | — | магнітний потік; |
| K_z | — | коефіцієнт запасу потужності, |
| P | — | приведений тиск, який створює компресор |
| A | — | довжина приміщення |
| B | — | ширина приміщення |
| h_p | — | розрахункова висота підвішування світильника |
| Φ | — | світловий потік однієї лампи |
| N | — | кількість світильників |
| H | — | коефіцієнт використання світлового потоку |
| S | — | площа приміщення |
| $M_{\text{пуск}}$ | — | пусковий момент електродвигуна Нм; |
| $M_{\text{зр.р.н}}$ | — | момент зрушення робочої машини, Нм; |
| $M_{\text{надл}}$ | — | необхідний надлишковий момент при пуску, Нм |
| $S_{\text{дв}}$ | — | номінальна потужність електродвигуна, кВА; |
| $R_{\text{факт}}$ | — | фактична кратність пускового струму електродвигуна |
| $U_{\text{к\%}}$ | — | напруга короткого замикання трансформатора |
| $U_{\text{л}}$ | — | лінійна напруга, В; |
| ВО | — | вимірювальна обмотка; |
| ДД | — | діагностична діаграма; |
| ЕРС | — | електрорушійна сила; |
| КЗОР | — | короткозамкнена обмотка ротора; |
| КЗК | — | короткозамикаюче кільце; |
| МРС | — | магніторушійна сила; |
| МСЕ | — | метод скінченних елементів; |
| ОЗ | — | обмотка збудження; |
| ОС | — | обмотка статора; |
| ПКД | — | пристрій контролю і діагностики; |
| СКК | — | сегмент короткозамкненого кільця; |
| ССЕ | — | сітка скінченних елементів; |

ВСТУП

У сучасних економічних умовах одним з ефективних засобів скорочення експлуатаційних витрат для виробничих підприємств є вдосконалення організації експлуатації та технічного обслуговування обладнання. Найбільш масово на підприємствах використовують електромеханічні системи, обладнані асинхронними двигунами (АД), які споживають близько 60 % електроенергії [54, 57, 61, 62, 65, 73, 127]. Більшість АД в Україні було введено в експлуатацію 30–40 років тому [54, 57, 82]. За цей період вони неодноразово проходили процедури планового та позапланового ремонту, у результаті чого істотно змінювали свої характеристики порівняно з проектними [47, 54, 56, 63, 68, 82, 86, 111]. У той же час, якість виготовлення, складання та експлуатації нових АД не завжди є високою. Таким чином, постає задача діагностики АД з метою виявлення наявних пошкоджень та ступеня їх розвитку, що надає можливість виведення АД у ремонт за фактичним станом, та є шляхом оптимізації використання виробничого обладнання.

Серед поширених методів оцінювання поточного технічного стану і діагностики АД виділяють систему планово-попереджувальних ремонтів (ППР), що вимагає виведення устаткування з виробничого процесу і часткового розбирання обладнання [54, 57, 65, 82, 100]; вібродіагностику, що потребує використання відносно дорогого обладнання [17, 53, 142, 143]; аналіз спектра струмів [1, 4, 30, 34, 39, 106]. Останні два підходи є більш перспективними, оскільки дозволяють виконувати діагностику безпосередньо у виробничому процесі. Проте більшість з розроблених методів застосовуються для машин або великої потужності, або спеціального призначення, і потребують використання дорогого діагностичного обладнання. При цьому залишається проблема діагностики та визначення поточного технічного стану АД малої та середньої потужності, коли неможливо або недоцільно встановлювати дороге обладнання.

Цю проблему можна розв'язати при виконанні діагностики за аналізом енергетичних процесів, які відбуваються під час роботи двигуна. Характеристикою цих процесів є сигнал потужності, що розраховується на основі миттєвих значень струмів і напруг.

Необхідно зазначити, що поширення керованого електропривода з різноманітними перетворювачами призводить до певної зміни форми напруги

живлення [42, 123]. Тому для адекватного оцінювання режимів роботи і діагностики АД необхідно враховувати вплив якості параметрів мережі живлення на зміну режимів роботи двигуна. Це дозволить визначати дефекти, що зароджуються, без виведення машини з виробничого процесу.

Зважаючи на вищесказане, актуальною є задача розробки нових методів діагностики АД, оснований на аналізі енергетичних процесів у двигуні, які не вимагають виведення обладнання з виробничого процесу, потребують мінімальних матеріальних затрат на впровадження та можуть бути застосовані для АД малої та середньої потужності.

Аналіз спектра сигналу потужності дозволяє уникнути недоліків притаманним іншим методам, оскільки враховує властивості як сигналу струму так і сигналу напруги. При цьому можна встановити відповідність між спектрами потужності та вібрацій. Це дозволить розробити недорогий та надійний метод діагностики АД, який можна застосовувати для машин, що працюють в умовах неякісного живлення. Цей метод дозволяє як діагностувати наявність певного пошкодження, так і визначення рівня пошкодження за аналізом значення відповідної гармонійної складової.

Мета роботи – удосконалення методів діагностики дефектів та оцінювання загального технічного стану АД шляхом аналізу сигналу споживаної потужності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити *наступні завдання*:

- теоретично обґрунтувати застосування аналізу сигналу споживаної потужності для задач діагностики асинхронних двигунів;
- провести математичне моделювання режимів роботи АД для виявлення діагностичних ознак найбільш розповсюджених дефектів;
- розробити методику діагностики дефектів АД, оцінювання ступеня їх розвитку та працездатності двигуна у поточних експлуатаційних режимах

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії в асинхронному двигуні.

Предмет дослідження – діагностичні ознаки сигналу споживаної потужності для виявлення дефектів АД.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ І МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

1.1 Аналіз статистики пошкодження асинхронних двигунів

В умовах загострення питання вичерпування ресурсів електромеханічного обладнання велика увага приділяється питанню економії виробничих затрат. Одним зі шляхів розв'язання даної проблеми є підвищення ефективності та якості виконання технічного обслуговування та ремонту наявного виробничого обладнання, що призводить до зменшення збитків внаслідок вимушеного простою технологічного процесу. Найбільший відсоток споживання і перетворювання енергії на підприємствах припадає на електричні машини, зокрема асинхронні двигуни (АД) [53, 60–62, 79]. Тому на даний час питанням надійності й довговічності електричних машин та діагностики наявних дефектів приділяють усе більшу увагу. У цьому напрямі ведуться численні дослідження, за результатами яких опубліковано значну кількість наукових робіт та інших матеріалів як закордонними [1–18, 20, 21, 24–40], так і вітчизняними дослідниками [43, 48, 49, 55–58, 59, 69, 84, 85, 106–108, 112, 113, 117, 118, 130, 132–134, 136–138, 144]. Питання надійності електричних машин обговорюються на різних семінарах і конференціях. Однак на даний момент відсутні роботи, що узагальнюють результати досліджень питань надійності електричних машин, які необхідні численним фахівцям, що працюють у науково-дослідних організаціях і промислових підприємствах з проектування, виробництва й експлуатації електричних машин як загального, так і спеціального застосування. Питання дослідження надійності електричних машин включені також до навчальних планів ряду спеціальностей вищих технічних навчальних закладів. Особливо гостро стоїть необхідність у розгляді питань діагностики поточного стану обладнання з метою визначення залишкового ресурсу. Це знаходить висвітлення і в документах уряду [109].

Незважаючи на вдосконалення технологій виготовлення конструкційних матеріалів і технологій ремонту, показники відмов електричних машин в усьому

світі приблизно наступні [3, 139]: із загального числа ушкоджених електродвигунів близько 80 % ремонтується, а 20 % замінюються резервними. Згідно з різними статистичними джерелами [22], найчастіше вихід з ладу АД трапляється через пошкодження обмоток статора та відмову підшипникового вузла. Серед інших типових відмов слід виділити пошкодження обмоток ротора, неспіввісність ротора і виконавчого механізму, дефекти кріплень АД до основи і виконавчого механізму до ротора АД (рис. 1.1).

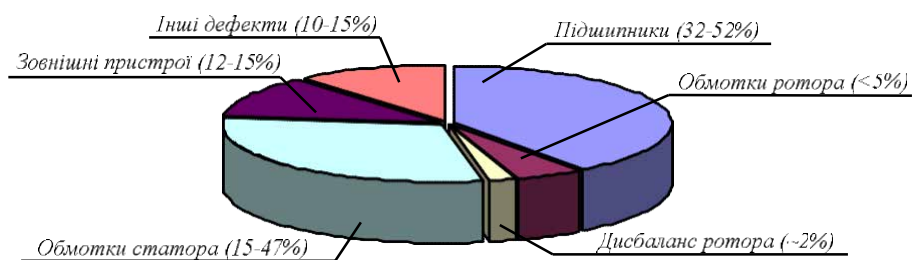


Рис.1.1 – Статистика відмов вузлів АД

Наведена статистика обумовлена тим, що з кожним роком парк електричних машин та електромеханічного обладнання фізично все більше застаріває, оскільки випуск нових електричних машин у країні істотно знизився.

У переважній більшості підприємств прагнуть створювати власні ремонтні цехи, що призводить до зниження надійності електроустаткування через недостатню кваліфікацію ремонтного персоналу, відсутність необхідного випробувального й діагностичного обладнання, порушення технології відновлення й ремонту та ін. Така ситуація призводить до зниження загальної надійності всіх вузлів і елементів електромеханічного обладнання – магнітної системи, обмоток статора й ротора, підшипників, колекторів або контактних кілець і щіткового пристрою. Вихід з ладу кожної із цих частин призводить до відмови в роботі машини. Слід зазначити, що відмові звичайно передують внутрішні зміни в машинах, як-то: зростання втрат споживаної потужності, перегріву обмоток тощо.

1.2 Аналіз найбільш типових пошкоджень асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

Загалом пошкодження та дефекти АД поділяють на механічні та електричні. До механічних належать пошкодження підшипникового вузла, дефекти кріплення

виконавчого механізму або редуктора до вала АД, неякісні кріплення АД до основи. Електричні пошкодження поділяються на пошкодження статора та пошкодження ротора.

1.2.1 Пошкодження механічної частини

Як свідчать результати аналізу (рис. 1.1), близько 40–50 % відмов АД пов'язані з механічними дефектами, серед яких найчастіше зустрічаються пошкодження обертових елементів підшипників, статичний та динамічний ексцентриситет ротора, що виникають унаслідок «просідання» місць установлення підшипників.

У загальному випадку, механічні дефекти АД, такі як неспіввісність вала АД і виконавчого механізму, дефекти підшипників та ін. призводять до зростання змінної складової моменту на валу. Слід зазначити, що внаслідок наявності гармонік магнітного поля у повітряному проміжку АД, змінна складова моменту існує і при роботі непошкодженої машини. Однак змінні складові моменту, що виникають через механічні пошкодження, мають чітко визначені частоти, зазвичай пов'язані із частотою обертання вала АД.

Підшипники. У більшості електричних машин використовуються підшипники кочення, що складаються з двох кілець – внутрішнього і зовнішнього, між якими розташовані кульки або обертові елементи. Таким чином, відмова підшипникового вузла може відбуватися через дефекти внутрішнього кільця, зовнішнього кільця, кульок або обертових елементів. Під час роботи навіть ідеально збалансованого АД з якісним відцентрованим кріпленням виконавчого механізму до вала АД можуть відбуватися відмови, пов'язані зі втомлюваністю підшипників. На розвиток таких дефектів впливають вібрації, концентрація механічних зусиль при пусках, внутрішні навантаження, внутрішній ексцентриситет підшипників, а також підшипникові струми.

Дисбаланс ротора. За останні роки з'явилась велика кількість робіт, присвячених вивченню дисбалансу ротора. З цих робіт відомо, статора, може бути статичним, динамічним та змішаним. При статичному ексцентриситеті центральна вісь ротора зміщена відносно центральної осі статора на певне значення, і ротор

обертається навколо своєї центральної осі (рис. 1.2, б). При динамічному ексцентриситеті центральна вісь ротора обертається навколо центральної осі статора, при чому відносно своєї центральної осі ротор нерухомий (рис. 1.2, в). При змішаному ексцентриситеті центральна вісь ротора зміщена відносно центральної осі статора та обертається навколо неї, при цьому ротор також обертається навколо своєї центральної осі (рис. 1.2, г).

Дисбаланс ротора є одним з найтипівіших видів механічних пошкоджень АД. Найбільш розповсюджені причини виникнення дисбалансу – неправильне встановлювання підшипників під час складання АД; пошкоджені або дефектні підшипникові щити; викривлення вала; робота на критичних швидкостях, яка призводить до коливань ротора та ін.

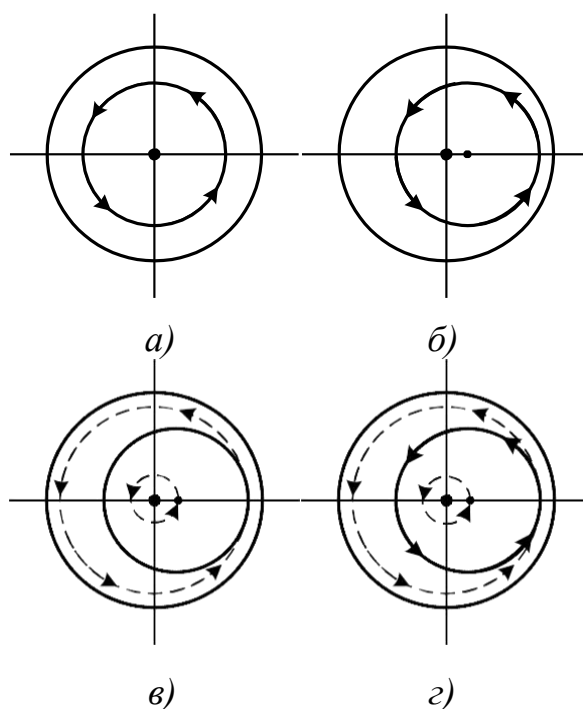


Рис. 1.2 – Види дисбалансу ротора: а) відсутній; б) статичний; в) динамічний; г) змішаний

Ексцентриситет призводить до виникнення сил, які змушують ротор відтягуватись від центральної осі статора. Це призводить також до зростання навантаження на машину та до значного прискорення зношення підшипників. Більше того, радіальна магніторушійна сила, викликана ексцентриситетом, може впливати на магнітну систему статора і, діючи на обмотки статора, призводити до небажаних та потенційно небезпечних вібрацій.

Неякісне кріплення до основи. При послабленні жорсткості кріплення АД до

основи виникають низькочастотні вібрації, що спричиняють коливання швидкості обертання ротора двигуна. Коливання частоти обертання ротора, у свою чергу, призводять до зміни магнітного потоку в повітряному проміжку. Усі ці чинники призводять до низькочастотної модуляції електричних сигналів АД, причому частота модуляції змінюється зі зміною навантаження машини, що дозволяє діагностувати даний дефект.

1.2.2 Пошкодження електричної частини

Пошкодження статора. Основні причини виникнення пошкоджень обмоток статора – це надлишкові термічні, електричні, механічні навантаження та негативний вплив чинників навколишнього середовища, що, зрештою, позначається на стані ізоляції обмоток статора.

Пошкодження ізоляції призводять до її пробую. При цьому через місце пробую протікають струми: від фази статора до заземлення (замикання «фаза – земля»), від одного до іншого витка обмотки однієї фази (виткові замикання), від витка обмотки однієї фази до витка обмотки іншої (міжфазні замикання) (рис. 1.3).

Для АД низької напруги живлення (0,4 кВ) пошкодження обмоток статора часто не підлягають ремонту. Для машин середньої й великої потужності при виході з ладу кількох секцій обмотки статора АД, іноді, з метою економії коштів, ці секції не виймають з пазів, однак виключають зі схеми обмотки. Кінці непошкоджених секцій з'єднують в обхід пошкоджених. У результаті обмотка статора стає несиметричною, і двигун в подальшому експлуатується з такою обмоткою. Несиметрія фазних струмів призводить до відхилення характеру магнітного поля в повітряному проміжку від колового. Цей факт викликає виникнення гармонік електромагнітного поля різного порядку, які спричиняють спотворення обертових моментів, і при значному відсотку виведених секцій можуть призвести до неможливості пуску АД з короткозамкненим ротором [103].

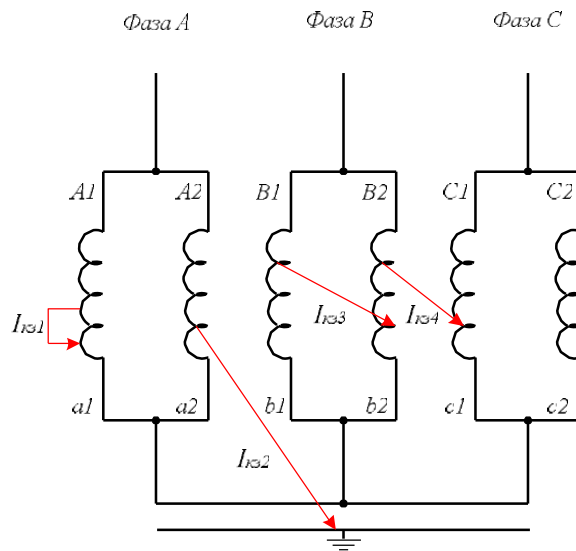


Рис. 1.3 – Види замикань обмоток статора:

I_{kz1} , I_{kz3} – між сусідніми витками однієї фази; I_{kz2} – між витком фази та землею; I_{kz4} – між сусідніми витками двох різних фаз

У випадку ремонту машину необхідно надсилати до ремонтного цеху або на спеціалізоване підприємство для видалення старої та намотки нової обмотки. Дефекти обмоток статора визначаються за аналізом фазної несиметрії обмоток статора або за струмами витікання. Несиметрія визначається за допомогою аналізу зворотної послідовності струмів або повних опорів.

Розглянемо детальніше причини виникнення пошкоджень обмоток статора.

Теплові навантаження. Як відомо, при проектуванні АД термін служби ізоляції обмоток розраховується залежно від температури її нагрівання в номінальному режимі роботи. Однак під час перевищення температури нагрівання ізоляції понад номінальну термін її служби стрімко зменшується. Термін служби ізоляції електричної машини (ЕМ) при постійній температурі описується рівнянням Вант-Гоффа–Арреніуса [82]:

$$\tau = T_b e^{-b\Theta}$$

де T_b – базовий термін служби при Θ , °C – перевищення температури понад номінальну; b – коефіцієнт, що залежить від властивостей ізоляції, відповідає скороченню терміну служби вдвічі на кожні (8–12) °C підвищення температури (для ізоляції класу В коефіцієнт $b = 0,069^\circ\text{C}^{-1}$).

Перевищення температури відбувається внаслідок:

- коливань або несиметрії напруги живлення. У роботі [5] зазначено, що при фазній несиметрії напруги на рівні 3,5 % температура обмотки з найбільшим значенням струму збільшується на 25 %;

- повторних пусків АД через короткі проміжки часу;
- перенавантаження АД;
- пошкодження системи охолодження;
- високої температури навколишнього середовища.

Електричні навантаження. Напряга живлення, вища за номінальну, або велике значення похідної напруги (швидка зміна напруги при вмиканні/вимиканні, зміна режиму роботи АД, живлення від перетворювача частоти) призводять до прискореного зношення діелектричного матеріалу. Крім того, при потраплянні стороннього матеріалу або вологи на ізоляцію обмоток, можуть виникати струми витоку на землю. Наявність підвищеного електромагнітного поля викликає внутрішні часткові розряди в порожнинах ізоляції. Це спричиняє появу обуглених ділянок ізоляції, що, у свою чергу, призводить до зростання значення електричного поля і зростання кількості часткових розрядів навколо цих ділянок.

Механічні навантаження. Як зазначалося, часті повторні пуски АД призводять до перегріву ізоляції обмоток машини. Крім того, такі циклічні впливи призводять до частого розтягування та стискання ізоляції, наслідком чого є тріщини матеріалу. З іншого боку, на сталь статора впливає сила, що виникає внаслідок взаємодії струму статора та магнітного потоку, і має подвійну частоту мережі живлення. Вібрації, що виникають під дією цієї сили, призводять до розламування та стирання ізоляційного матеріалу. Зрештою, відбуваються удари зовнішніх предметів по статору, що призводить до пошкоджень ізоляції.

Вплив чинників навколишнього середовища. Висока вологість або підвищена концентрація шкідливих хімічних речовин у навколишньому середовищі також можуть призвести до прискореного виходу з ладу обмоток статора АД.

Під час розвитку дефектів ізоляції обмоток статора часткові розряди в порожнинах ізоляції впливають на напруги в точці підключення АД. Унаслідок цього виникають перенапруги та провали напруги на високих частотах. Іншим наслідком дії часткових розрядів є виникнення озону та оксиду азоту, які при

взаємодії з вологим середовищем формують азотну кислоту, що призводить до прискореного зношення ізоляційного матеріалу.

Пошкодження ротора відбуваються внаслідок термічних та механічних перенавантажень, а також внаслідок дефектів виготовлення.

Теплові перенавантаження. Перегрівання обмоток ротора (стрижнів та короткозамкнених кілець) призводить до плавлення стрижня або навіть клітки ротора. Джерело перегріву може бути зосереджено у стрижнях ротора (особливо під час повторних пусків, під час прискорення та гальмування двигуна) або в осерді ротора з подальшим розповсюдженням перегріву на стрижні. Ці явища призводять до розшарування елементів обмотки ротора. При несиметрії напруги живлення у роторі виникають великі струми, зумовлені гармоніками напруги зворотної послідовності. Унаслідок поверхневого ефекту, що властивий цим струмам на вищих гармоніках, вони є нерівномірно розподіленими вздовж секцій стрижнів ротора. Зрештою, при роботі на низьких швидкостях з великим ковзанням унаслідок поверхневого ефекту зростає термічний градієнт уздовж стрижня ротора, що призводить до його руйнації.

Механічні перенавантаження. За аналогією з обмотками статора, магнітні сили у повітряному проміжку викликають вібрації стрижнів ротора. Однак відцентрові сили, які виникають унаслідок обертання, змушують стрижні залишатися в пазах. При низьких швидкостях обертання відцентрові сили незначні, унаслідок чого стрижні ротора вібрують, що веде до механічного зношування.

У випадку, коли стрижень ротора обірваний або частково обірваний, струм, який проходив через цей стрижень, перерозподіляється на суміжні стрижні. У них струм стає більшим за номінальний, відповідно, теплові втрати зростають. Крім того, змінюється розподіл магнітного потоку навколо обірваного стрижня – потік збільшується з одного кінця стрижня і зменшується з іншого. Це явище призводить до збільшення втрат у сталі навколо обірваного стрижня.

Обидва види втрат призводять до збільшення температури стрижнів, суміжних з обірваним, що, зрештою, може призвести і до їх обриву.

На практиці ситуація дещо менш небезпечна. Струми в обірваному стрижні рідко дорівнюють нулю – зазвичай стрижень є лише надломленим, або у ньому

протікають внутрішні струми. Внутрішні струми виникають, коли клітка ротора не ізольована від осердя ротора. У цьому випадку в обірваний стрижень надходить звичайне значення струму, але за довжиною стрижня струм перетікає у суміжні стрижні через магнітопровід ротора (рис. 1.4). Потік струму, який при цьому виникає, через сталь ротора призводить до перегріву осердя ротора.

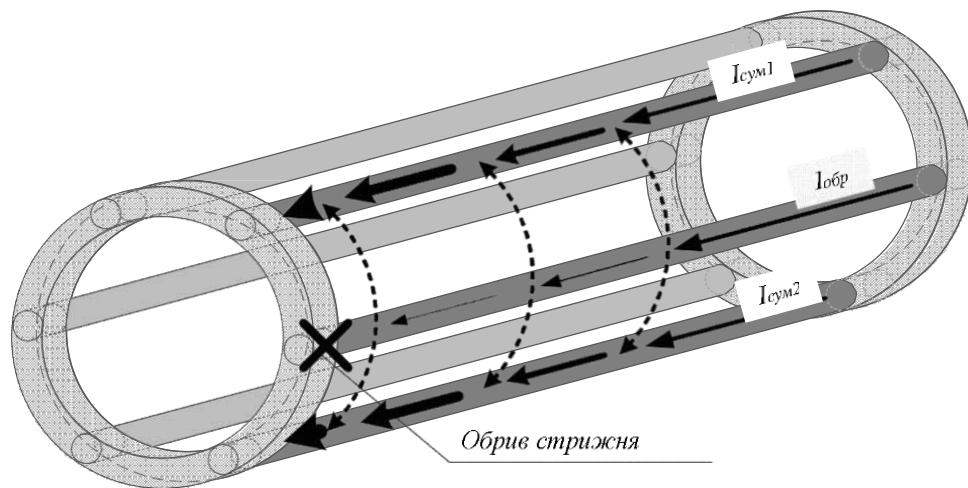


Рис. 1.4 – Розподіл струмів при обриві стрижня ротора

1.3 Аналіз методів діагностики та контролю технічного стану асинхронних двигунів

З появою електричних машин (ЕМ) виникло питання контролю надійності їх роботи. Першою спробою такого контролю було запровадження системи ППР, яка передбачає проведення періодичних випробовувань надійності роботи вузлів ЕМ.

Планово-попереджувальні ремонти [44, 57, 82]. Суть даної методики полягає у виведенні машини з експлуатації через визначені проміжки часу, її часткового розбирання та випробування з прикладанням тестових збуджень до вузлів машини. Найпоширенішими методами є випробування підвищеною випрямленою напругою промислової частоти, випробування випрямленою напругою, вимірювання опору ізоляції мегомметром. Ці методи вимагають виведення машини з виробничого процесу. Випробування проводяться за нормованих значень тестових збуджень.

Справними вважаються вузли, під час випробування яких не відбулося відмови. Очевидно, що розглянуті методи попередження відмов не мають належного ефекту, оскільки, по-перше, потребують виведення машини з виробничого процесу, що спричиняє додаткові матеріальні витрати; по-друге, методика випробувань загалом має руйнівний характер, оскільки дефектні вузли виявляються шляхом їх відмови при випробуванні; по-третє, такі випробування не гарантують безвідмовної роботи ЕМ у міжремонтні проміжки часу.

Отже, наступним кроком у питаннях діагностики ЕМ стала розробка неруйнівних методів. Серед них можна виділити, наприклад, наступні.

Статистичні методи [57, 82]. Логічним результатом упровадження системи ППР стало накопичення статистичної інформації про відмови двигунів під час проведення ППР та в міжремонтні проміжки часу. Природно, що наступним кроком у питанні попередження відмов електричних машин стало створення математичних моделей надійності окремих вузлів та машин у цілому, які базувалися на усередненій узагальненій статистичній інформації щодо відмов ЕМ певних типів. Статистичні методи базуються на аналізі статистичних даних показників роботи певних груп двигунів, на основі яких розраховувались певні емпіричні коефіцієнти, та розраховувалась імовірність безвідмовної роботи для певного типу машин. Такі методи не враховували поточних експлуатаційних параметрів окремо взятої машини, потребували досить великого обсягу статистичної інформації для кожного типу машин, а також масштабних дослідів, тому їх ефективність також не є достатньо великою, а достовірність прогнозу для конкретної машини не є точною.

Таким чином, статистичні методи також не гарантують безвідмовної роботи машини протягом розрахованого інтервалу часу, оскільки не враховують реальних експлуатаційних умов конкретної машини та не надають можливості врахування впливу раптових зовнішніх збурень.

Метод часткових розрядів (ЧР) [83]. Зазвичай руйнування ізоляції під дією ЧР відбувається протягом багатьох місяців і навіть років. Таким чином, реєстрація ЧР, оцінювання їх потужності й повторюваності, а також локалізація місця їх виникнення, дозволяють своєчасно виявити пошкодження, що розвиваються, і

вжити необхідних заходів щодо їх усунення. Для фіксації наявності та значення ЧР розроблені відповідні прилади [83]. Недоліком існуючих методик і приладів для фіксації ЧР є те, що більшість з них потребують часткового розбирання машини або встановлення великої кількості датчиків. До того ж, не завжди можна виокремити сигнал ЧР від перешкод. Даний метод найчастіше використовується під час випробовувань ЕМ великої потужності.

Імпульсні методи. У роботах [136, 142] запропоновано методи і прилади для діагностики, контролю технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу обмоток статора. Методика оцінювання базується на основі імпульсних методів, зокрема на аналізі значення та форми комутаційних перенапруг, що і було покладено в основу розробки апаратури контролю і діагностики обмотки статора. Первинний сигнал формується в генераторі прямокутних імпульсів. При вмиканні цей блок забезпечує запуск схеми з видачею імпульсів необхідної форми. У силовому ключі, який приєднано до обмотки ЕМ, від блока генератора струму встановлюється крутий зріз фронту струму, у результаті чого в об'єкті випробування виникає високовольтний комутаційний процес. Дана методика оцінювання діагностичних параметрів і встановлений їхній зв'язок з об'єктивними показниками стану обмоток статора дозволяє на основі аналізу перехідного процесу, який відбувається при комутації, діагностувати дефекти, що зароджуються, і значною мірою визначати ступінь їхнього розвитку за значенням імпульсів комутаційних перенапруг.

Вібродіагностика. Вихідною передумовою пошуку несправностей машин за параметрами вібрації є те, що вібросигнал працюючої машини містить велику кількість інформації про її стан [58, 145, 146]. Для ефективного використання віброконтролю в програмі технічного обслуговування необхідно, щоб ця інформація була належним чином отримана з аналізу вібросигналів.

Найбільш відповідальним елементом системи збору вібраційних даних є вібродатчик, необхідний для перетворення механічних коливань на електричний сигнал. Протягом багатьох років з різним ступенем успіху використовувалися датчики різних типів. На сьогодні найнадійнішим датчиком, що забезпечує до того ж найбільшу точність перетворень, є акселерометр. Найпоширенішим типом

акселерометрів є акселерометр з убудованим підсилювачем заряду.

Математичний апарат діагностики пошкоджень АД на основі аналізу сигналів вібрації на даний момент є достатньо теоретично обґрунтованим та експериментально випробуваним.

Так, наприклад, частоти коливань валу, пов'язані з різними типами пошкоджень підшипників, визначаються за наступними виразами, згідно з [38]:

$$F_c = \frac{1}{2} F_R \left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c} \right); \quad (1.1)$$

$$F_o = \frac{N_B}{2} F_R \left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c} \right); \quad (1.2)$$

$$F_I = \frac{D_b}{2} F_R \left(1 + \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c} \right); \quad (1.3)$$

$$F_B = \frac{D_b}{D_c} F_R \left[\left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c} \right)^2 \right]; \quad (1.4)$$

де F_c – частота пошкоджень сепаратора підшипника; F_o – частота пошкоджень зовнішнього кільця підшипника; F_I – частота пошкоджень внутрішнього кільця підшипника; F_B – частота пошкоджень кульок підшипника; F_R – частота обертання валу АД; D_b – діаметр кульки підшипника; D_c – зовнішній діаметр підшипника; N_B – кількість обертових елементів; β – кут нахилу контакту кульки.

Проте, незважаючи на достатньо високу достовірність діагностики та високий рівень теоретичного і математичного забезпечення даного методу, він потребує доволі значних матеріальних затрат на діагностичне обладнання. До того ж, установити додаткове обладнання у виробничих умовах не завжди можливо. Тому даний метод застосовують для діагностики машин великої потужності або для тих, що працюють на відповідальних механізмах, коли додаткові витрати на діагностичне обладнання економічно обґрунтовані.

Останнім часом розповсюдження набуває аналіз електричних сигналів, наприклад, сигналу струму, що є більш простим і зручним та може застосовуватись для розв'язання багатьох задач. Зв'язок між складовими вібрації та струму для

визначення дефектів підшипників може бути представлений наступним чином.

Компоненти вібрації, які викликані механічним пошкодженням і мають частоту f_{car} призводять до виникнення коливань моменту $\Delta T_i(t)$, які зумовлюють коливання швидкості $\Delta \omega_i(t)$. Відповідні кутові механічні коливання призводять до коливань магнітного потоку. Таким чином, вібрації можуть розглядатися як складові моменту, які зумовлюють появу в сигналі струму двох складових на частотах:

$$F_{be} = |f \pm kf_{car}|, \quad (1.5)$$

де f – частота мережі живлення; $k = 0, 1, 2, \dots$

Однак амплітуди частот у сигналі струму, пов'язані з механічними дефектами, незначні, і можуть бути поглинуті завадами. Тому наразі існує актуальна задача розробки надійних методів виявлення даних частот в електричних сигналах.

Аналіз напруги живлення. В основу методу покладено аналіз напруги зворотної послідовності, яка виникає за наявності дефектів АД, а також високочастотного несучого тестового сигналу. Так, у роботі [25] пропонується здійснювати діагностику обриву стрижнів ротора за аналізом модульованого сигналу напруги живлення, а в роботі [20] – за аналізом напруги в нейтральному дроті. У роботі [7] за аналізом напруги прямої або зворотної послідовності несучого тестового сигналу діагностуються виткові замикання обмоток статора.

Розглянута група методів відзначається надзвичайною простотою застосування – необхідне лише встановлення датчиків напруги в точці підключення. Однак при несинусоїдному живленні, що має місце в низьковольтних мережах, достовірність діагностики викликає багато питань. Таким чином, аналіз напруги живлення не можна ефективно застосовувати під час діагностики АД середньої й малої потужності.

Аналіз сигналу струму. У країнах Західної Європи та Північної Америки набув поширення метод визначення технічного стану електродвигунів за спектральним аналізом споживаного струму [1, 4, 30, 34, 39, 106].

Фізичний принцип, покладений в основу цього методу, полягає в тому, що

будь-які збудження в роботі електричної та/або механічної частини електродвигуна чи пов'язаного з ним пристрою призводять до змін магнітного потоку в повітряному проміжку електричної машини, і, відповідно, до слабкої модуляції споживаного електричним двигуном струму. Отже, наявність у спектрі струму характерних (й неспівпадаючих) частот певного значення свідчать про наявність пошкоджень електричної та/або механічної частини електродвигуна і пов'язаного з ним механічного пристрою.

Принцип роботи систем діагностики, побудованих на основі даного методу, полягає у вимірюванні струму однієї з фаз статора, розкладанні отриманого сигналу у ряд Фур'є та порівнюванні частот наявних у спектрі гармонік з частотами, які викликані певними дефектами. Зазвичай подібні системи базуються на аналізі струму лише однієї фази статора та надають можливість аналізу або на основі періодичних вимірювань з використанням мобільного діагностичного комплексу, або на основі постійного спостереження з використанням портативних мікропроцесорних систем вимірювання та аналізу технічного стану обладнання (рис. 1.5).

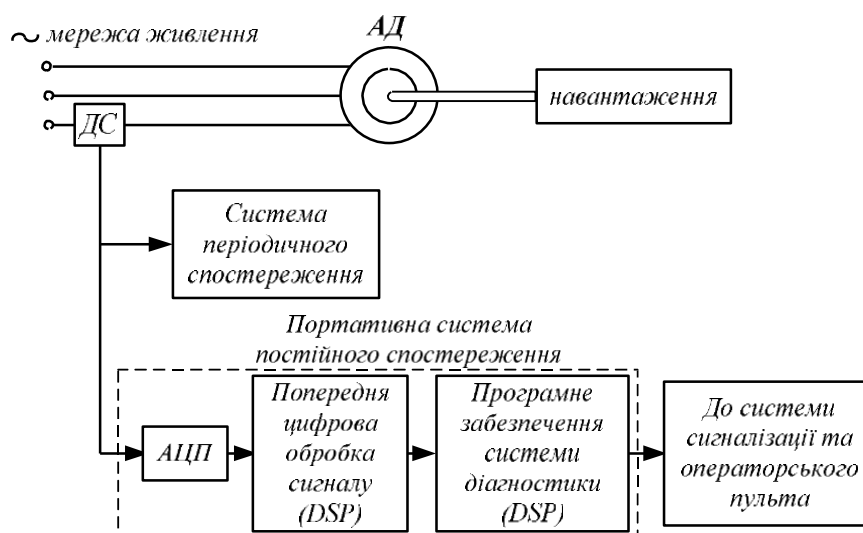


Рис. 1.5 – Функціональна схема системи діагностики на основі аналізу сигналу струму фази статора

Математичний апарат даного методу добре розвинутий і дозволяє на даний момент визначати різні види дисбалансу ротора, обриви стрижнів ротора, виткові замикання обмотки статора [4, 16, 18, 34–36, 39, 40, 106].

У роботі [106] як приклад наведено результати спектрального аналізу струмів

двох однотипних вентиляторних установок: тієї, що знаходиться в експлуатації тиждень, і тієї, що експлуатується п'ять років. Так, пошкодження ротора двигуна (обрив стрижнів, послаблення кріплення стрижнів до контактних кілець, приховані дефекти лиття) виявляються за наявністю двох симетричних відносно частоти мережі живлення піків у спектрі струму на характерних частотах. У роботі [18] запропоновано метод діагностики коротких замикань в обмотках статора на основі логічних виразів для системи нечіткої логіки. Даний метод оснований на аналізі діючих значень струмів за фазами. Рішення про технічний стан обмотки, наявність пошкодження та можливість подальшої роботи приймається на основі виконання певних логічних правил, що оснований на аналізі чисельного значення діючого струму фаз: «малий», «середній», «великий». За певними комбінаціями даних станів формуються логічні правила для діагностики АД.

Оскільки метод базується на аналізі певних інтегральних величин, то при такому підході втрачається діагностична інформація, що може міститися у формі сигналу. Крім того, при роботі АД у режимі неробочого ходу амплітудні значення зазначених гармонік дуже малі та можуть нівелюватися завадами від сусіднього обладнання або вимірювальної системи. Отже, даний метод надає кращі результати при аналізі усталеного режиму роботи АД під навантаженням, що не завжди можна реалізувати при виконанні діагностичних операцій.

Для підвищення надійності діагностики рекомендується додатково враховувати якість прикладеної до електродвигуна напруги з метою визначення її несиметрії, наявності вищих гармонічних складових та імпульсів перенапруг, тобто тих чинників, які прямо впливають на термін служби. Добре відомо, що перші два з вищезгаданих чинників призводять як до перегріву обмоток статора, так і до пошкодження підшипників через виникнення високочастотних обертових моментів зворотної послідовності.

Отже, застосування описаних методів дозволяє діагностувати найбільш типові пошкодження електродвигунів і пов'язаних з ними механічних пристроїв, проте має певні обмеження, що за певних умов можуть призводити до хибного діагнозу.

Аналіз сигналу потужності. Аналіз спектра сигналу потужності дозволяє

уникнути недоліків перелічених вище методів, оскільки враховує властивості як сигналу струму так і сигналу напруги. При цьому можна встановити відповідність між спектрами потужності та вібрацій. Це дозволить розробити недорогий та надійний метод діагностики АД, який можна застосовувати для машин, що працюють в умовах неякісного живлення [51–54]. Цей метод дозволяє як діагностувати наявність певного пошкодження, так і визначення рівня пошкодження за аналізом значення відповідної гармонійної складової. Аналіз спектра сигналу споживаної потужності дозволяє визначати енергію пошкодження та її кореляцію з додатковим руйнуванням елементів АД під впливом додаткових вібрацій, які виникають унаслідок певних гармонік електромагнітного моменту. Більше того, аналіз спектра споживаної потужності дозволяє досліджувати режими роботи АД з істотною нелінійністю, коли некоректно застосовувати принцип суперпозиції гармонік струмів [61]. Даний вид аналізу більш надійний, менше залежить від завад та надає додаткові гармонічні складові для аналізу.

Таким чином, проведений аналіз існуючих методів діагностики АД показав, що на даний момент існує необхідність розробки надійного та простого методу для діагностики машин середньої та малої потужності, які працюють у низьковольтних мережах з можливою неякісністю напруги живлення. Такий метод повинен не тільки показувати чіткий зв'язок діагностичної інформації з певними типами пошкоджень АД, але й бути стійким до можливих завад з метою уникнення хибного діагнозу. У результаті аналізу зроблено висновок, що такий метод може бути створений на основі аналізу сигналу споживаної трифазним АД потужності. Результати проведеного аналізу представлено на рис. 1.6 у вигляді схеми.

1.4 Огляд сучасних математичних методів обробки діагностичної інформації

Під час аналізу всіх перелічених сигналів, як правило, або досліджують їх інтегральні параметри чи абсолютні значення, або застосовують їх розкладання в гармонічний ряд за допомогою перетворення Фур'є, і потім аналізують отримані спектри. При цьому виникають ускладнення при аналізі нестационарних режимів

роботи – при рушанні чи гальмуванні, зміні навантаження, виникненні перенапруг чи зовнішніх завад тощо. Крім того, не завжди можна отримати точну математичну залежність, що пов'язує виникнення пошкодження і зміну форми та спектрального складу сигналу. Для розв'язання цих проблем застосовують сучасні методи обробки інформації.

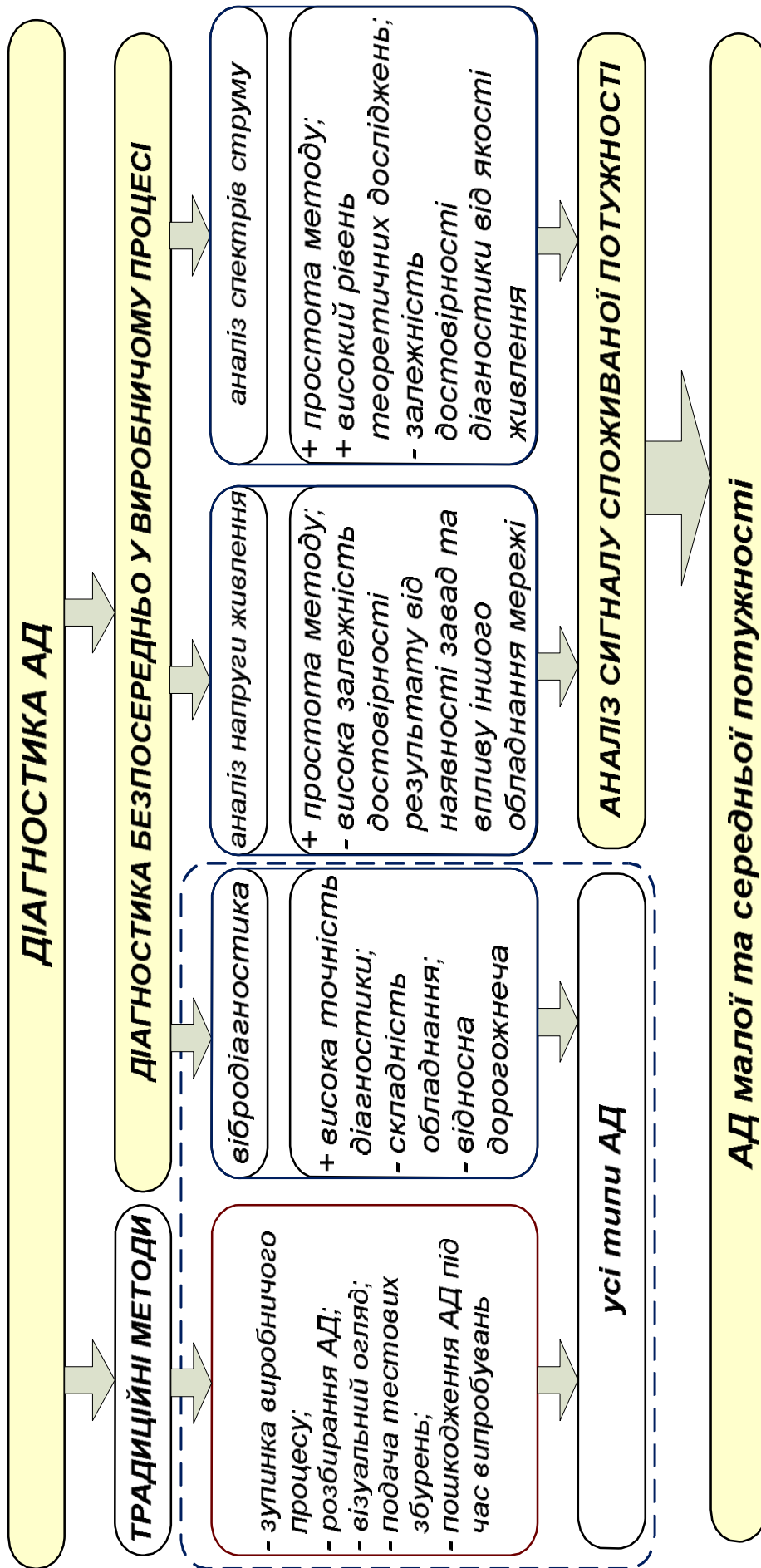


Рис. 1.6 – Аналіз методів діагностики дефектів АД

Частотно-часовий аналіз [10, 27, 29, 31, 32, 40] може застосовуватись у

випадках, коли з плином часу відбуваються незначні зміни вимірюваних величин. Така ситуація характерна для дефектів, що тільки зароджуються, або коли вимірювані значення слабо пов'язані з дефектом. Частотно-часове перетворення зазвичай виконується за допомогою швидкого перетворення Фур'є або вейвлет-перетворення. Індикація дефектів при частотно-часовому аналізі може бути автоматизована, наприклад, за допомогою багатопарової перцептронної нейронної мережі (БПНМ), або статистичних методів розпізнавання шаблонів, як-то дискримінантний аналіз, або відображення вхідних даних на вихідні з самоорганізацією. При використанні БПНМ необхідно навчати нейронну мережу на випадки наявності та відсутності пошкодження. Вимірювані та перетворені дані подаються на вхід мережі, на виході отримується інформація про стан досліджуваного об'єкта. Вибірка та загальна кількість даних тренувань визначають надійність роботи методу.

Статистичний аналіз часто застосовуються для ідентифікації дефектів. Статистичний аналіз виконується на основі прямо вимірюваних величин, або розрахованих на основі прямо вимірюваних. Статистичні методи знаходять застосування у штучних нейронних мережах (ШНМ). Так, у роботі [8] за допомогою нейронної мережі ідентифікуються дефекти підшипників. У даному випадку навчання нейронної мережі відбувалось на основі сигналів швидкості обертання та струмів статора. У роботі [33] ШНМ та вимірювані струми статора використовуються для виявлення ексцентриситету ротора та деформації підшипників кочення. У роботі [28] ШНМ використовуються для діагностики пошкоджень підшипників та редуктора з використанням вейвлет-перетворення для попередньої обробки сигналу вібрації. Найбільші складності застосування ШНМ пов'язані з тим, що навчання мережі виконується для певних типів дефектів, і при цьому за наявності інших дефектів АД система працювати не буде. Серед інших статистичних методів, що використовуються для діагностики технічного стану АД, можна виділити накопичення даних [29, 30], статистичний дискримінантний аналіз та латентні Марківські моделі [30].

Нечітка логіка. Нейронна мережа може надавати коректну діагностику технічного стану об'єкта, проте вона є «чорною скринькою», що не надає

можливості пояснення наявного дефекту. ШНМ часто є вибірково чутливою, тому не може бути адекватним інструментом для індикації наявних пошкоджень. Натомість нечітка логіка базується на евристичному мисленні. Вона основана на концепції часткової істинності, де істинність твердження варіюється в межах від нуля до одиниці. Також вихідна інформація є багатозначною. Тому щодо аналізу технічного стану нечітка логіка може надавати інформацію про ступінь дефекту, «можливість» наявності дефекту, або надавати кілька паралельних порад для подальшого аналізу. Лінгвістичні, евристичні та інші типи вхідної інформації використовуються у формі підмножин (станів), як, наприклад, «низький рівень вібрації» та «високий рівень вібрації», що можуть перекриватися. Множини станів називають функціями належності, та обчислюють за нечіткими правилами за допомогою операторів ЯКЩО–ТО задля формування належності вихідних множин (ступінь вихідних станів). Вихідні множини зазвичай дефазифікуються – множини перетворюються у чіткі значення з обчисленням їх ваги для значних ступенів імовірностей. Методи нечіткої логіки знайшли широке застосування при діагностиці різних типів пошкоджень АД. Так, у роботі [24] нечітка логіка застосовується задля класифікації частотного спектра, отриманого із сигналів вібрацій для низькошвидкісних обертових елементів підшипників. Нечітка належність формується із застосуванням сумарного та нормованого відхилення складових кожної значущої гармоніки двигуна з різними типами пошкодження від відповідних гармонік непошкодженого АД.

1.5 Вимоги до розробки обладнання системи діагностики асинхронних двигунів

Проведений аналіз методів та систем діагностики асинхронних двигунів показав, що на даний момент найбільш перспективними є системи, основані на аналізі електричних сигналів. Такі системи вирізняються відносною дешевизною та простотою використання. Більшість таких систем ґрунтується на аналізі сигналу струму, який найпростіше отримати та який може містити інформацію про стан електромеханічної системи. Однак слід зазначити, що існуючі системи

діагностики на основі аналізу як струму, так і напруги все ще поступаються більш дорогим системам вібродіагностики у точності діагностичної інформації. Виходом є використання сигналу потужності для аналізу. Цей сигнал містить усі ознаки як сигналу струму, так і напруги, до того ж містить додаткові гармонічні складові, які можна використати як діагностичні ознаки. При цьому використання в системі діагностики одночасно датчиків струму і напруги не збільшить суттєво вартості діагностичного обладнання. Таким чином, розроблюване обладнання системи діагностики асинхронних двигунів повинно бути побудовано з огляду на можливість аналізу сигналу потужності АД.

Виходячи з аналізу причин ушкодження АД, і факторів, які призводять до виходу його з ладу, було розроблено функціональну схему системи діагностики дефектів і пошкоджень АД (рис. 1.8).

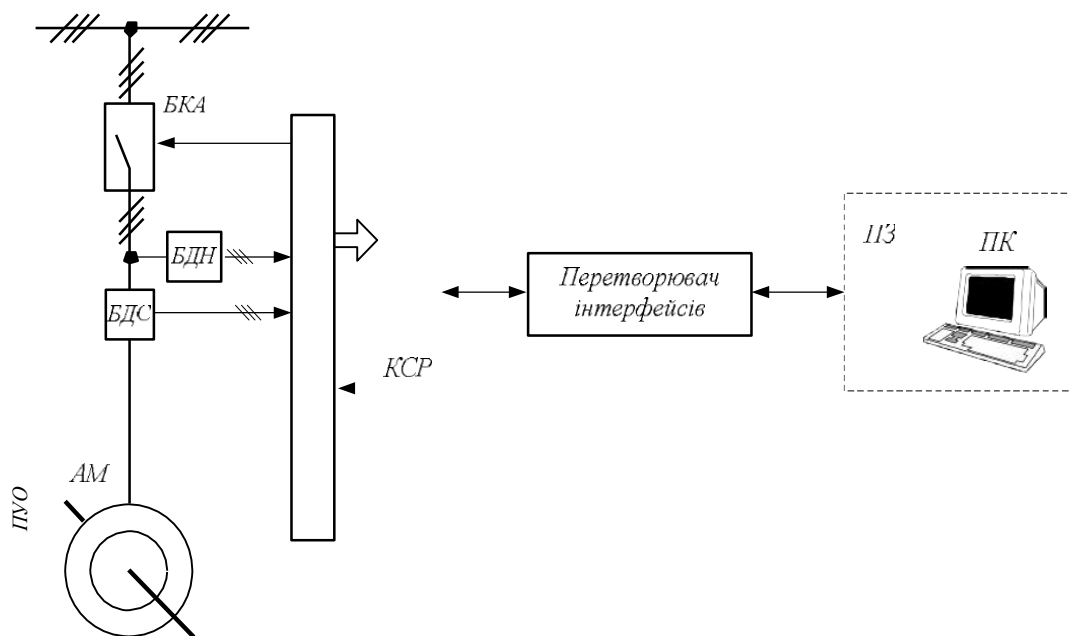


Рис 1.8 – Функціональна схема системи діагностики АМ

АМ – асинхронна машина; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; БДН – блок датчиків напруги; БДС – блок датчиків струму; БКА – блок комутаційної апаратури; КСП – контролер середнього рівня; ПК – персональний комп’ютер; ПЗ – програмне забезпечення; ПУО – пристрій узгодження з об’єктом

Серед функцій системи діагностики можна виділити наступні: спостереження, прогнозу, захисту, діагностики, сервісні функції.

Для спостереження й урахування чинників, які відображають стан вузлів АД, система діагностики повинна бути обладнана системою датчиків координат простору стану АД. Зазначені датчики фіксують струмове завантаження обмоток та параметри напруги джерела живлення. При наявності інформації про параметри АД, частоту обертання ротора з достатньою для розглянутих завдань точністю можна визначити непрямим способом. На підставі отриманих даних розраховуються втрати в обмотках, сумарні втрати в машині, змінні складові електромагнітного моменту.

На підставі зчитаної первинної інформації з датчиків, система розраховує інтегральні параметри за якийсь період часу – ефективні або середні значення. Далі шляхом порівняння значення цих параметрів із припустимими реалізується ряд стандартних захистів.

На підставі отриманих інтегральних параметрів виконується перевірка відповідності діагностичних ознак дефектам АД. За результатами аналізу на всіх етапах функціонування система діагностики на основі аналізованих даних здійснює видачу рекомендацій або блокування роботи устаткування в разі аварійної або передаварійної ситуації. Під рекомендаціями мають на увазі повідомлення про необхідність виведення АД у ремонт із вказівкою причини, про можливість виникнення аварійних ситуацій, а також рекомендації щодо оптимальних режимів роботи устаткування. Також повинна бути передбачена можливість архівації й протоколювання інформації про аномальні режими роботи устаткування для узагальнення й уточнення одержуваного результату.

Система повинна включати підсистему діагностики стану АД, що базуються на спостереженні за тенденцією зміни електромагнітних параметрів машини із часом.

Важливим чинником є вартість і доступність використовуваних для реалізації системи компонентів, можливість перенесення та узагальнення принципів аналізу для різних типів АД.

Щодо технічної реалізації варто зазначити ту перевагу, що, на відміну від відомих систем діагностики АД, дана система не вимагає застосування високоточного вимірювального устаткування. Побудову системи можна здійснити

за класичною структурою, де у як нижній рівень виступають датчики збору первинної інформації й пристрої узгодження з об'єктом, а як верхній – персональний комп'ютер. При цьому середній рівень системи слід будувати на основі логічних промислових контролерів, що дозволить, працюючи на даному рівні в режимі реального часу, оперативно реагувати на аварійні або небезпечні ситуації. Застосування як ядра середнього рівня системи сучасних сигнальних процесорів дасть можливість не виділяти аналого-цифровий перетворювач у вигляді окремого вузла і дозволить робити попередню цифрову обробку сигналів.

Функції розрахунку й діагностики, видачі повідомлень персоналу, протоколювання й архівації покладені на верхній рівень системи, на якому може накопичуватись інформація від декількох систем середнього рівня спостереження за різними АД.

Таким чином, проведений огляд стану питання діагностики АД показав, що існує необхідність формування діагностичних показників для визначення технічного стану електромеханічного обладнання (ЕМО), зокрема АД, які ґрунтуються на аналізі зміни форми й характеристик сигналу споживаної потужності. Основою для розрахунку таких показників при аналізі енергетичних режимів ЕМО є миттєві значення сигналів струмів, напруг і потужності. Зручність аналізу сигналу миттєвої потужності зумовлена можливістю оперування її складовими як для пофазного варіанта, так і для трифазного [93].

При визначенні діагностичних показників на основі аналізу споживаної потужності варто дотримуватися наступних вимог:

- прозорий і чіткий зміст діагностичних ознак;
- однозначний зв'язок із певними видами дефектів;
- чіткі граничні значення й обґрунтовані характерні значення.

Проведений аналіз показав можливість оцінювання стану АД за аналізом енергетичних процесів, які відбуваються в АД, зокрема на основі сигналу споживаної потужності, оскільки даний сигнал, на відміну від сигналів струму та напруги, дозволяє не тільки виявити наявність дефекту за гармоніками певної частоти, а й оцінити енергію пошкодження за амплітудою відповідної гармоніки.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗА АНАЛІЗОМ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Як було зазначено у першому розділі, для діагностики АД широкої популярності набувають методи, які не вимагають зупинки технологічного процесу і придатні для виявлення пошкодження на стадії зародження. Для двигунів великої потужності із цією метою успішно застосовуються методи вібродіагностики. Проте у зв'язку з відносно високою вартістю вібродіагностичного обладнання та складністю встановлення вібродатчиків ці методи важко застосовувати для діагностики наймасовіших споживачів і перетворювачів енергії – асинхронних двигунів середньої та малої потужності. Тому для розв'язання цієї задачі з'явилися методи, основані на аналізі параметрів АД, які досить просто виміряти й контролювати у робочому режимі – електричних сигналів двигуна. До даного типу методів належить діагностика на основі аналізу фазних струмів, напруг та сигналу потужності АД.

2.1 Теоретичні основи діагностики асинхронних двигунів на основі аналізу фазних струмів

Діагностика за аналізом фазних струмів є досить популярним методом у зв'язку з простотою вимірювання та запису сигналів струму у робочому режимі АД. Наразі існує велика кількість робіт, присвячених застосуванню даного методу для діагностики обривів стрижнів ротора, дисбалансу ротора, коротких замикань в обмотці статора, а також для виявлення дефектів підшипникових вузлів [4, 16, 18, 34–36, 39, 40, 106]. Ідея даного методу полягає у співвідношенні дефектів АД з певними гармоніками спектра струму, як показано нижче.

2.1.1 Обрив стрижнів ротора

Струми, які протікають у короткозамкненій обмотці ротора, призводять до виникнення трифазного магнітного поля з таким самим числом полюсів, як і магнітне поле статора. Однак це магнітне поле обертається на частоті ковзання

відносно обертового ротора. У випадку симетрії короткозамкненої клітини ротора існує лише магнітне поле прямої послідовності, яке обертається на частоті ковзання відносно обертового ротора. У випадку несиметрії клітини ротора, що виникає, наприклад, унаслідок обриву стрижнів короткозамкненої клітини, виникають обертові магнітні поля зворотної послідовності на частоті ковзання відносно обертового ротора. Наслідком впливу цих полів на обмотку статора є виникнення гармонік струму та напруги на наступних частотах [4, 5, 8, 106]:

$$f_{bb} = f_s |1 \pm 2s|, \quad (2.1)$$

де f_s – частота мережі живлення; s – ковзання.

2.1.2 Дисбаланс ротора

Як було зазначено в першому розділі, існує три типи дисбалансу ротора: статичний, динамічний та змішаний (рис. 1.2). Усі види дисбалансу призводять до появи специфічних гармонічних компонент у спектрі сигналу струму фази. Розглянемо механізм їх формування.

Статичний дисбаланс. Виявляється на гармоніках частот прямування стрижнів ротора, які є бічними частотами основної гармоніки, і розраховуються як:

$$f_{stat} = K_b n_s \pm n f_s, \quad (2.2)$$

де f_{stat} – частота, що відповідає статичному дисбалансу; K_b – кількість стрижнів ротора; n_s – частота обертання ротора; f_s – частота мережі живлення; n – номер непарної гармоніки частоти мережі живлення.

Динамічний дисбаланс. Виявляється на основній гармоніці частоти спрямування стрижнів ротора та її субгармоніках і бокових частотах робочої швидкості навколо них і розраховується як:

$$f_{dyn} = K_b n_s \pm n f_s \pm n_s. \quad (2.3)$$

Змішаний дисбаланс. На практиці виникнення статичного і динамічного дисбалансів зазвичай відбувається одночасно. У роботі [11] отримано вираз для

визначення гармонік спектра струму у загальному випадку наявності змішаного ексцентриситету:

$$f_{mix} = f_s \left[1 \pm k \frac{1-s}{p} \right], \quad (2.4)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots$ – кількість стрижнів ротора.

2.1.3 Короткі замикання в обмотці статора

Пошкодження обмоток статора низьковольтних трифазних АД можна класифікувати наступним чином:

- 1) виникнення короткозамкнених кіл у межах однієї фази: двигун може працювати, але невідомо, як довго;
- 2) міжфазне замикання: двигун виходить з ладу і захисне обладнання відключає його від мережі живлення;
- 3) замикання фази на землю: двигун виходить з ладу і захисне обладнання відключає його від мережі живлення;
- 4) розімкнений контур однієї з фаз: двигун може продовжувати працювати залежно від навантаження, однак при цьому відбувається перегрів обмоток непошкоджених фаз.

Попередження відмови двигуна, як у випадках 3 та 4, можливе лише у випадку ранньої діагностики короткозамкнених кіл у межах однієї фази (як у випадку 1) за допомогою методів он-лайн діагностики. У низьковольтних двигунах, на відміну від високовольтних, проміжок часу між виникненням короткозамкнених кіл у межах однієї фази та відмовою двигуна доволі істотний. Цей факт надає переваги, оскільки дозволяє своєчасно прогнозувати виникнення пошкодження, контролювати його розвиток та своєчасно планувати ремонт, уникаючи значних витрат унаслідок виникнення аварій.

У роботах [16, 17] математично та експериментально показано, що складові спектра фазного струму, викликані витковими замиканнями у фазі, не є надійним індикатором для визначення пошкоджень статора. У роботах [16, 17] досліджено

взаємодію пошкодженого статора та непошкодженого ротора, на основі чого математично та експериментально визначено частоти спектра струму, викликані наявністю виткових замикань. Обмотка статора, яка має пошкодження і є несиметричною, може продукувати в електромагнітному полі повітряного проміжку АД множину гармонік будь-якого порядку. Однак усі ці гармоніки модулюють одну й ту саму частоту – частоту мережі живлення. Гармоніки статора індують струми у клітину ротора, а в обмотку статора індукується відбиток цих гармонік у вигляді нових гармонік електромагнітного поля у повітряному проміжку. Дослідження, проведені у роботах [17, 18], довели, що складові сигналу потоку у повітряному проміжку, які є функцією короткозамкнених витків, визначаються згідно з наступним виразом:

$$f_{st} = f_s \left[\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right], \quad (2.5)$$

де f_s – частота мережі живлення; n – додатне ціле число (1, 2, 3...);

s – ковзання; k – ціле число, дорівнює 1, 3, 5 або 7.

Діагностика коротких замикань в обмотці статора на основі аналізу сигналу струму фази статора базується на визначенні частотних компонент, визначених згідно з виразом (2.5), які відбиваються у відповідних гармонічних складових сигналу струму фази.

2.1.4 Дефекти підшипників

Дефекти підшипників призводять до виникнення вібрацій електричної машини. Оскільки підшипники утримують ротор, їх вібрації призводять до коливань у повітряному проміжку між статором і ротором. Ці коливання зумовлюють виникнення гармонік у сигналі струму на частотах, які визначаються згідно з виразом [4]:

$$f_{brg} = \left[f_s \pm m f_{i,o} \right], \quad (2.6)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$; f_s – частота мережі живлення; $f_{i,o}$ – характерна вібраційна

частота, яка залежить від геометричних розмірів підшипника:

$$f_{i,o} = \frac{n}{2} f_v \left[1 \pm \frac{bd}{pd} \cos(\beta) \right], \quad (2.7)$$

де n – кількість кульок у підшипнику; f_v – швидкість обертання ротора, Гц;
 bd – діаметр кульки; pd – відстань між кульками; β – контактний кут кульки та доріжки кочення.

2.2 Теоретичні основи аналізу спектра сигналу потужності

Діагностика за аналізом спектра сигналу потужності дозволяє уникнути недоліків інших методів аналізу електричних сигналів – аналізу напруги живлення та струму [12, 13, 15, 21, 37].

Спектр сигналу споживаної трифазним двигуном потужності або електромагнітного моменту, на відміну від спектрів сигналів струмів або огибаючих струмів фаз статора, не тільки дозволяє виявити факт наявності відповідного пошкодження або дефекту, а також дозволяє оцінити ступінь пошкодження за значенням потужності відповідної гармонічної складової. Тобто використання спектра споживаної потужності або електромагнітного моменту дозволяє оцінити енергетичну складову пошкодження та прямо пов'язати його з додатковим руйнуванням складових частин електромеханічного перетворювача, яке викликане нагрівом та вібраціями під дією цієї складової потужності. Крім діагностики, це дозволяє також оцінити зниження енергоефективності роботи двигуна як електромеханічного перетворювача. Діагностика за аналізом спектра миттєвої потужності є більш надійною, стійкішою до впливу завад, та надає додаткові гармонічні складові як діагностичні ознаки [12, 13, 15, 21, 37].

Миттєва потужність фази обчислюється за виразом:

$$p(t) = u(t)i(t),$$

де $u(t)$ – фазна напруга; $i(t)$ – вхідний струм фази.

Для справного двигуна, що працює з постійною швидкістю та живиться від ідеальної мережі, фазна напруга $u(t)$, струм фази $i(t)$ та миттєва потужність фази

описуються наступними виразами [9, 37, 115, 116]:

$$\begin{aligned}u(t) &= \sqrt{2}U_1 \cos(\omega t); \\i(t) &= \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t - \varphi); \\p(t) &= u(t)i(t) = 2U_1I_1 \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi) = \\&= 2U_1I_1 \cos(\omega t) [\cos(\omega t) \cos(\varphi) + \sin(\omega t) \sin(\varphi)] = \\&= U_1I_1 \cos(\varphi) + U_1I_1 \cos(\varphi) \cos(2\omega t) + \\&\quad + U_1I_1 \sin(\varphi) \sin(2\omega t),\end{aligned}\tag{2.7}$$

де U_1, I_1 – діючі значення фазної напруги та струму, відповідно;
 $\omega = 2\pi f_s$ – кутова частота обертання ротора, де f_s – частота мережі живлення, φ – кут зсуву струму відносно напруги.

На відміну від спектрів напруги та струму, які мають лише основну гармоніку на частоті мереж живлення f_s , спектр потужності має постійну складову $U_1 I_1 \cos(\varphi)$ та основну гармоніку на подвійній частоті мережі живлення $2f_s$.

З метою всебічного аналізу технічного стану двигуна та уникнення помилок, доцільно додатково виконувати аналіз сумарної потужності трьох фаз АД, яка є доданком фазних потужностей:

$$p_{tot}(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t).$$

Сумарна потужність трьох фаз містить більше діагностичної інформації та дозволяє виявляти не тільки дефекти, що спричиняють модуляцію фазних електричних сигналів, але і дефекти, що виникають унаслідок несиметрії двигуна або мережі живлення, які призводять до несиметрії електричних сигналів за фазами. У випадку симетричного АД та мережі живлення, сигнал сумарної потужності трьох фаз містить лише постійну складову. Тому будь-яке пошкодження двигуна або несиметрія системи електропривода призводять до появи унікальних гармонік, що можна використати для точного визначення типу пошкодження.

2.2.1 Обрив стрижнів ротора

Як зазначалося у першому розділі, обрив стрижнів ротора призводить до модуляції струму статора. За аналогією з [5], модульований струм фази можна описати наступним виразом:

$$\begin{aligned} i_m(t) &= i(t) [1 + I_m \cos(2\pi f_{bb}t)] = \\ &= i(t) + \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 I_m \left[\cos(2\pi(f_s - f_{bb})t - \varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \cos(2\pi(f_s + f_{bb})t - \varphi) \right], \end{aligned} \quad (2.8)$$

де I_m – амплітуда моделюючої частоти; f_{bb} – частота модуляції, що дорівнює $2f_s$, де f_s – частота мережі живлення; s – ковзання.

Згідно з виразом (2.8), спектр струму фази, додатково до гармоніки основної частоти, містить її дві бічні гармоніки на частотах

$$f_s - f_{bb} \text{ та } f_s + f_{bb}.$$

Тоді модульована потужність фази буде описуватись наступним виразом:

$$\begin{aligned} p_m(t) &= i_m(t)u(t) = \\ &= P_0 + U_1 I_1 \cos(\varphi) \cos(2\omega t) + U_1 I_1 \sin(\varphi) \sin(2\omega t) + \\ &\quad \left(I_1 I_m U_1 \cos[2\pi(f_s - f_{bb})t - \varphi] + \right. \\ &\quad \left. + I_1 I_m U_1 \cos[2\pi(f_s + f_{bb})t - \varphi] \right) \cos(2\omega t). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Цей вираз демонструє, що спектр потужності фази містить, окрім постійної складової P_0 та двох бічних компонент основної гармоніки на частотах $2f_s - f_{bb}$ та $2f_s + f_{bb}$, додаткову складову на частоті модуляції f_{bb} , яка є додатковим діагностичним параметром.

У випадку симетричного АД відбувається компенсація гармонік, викликаних дефектами, і спектр сумарної потужності трьох фаз містить лише постійну складову та гармоніку на частоті $2f_s + f_{bb}$.

Будь-який вид несиметрії системи електропривода призводить до виникнення додаткових гармонік у спектрі сумарної потужності трьох фаз на частоті модуляції f_{bb} , бічної гармоніки на частоті $2f_s - f_{bb}$ та основної гармоніки потужності на подвійній частоті мережі живлення $2f_s$.

2.2.2 Дисбаланс ротора

У випадку дисбалансу ротора гармоніки струму частот f_r , що визначаються згідно з виразом (2.4), призводять до модуляції фазного струму:

$$i_{ecc}(t) = i(t) + \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \sum_{k=1}^K \left[I_{e1k} \cos(2\pi(f_s - kf_r)t - \alpha_{e1k} - \varphi) + I_{e2k} \cos(2\pi(f_s + kf_r)t - \alpha_{e2k} - \varphi) \right], \quad (2.10)$$

де f_s – частота мережі живлення; I_{e1k} , α_{e1k} – амплітуда та початковий кут фази частоти модуляції $f_s - kf_r$; I_{e2k} , α_{e2k} – амплітуда та початковий кут фази частоти модуляції $f_s + kf_r$.

У цьому випадку миттєва потужність фази АД, який має дисбаланс ротора, описується за наступним виразом:

$$\begin{aligned} p_{ecc}(t) &= i_{ecc}(t)u(t) = \\ &= P_0 + U_1 I_1 \cos(\varphi) \cos(2\omega t) + U_1 I_1 \sin(\varphi) \sin(2\omega t) + \\ &+ \sqrt{2} U_1 \cos(2\omega t) \sum_{k=1}^K \left[I_{e1k} \cos(2\pi(f_s - kf_r)t - \alpha_{e1k} - \varphi) + I_{e2k} \cos(2\pi(f_s + kf_r)t - \alpha_{e2k} - \varphi) \right], \end{aligned} \quad (2.11)$$

Дисбаланс ротора призводить до появи у спектрі потужності фаз бічних компонент відносно основної гармоніки на частотах $2f_s - kf_r$, та $2f_s + kf_r$, а також додаткової гармоніки на частоті kf_r .

2.2.3 Пошкодження обмоток статора

За аналогією до (2.8), модульований унаслідок наявності короткозамкнених витків струм фази статора можна описати наступним виразом:

$$\begin{aligned}
i_m(t) &= i(t)[1 + I_m \cos(2\pi f_{st}t - \varphi)] = \\
&= i(t) + \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 + I_m [\cos(2\pi f_{st}t - \varphi)],
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

де I_m – амплітуда моделюючої частоти; f_{st} – частоти модуляції, визначені згідно з (2.5); s – ковзання.

Згідно з виразом (2.12), спектр струму фази додатково до гармоніки основної частоти містить гармоніки на частотах f_{st} , що залежать від конструктивних особливостей машини і визначаються згідно з (2.5).

Тоді модульована потужність фази буде описуватись наступним виразом:

$$\begin{aligned}
p_m(t) &= i_m(t)u(t) = \\
&= P_0 + U_1 I_1 \cos(\varphi) \cos(2\omega t) + U_1 I_1 \sin(\varphi) \sin(2\omega t) + \\
&\quad + \frac{1}{2} I_1 I_m U_1 \cos(2\pi f_{st}t - \varphi) \cos(2\omega t).
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

Отже, наявність несиметрії обмоток статора, що виникає внаслідок короткозамкнених витків, призводить до виникнення у спектрі сигналу потужності гармонік на частотах модуляції f_{st} та їх комбінації з основною частотою мережі живлення.

2.2.4 Пошкодження підшипників

Вібрації, що виникають унаслідок дефектів підшипників, призводять до модуляції сигналу струму із частотою, що визначається за виразом (2.6). Тоді модульований унаслідок вібрацій підшипників струм можна визначити як:

$$i_{brg}(t) = i(t) + \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \sum_{k=1}^K \left[I_{b1k} \cos(2\pi(f_s - kf_{brg})t - \alpha_{b1k} - \varphi) + \right. \\
\left. + I_{b1k} \cos(2\pi(f_s + kf_{brg})t - \alpha_{b1k} - \varphi) \right],$$

де f_s – частота мережі живлення; I_{b1k} , α_{b1k} , – амплітуда та початковий кут фази частоти модуляції $f_s - kf_{brg}$; I_{b2k} , α_{b2k} , – амплітуда та початковий кут фази частоти модуляції $f_s + kf_{brg}$.

За аналогією до (2.11), миттєва потужність фази двигуна, який має

пошкодження підшипників, визначається за виразом:

$$\begin{aligned} p_{brg}(t) &= i_{brg}(t)u(t) = \\ &= P_0 + U_1 I_1 \cos(\varphi) \cos(2\omega t) + U_1 I_1 \sin(\varphi) \sin(2\omega t) + \\ &+ I_1 U_1 \cos(2\omega t) \sum_{k=1}^K \left[I_{b1k} \cos(2\pi(f_s - kf_{brg})t - \alpha_{b1k} - \varphi) + \right. \\ &\left. + I_{b2k} \cos(2\pi(f_s + kf_{brg})t - \alpha_{b2k} - \varphi) \right], \end{aligned}$$

Дефекти підшипників призводять до виникнення у спектрі потужності фаз АД бічних гармонік відносно основної із частотами $2f_s - kf_{brg}$, та $2f_s + kf_{brg}$, додаткової гармоніки на частоті kf_{brg} та гармонік, що виникають унаслідок комбінації частот f_{brg} із частотами, кратними до основної частоти мережі живлення.

2.2.5 Неякісність кріплень двигуна

За наявності неякісностей кріплення АД гармоніки повітряного проміжку викликають електрорушійні сили в обмотках статора та генерують гармоніки струму статора на певних частотах. На жаль, це є ті ж частоти, на яких справна машина продукує гармоніки струму статора. Пошкодження статора можуть впливати лише на амплітуду даних гармонік. Отже, питання визначення наявності неякісних кріплень двигуна на основі аналізу електричних сигналів на даний момент потребує подальшого дослідження.

2.3 Теоретичні основи аналізу сигналу напруги

На даний момент методи діагностики АД на основі аналізу сигналу напруги лише розвиваються і є вкрай ненадійними. Як дані для аналізу використовують спектр напруги нейтрального проводу або високочастотний несучий сигнал [20]. У першому випадку результат діагностики істотно залежить від якості напруги живлення, яка зазвичай не є ідеальною у низьковольтних мережах з АД. При використанні другого методу існує необхідність використання додаткового обладнання для створення несучого тестового сигналу. Обидва способи, незважаючи на їхню простоту, не є надійними та непридатні для коректного аналізу двигунів низьковольтних мереж з низькою якістю напруги живлення.

Розділ 3 ОЦІНЮВАННЯ ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ДІАГНОСТИКА ДЕФЕКТІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СИГНАЛУ СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ

3.1 Розробка методу аналізу енергетичних показників роботи асинхронних двигунів на основі аналізу експериментальних сигналів фазних струмів і напруг статора

Задля діагностики АД на основі сигналу споживаної потужності спочатку необхідно виміряти його робочі параметри. У більшості випадків у промислових умовах єдиними параметрами, які можна досить просто виміряти, зафіксувати та оцінити, є струми і напруги статора двигуна [70, 71, 81, 147, 148]. Решта параметрів, що характеризують енергетичну ефективність роботи електромеханічного обладнання, може бути визначена непрямими методами. У роботі запропоновано метод для аналізу енергетичних показників роботи асинхронних машин, що базується на основі аналізу експериментальних сигналів фазних струмів і напруг статора АД [19].

У розробленому методі запропоновано використовувати миттєві значення енергетичних параметрів АД, які в статичних режимах можна звести до загальноприйнятих. Розрахунок енергетичних параметрів виконується наступним чином.

Миттєва активна сумарна потужність трьох фаз визначається як сума миттєвих активних потужностей кожної фази (рис. 4.1):

$$p_I(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t), \quad (3.1)$$

де $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ – напруги фаз; $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – струми фаз.

Криві миттєвої реактивної та сумарної потужностей можуть бути обчислені при визначенні миттєвого коефіцієнта потужності $\cos(\varphi(t))$ (рис. 3.2), який розраховується шляхом попереднього переходу від трифазної системи струмів та напруг до ортогональної:

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \left(\frac{u_Y(t)}{u_X(t)} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{i_Y(t)}{i_X(t)} \right), \quad (3.2)$$

де $u_x(t) = \frac{2}{3}u_A(t) - \frac{1}{3}u_B(t) - \frac{1}{3}u_C(t),$

$$u_Y(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}u_B(t) - \frac{1}{\sqrt{3}}u_C(t),$$

$$i_x(t) = \frac{2}{3}i_A(t) - \frac{1}{3}i_B(t) - \frac{1}{3}i_C(t),$$

$$i_Y(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}i_B(t) - \frac{1}{\sqrt{3}}i_C(t), \quad \text{– проєкції сигналів напруг та струмів}$$

на осі X та Y ортогональної системи координат.

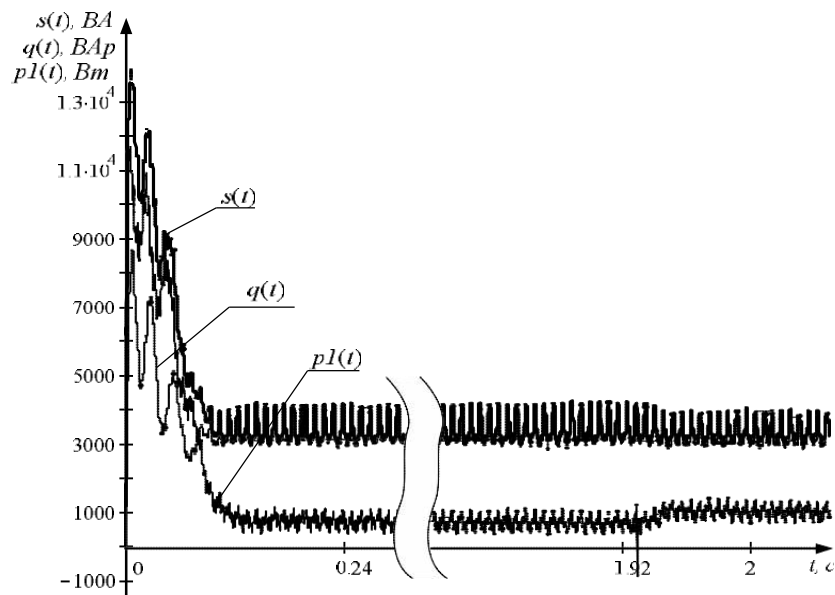


Рис. 3.1 – Миттєві значення активної, реактивної та повної потужностей

За відсутності несинусоїдності та несиметрії струмів та напруг $\cos(\varphi(t))$ є гладкою кривою, у статичному режимі – прямою. За наявності несинусоїдності та несиметрії мережі живлення, конструктивної несиметрії та існуючих нелінійностей АД у кривій коефіцієнта потужності з'являються коливання з подвійною і вище частотою мережі живлення, проте середнє значення за період напруги мережі живлення дорівнює середньому значенню коефіцієнта потужності за фазами АД.

Розрахунки наведено для АД типу MF-011-63 з параметрами $P_n=1,4$ кВт, $U_n=380$ В, $I_n=5,3$ А, $n_n=885$ об/хв при прямому пуску в режимі неробочого ходу та при накладі навантаження 20 % від номінального.

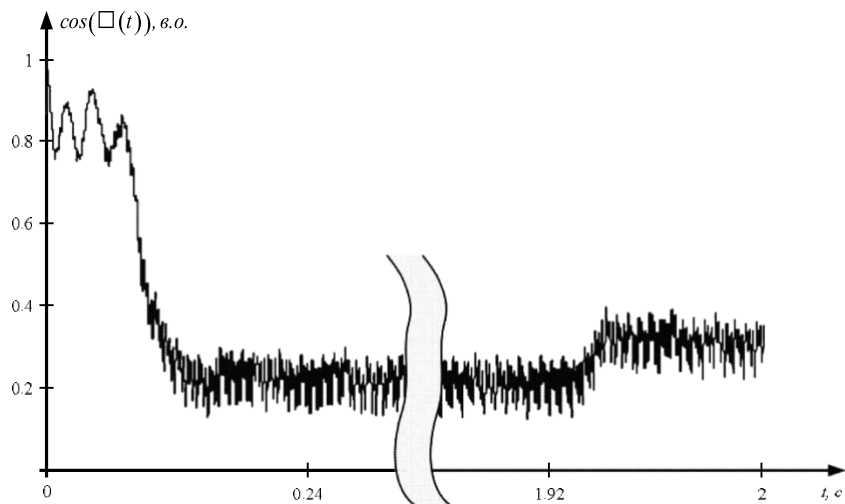


Рис. 3.2 – Миттєвий коефіцієнт потужності

Розрахунок електромагнітної потужності (рис. 3.3) можна виконувати двома способами: на основі споживаної потужності та на основі похідних потокозчеплень.

На основі аналізу споживаної потужності та втрат потужності в статорі:

$$p_{\mu}(t) = p_l(t) - \Delta p_{Ml}(t) - \Delta p_{Cm}(t), \quad (3.3)$$

де $p_l(t)$ – споживана потужність; $\Delta p_{Ml}(t)$ – втрати в міді статора;

$\Delta p_{Cm}(t)$ – втрати в сталі.

Втрати в міді статора визначаються за виразом:

$$\Delta p_{Ml}(t) = i_A(t)R_A + i_B(t)R_B + i_C(t)R_C. \quad (3.4)$$

На основі похідних потокозчеплень:

$$p_{\mu}(t) = \left[\frac{d\psi_A(t)}{dt} i_A(t) + \frac{d\psi_B(t)}{dt} i_B(t) + \frac{d\psi_C(t)}{dt} i_C(t) \right] - \Delta p_{Cm}(t), \quad (3.5)$$

$$\text{де } \frac{d\psi_A(t)}{dt} = u_A(t) - i_A(t)R_A; \quad \frac{d\psi_B(t)}{dt} = u_B(t) - i_B(t)R_B; \quad \frac{d\psi_C(t)}{dt} = u_C(t) - i_C(t)R_C$$

– похідні потокозчеплень фаз; A_R, B_R, C_R – активні опори фаз статора.

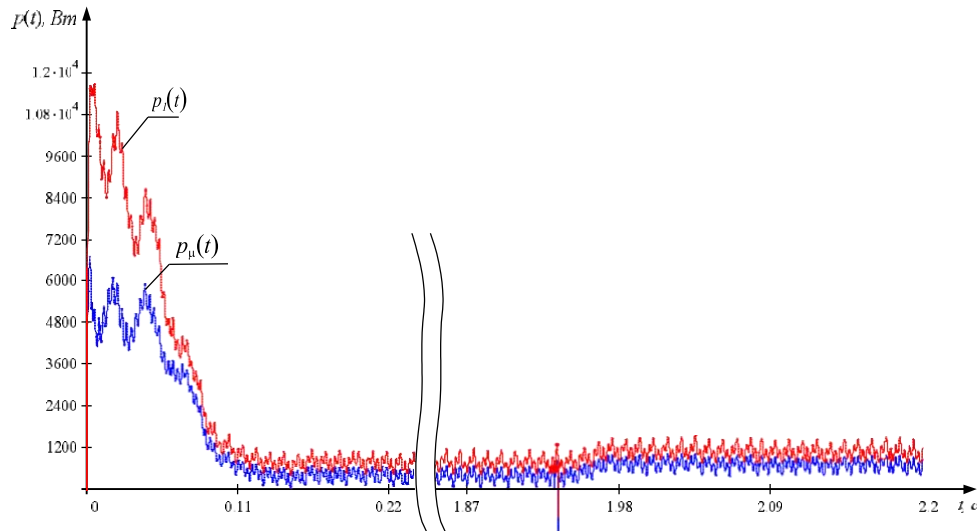


Рис. 3.3 – Криві активної споживаної ($p_1(t)$) та електромагнітної ($p_\mu(t)$) потужності

Втрати в сталі (рис.3.4) визначаються значенням магнітного потоку в повітряному проміжку АД, або його аналогу – ЕРС у повітряному проміжку:

$$\Delta p_{Cm}(t) = e_s^2(t) [k_{ec} f_1^2 + k_z f_1], \quad (3.6)$$

де k_{dc} та k_z – коефіцієнти втрат на вихрові струми та перемагнічування, відповідно; $e_s(t) = \sqrt{e_A^2(t) + e_B^2(t) + e_C^2(t)}$ – миттєвий модуль вектора ЕРС.

ЕРС у повітряному проміжку визначається як:

$$e_A(t) = \frac{d\psi_A(t)}{dt} - L_A \frac{di_A(t)}{dt}; \quad e_B(t) = \frac{d\psi_B(t)}{dt} - L_B \frac{di_B(t)}{dt};$$

$$e_C(t) = \frac{d\psi_C(t)}{dt} - L_C \frac{di_C(t)}{dt},$$

де L_A, L_B, L_C – індуктивності розсіювання фаз статора.

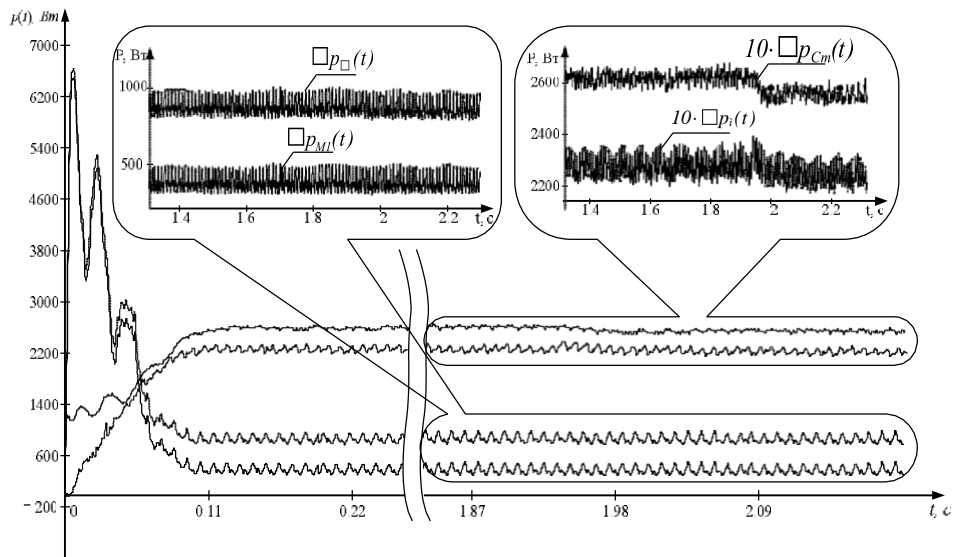


Рис. 3.4 – Миттєві втрати в міді $\Delta p_{M1}(t)$, у сталі $\Delta p_{Cm}(t)$, механічні $\Delta p_m(t)$ та сумарні $\Delta p_{\Sigma}(t)$

Розрахунок ЕРС у повітряному проміжку вимагає розрахунку похідних струмів, а також наявності інформації про значення індуктивностей розсіювання фаз статора.

При відомих активних опорах фаз статора відносно просто можна отримати електромагнітний момент, що спостерігається. Його відмінність від реального обумовлена миттєвими значеннями втрат у сталі. Слід зауважити, що миттєві значення кривих електромагнітного моменту, отриманого на основі миттєвих потужностей:

$$m_{\mu 1}(t) = \frac{P_{\mu}(t)}{\omega_0}, \quad (3.7)$$

і моменту, отриманого на основі похідних потокозчеплень:

$$m_{\mu 2}(t) = \frac{P}{\sqrt{3}} \left[\begin{array}{l} (\psi_C(t) - \psi_B(t)) \dot{i}_A(t) + \\ + (\psi_A(t) - \psi_C(t)) \dot{i}_B(t) + \\ + (\psi_B(t) - \psi_A(t)) \dot{i}_C(t) \end{array} \right], \quad (3.8)$$

вірізняються, у той час як їхні середні значення за період збігаються (рис. 3.5). Отримання кривої моменту за споживаною потужністю і потужностями втрат можливе в будь-який момент часу.

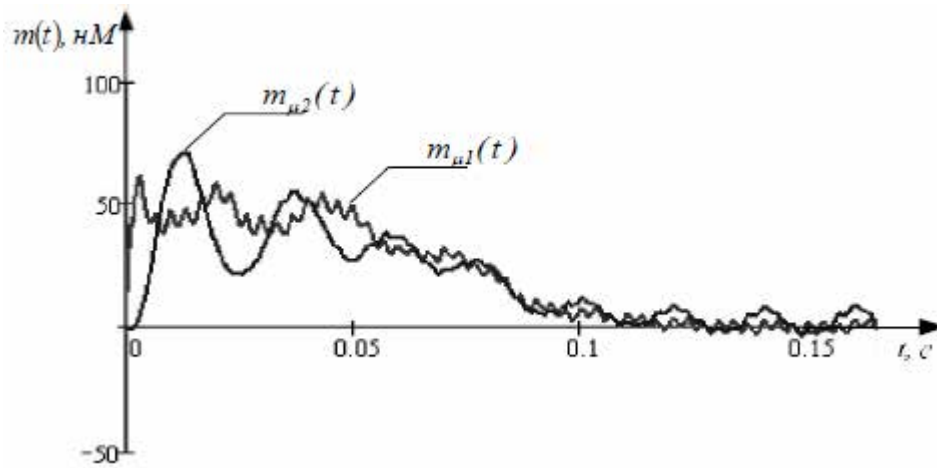


Рис. 3.5 – Криві електромагнітного моменту

$m_{\mu 1}(t)$ – момент, отриманий на основі миттєвих потужностей;

$m_{\mu 2}(t)$ – момент, отриманий на основі похідних потокозчеплень.

Використання розрахованого електромагнітного моменту дозволяє непрямым методом розрахувати кутову швидкість обертання двигуна, при цьому момент навантаження розраховується як середнє значення електромагнітного моменту за період в усталеному режимі:

$$\omega(t) = \frac{1}{J} \int (m_{\mu 1}(t) - M_C) dt, \quad (3.9)$$

де J – момент інерції; M_C – момент навантаження.

Визначення миттєвих значень швидкості дозволяє розрахувати момент і потужність на валу АД:

$$m_B(t) = \frac{P_{\mu}(t) - \Delta p_m(t)}{\omega(t)}, \quad (3.10)$$

де $\Delta p_m(t)$ – миттєві механічні втрати.

При непряму розрахунку швидкості обертання АД метод з використанням електромагнітного моменту, розрахованого за струмами і потокозчепленнями, дає кращий збіг з експериментальною кривою за критерієм середньоквадратичного відхилення (рис. 3.6).

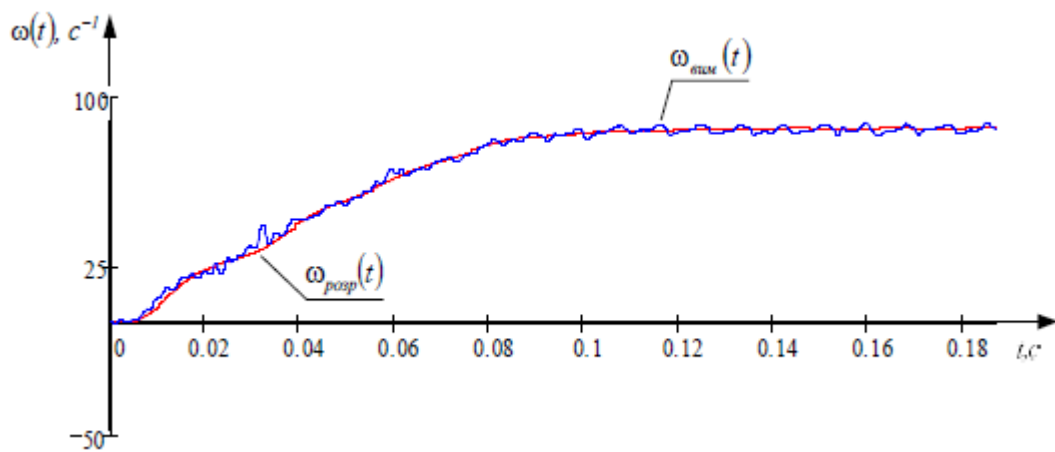


Рис. 3.6 – Криві швидкості, розраховані непрямым методом ($\omega_{\text{розра}}(t)$), та отримані експериментально ($\omega_{\text{вим}}(t)$)

Урахування миттєвих втрат у сталі підвищує точність розрахунку електромагнітного моменту, моменту на валу та енергетичних параметрів, що підтверджує збіг розрахункової та експериментальної кривих швидкості АД.

Іншим аспектом недосконалості існуючої системи оцінювання енергетичних характеристик електромеханічного обладнання є те, що ККД двигуна, розрахований за стандартними методами у статичних режимах, не дозволяє враховувати різноспрямованість потоків енергії під час пуско-гальмівних режимів. Тому запропоновано розраховувати миттєві значення ККД електричної машини в цілому, а також виконувати декомпозицію даного показника на ККД статора і ККД ротора, згідно з конструктивною структурою АД (рис. 3.7). Для ККД статора як споживану потужність беруть потужність, що споживається з мережі $p_1(t)$, а як корисну – електромагнітну потужність $p_{\mu}(t)$, яка передається через повітряний проміжок від статора до ротора. Для розрахунку ККД ротора як споживана потужність використовується $p_{\mu l}(t)$, а як корисна – потужність на валу $p_2(t)$. Декомпозиція ККД за статором і ротором дозволяє виявити джерела погіршення енергетичних показників АД та локалізувати місце розташування дефекту.

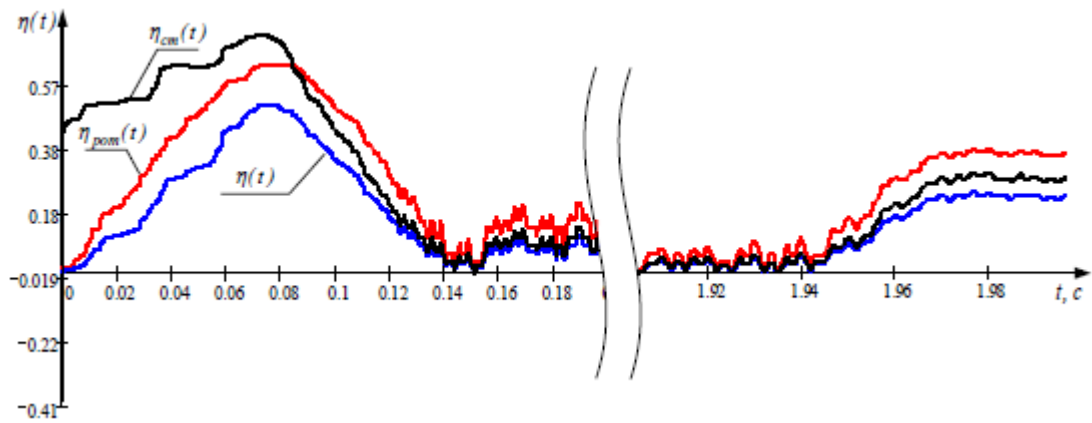


Рис. 3.7 – Миттєвий ККД статора, ротора та електричної машини в цілому

Запропонований метод дозволяє оцінити енергетичні характеристики АД в умовах неякісності напруги живлення, конструктивної та параметричної несиметрії електричної машини і зміни режимів її роботи, що може бути використано при оцінюванні її поточного технічного стану та діагностиці. Перевагою даного методу є те, що він дозволяє витратити менше часу на аналіз даних порівняно з методом, що передбачає розкладання сигналів струмів і напруг на гармонічні складові.

Послідовність визначення енергетичних параметрів АД наведено на рис. 3.8. Таким чином, на основі вимірних сигналів струмів та напруг з використанням паспортних та вимірних даних АД (таких як активні опори, індуктивність розсіювання обмоток фаз статора, момент інерції), розраховуються параметри АД, які в подальшому використовуються для визначення діагностичних показників. До розрахованих параметрів належать миттєві значення електромагнітного моменту, моменту на валу, коефіцієнта потужності, миттєвої потужності. На основі розрахованого електромагнітного моменту та механічної характеристики двигуна непрямым методом розраховується швидкість обертання АД, що дозволяє розрахувати миттєвий момент і потужність на валу АД. Для врахування різноспрямованості потоків енергії в електромеханічній системі під час пуско-гальмівних режимів запропоновано розрахунок миттєвого ККД усієї машини в цілому, а також декомпозицію даного показника на ККД статора і ККД ротора відповідно до конструктивної структури АД. Запропонована методика дозволяє оцінювати енергетичні характеристики АД у складі електромеханічної системи в умовах несинусоїдності та несиметрії напруги живлення, конструктивної та

параметричної несиметрії електричної машини і зміни режимів її роботи. Перевага розробленого методу полягає в тому, що він потребує менше часу на аналіз даних порівняно з методами, що передбачають розклад сигналів струму та напруги на гармонійні складові, що є актуальним у системах моніторингу поточного технічного стану електромеханічного обладнання.

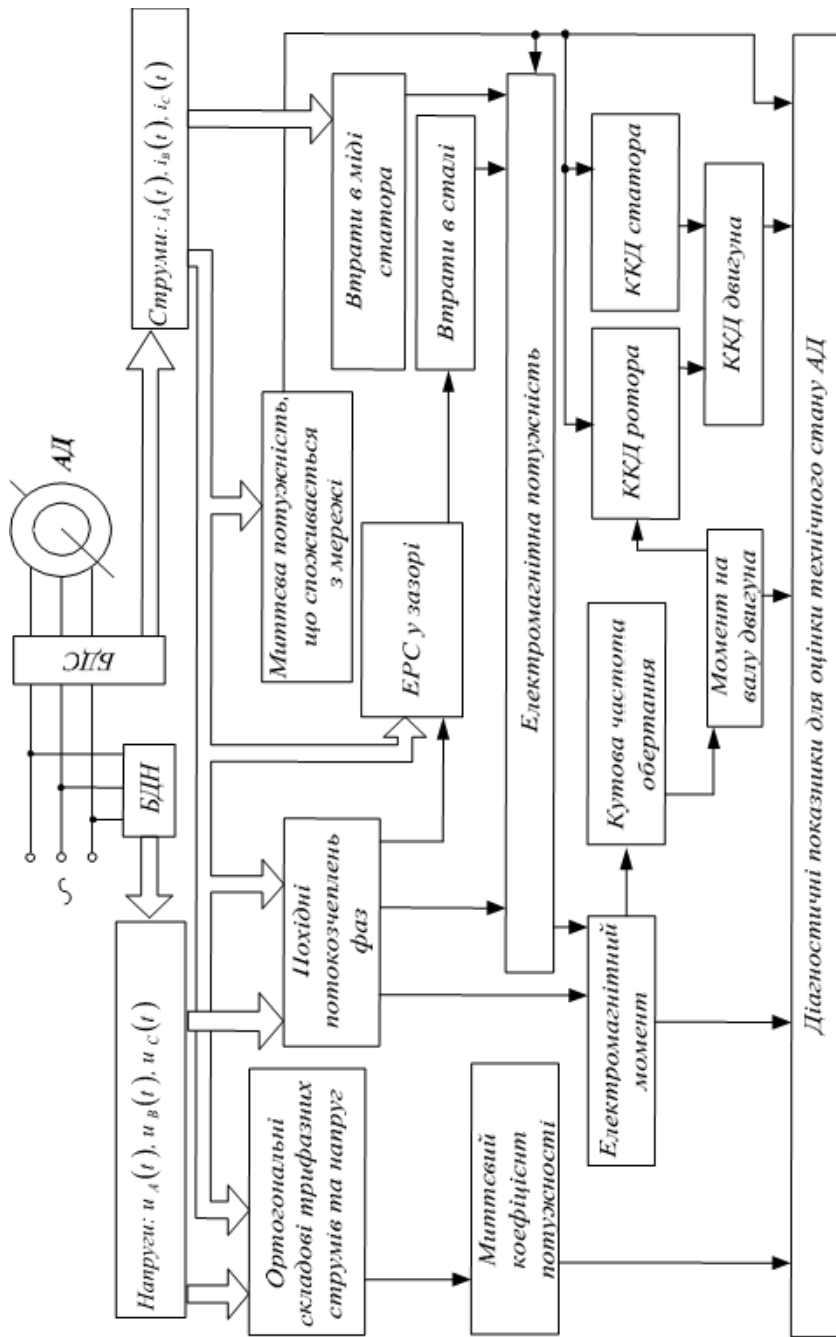


Рис. 3.8 – Процедура визначення енергетичних параметрів АД

3.2 Розробка критеріїв діагностики асинхронних двигунів за аналізом сигналу потужності

3.2.1 Обґрунтування діагностичних показників, основаних на аналізі сигналу

споживаної потужності

Як зазначалося у роботах [119–121, 123, 139], діагностику поточного стану електричної машини, а також прогноз залишкового ресурсу її роботи та необхідності проведення ремонту, можливо здійснювати за аналізом процесу перетворення електричної енергії машиною. Однією з характеристик, що відображає енергетичні процеси в АД, є споживана ним потужність. Як зазначалось у першому розділі, оцінювання стану АД за аналізом сигналу споживаної потужності є перспективною, оскільки не вимагає великих апаратних ресурсів для реалізації: необхідно використовувати датчики струмів та напруги, решта розрахунків виконуються непрямими методами; та не потребує виведення устаткування з виробничого процесу, тобто може використовуватись як система моніторингу поточного стану. У розділі 2 отримано математичні вирази для визначення частот спектра сигналу потужності, викликаних найбільш розповсюдженими дефектами. Однак за умов неякісного живлення, електричних завад та наявності одночасно кількох дефектів можуть виникати складнощі при діагностиці за даними частотами. Тому існує необхідність формулювання додаткових діагностичних ознак на основі аналізу сигналу потужності для підвищення точності діагностики.

Істотно на форму і характеристики сигналу споживаної потужності впливає якість напруги мережі живлення, що оцінюється за допомогою нормованих показників якості електричної енергії [99, 66, 143]. Дослідженню взаємного впливу якості електричної енергії та електромеханічного перетворювача з неякісними параметрами в реальних умовах експлуатації на даний момент не приділено достатньо уваги. Таким чином, існує необхідність аналізу комплексного впливу неякісних параметрів мережі живлення та неякісностей і дефектів електромеханічного споживача на зміну форми і характеристик сигналу споживаної потужності. З цією метою доцільним є формування показників, оснований на аналізі зміни характеристик і форми сигналу споживаної потужності трьох фаз для можливості виявлення діагностичних ознак дефектів АД у сигналі споживаної потужності.

Як зазначалось у розділі 1, діагностичні показники аналізу технічного стану

АД повинні набувати значень у чітко визначеному діапазоні та надавати інформацію про причину зміни форми сигналу споживаної потужності та ступінь погіршення загального технічного стану машини. При формулюванні діагностичних показників також потрібно або враховувати значення поточного навантаження, або оперувати нормованими значеннями контрольованого параметра (наприклад, номінальним значенням параметра).

У роботах [2, 14, 67, 72, 119] зазначалось, що миттєва потужність

– це фізична величина, що відображає процеси генерації та рекуперації енергії між джерелом і споживачем. Характеристики, що відображають особливості режимів роботи та технічного стану обладнання в системі «асинхронний двигун – мережа живлення», мають бути виявлені за аналізом складових миттєвої потужності: середнього значення, змінних складових та ін. При цьому, в основі формування показників, оснований на аналізі миттєвої потужності, має бути чітка фізична інтерпретація як процесу, так і його характеристик.

Базовий аналіз доцільно проводити за спектром сигналу потужності – сумарної трифазної та окремо за фазами двигуна.

Відомо, що за ідеальних параметрів мережі та двигуна, сигнал споживаної потужності трьох фаз являє собою пряму лінію. Наявність значної змінної складової потужності зазвичай спричинена дефектом або пошкодженням машини, або технологічного навантаження, і свідчить про необхідність додаткового аналізу з метою виявлення джерела її виникнення. Аналіз експериментальних даних показав, що робота АД за наявності змінної складової потужності більшої за 10 % від номінального значення потужності свідчить про незадовільний технічний стан двигуна. При цьому визначення граничних меж амплітуди змінної складової потужності необхідно виконувати залежно від потужності двигуна та вимог до роботи технологічного механізму. Для врахування цього пропонується коефіцієнт вищих гармонік потужності:

$$K_{Psz} = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{N-1} P_v^2}}{P_n}, \quad (3.11)$$

де P_n – номінальна потужність; P_v – амплітуда v -ї гармоніки потужності.

В ідеальному випадку вищих гармонік у сигналі споживаної потужності трьох фаз не існує, коефіцієнт дорівнює нулю. Коефіцієнт ураховує значення змінної складової потужності відносно номінального значення, що дозволяє оцінювати доцільність подальшої роботи устаткування за поточних експлуатаційних умов.

Оскільки коливання від дефектів різного роду можуть проявлятися в спектрі не лише при частотах, кратних основній частоті мережі живлення, а й у вигляді бокових гармонік, розташованих симетрично кратній гармоніці [106], частотний спектр трифазної миттєвої потужності було розбито на кілька зон, що охоплюють усі можливі для аналізу частоти:

- 0–5 Гц – зона постійної складової;
- 6–45 Гц – зона низькочастотної складової;
- 46–55 Гц – зона основної частоти мережі живлення;
- 56–95 Гц – суміжна зона бокових частот основної та подвійної частоти мережі живлення;
- 96–105 Гц – зона подвійної частоти мережі живлення.

Далі, за аналогією: 106–195 Гц, 206–295 Гц, >306 Гц – суміжні зони; 196–205 Гц, 296–305 Гц, 396–405 Гц, 496–505 Гц, 596–605 Гц – зони гармонік, кратних подвійній частоті мережі живлення. Для оцінювання внеску гармонік певних частот в інтегральне значення вищих гармонік потужності запропоновано використовувати відношення квадрата ефективного значення гармонік певного діапазону до квадрата ефективного значення всіх вищих гармонік:

$$K_{\text{гарм}(N_1 \div N_2)} = \frac{\sum_{k_1=N_1}^{N_2} P_{k_1}^2}{\sum_{k=1}^{N-1} P_k^2}, \quad (3.12)$$

де N – загальна кількість гармонік спектра; N_1, N_2 – відповідно, початкове і кінцеве значення частот гармонік аналізованого проміжку.

Даний коефіцієнт дозволяє оцінювати внесок вищих гармонік певного частотного діапазону, характерних для наявності певного виду дефекту, до

загального значення вищих гармонік потужності.

Як додаткові діагностичні ознаки можна використовувати наступні коефіцієнти.

Коефіцієнт потужності полігармонічних сигналів струму та напруги можна обчислити на основі гармонічних складових сигналу за виразом:

$$K_{\varphi} = P_0 / \sqrt{P_0^2 + \sum_{k=1}^{K-1} Q_k^2}, \quad (3.13)$$

де P_0 – постійна складова сигналу потужності;
 $Q_k = \sum_{k=0}^{K-1} (Ia_m Ub_n - Ib_m Ua_n)$ – реактивна потужність k -ї гармоніки,

обчислюється для гармонік потужності порядку $k = m \pm n$, де m, n – порядкові номери гармонік струму та потужності відповідно. За наявності несинусоїдності сигналів струмів та напруг у зв'язку з неякісним живленням або наявністю дефектів чи пошкоджень двигуна, коефіцієнт K_{φ} буде змінюватися внаслідок появи додаткових гармонічних складових сигналів. Таким чином, за зміною даного коефіцієнта можна робити висновок про погіршення якості споживання потужності та можливість подальшої роботи АД у даному режимі, що може бути застосовано для узагальненого оцінювання технічного стану.

Для оцінювання інтегральної несиметрії АД, яка може бути спричинена як неякісністю живлення, так і дефектами самої машини, запропоновано використовувати середньозважені показники за амплітудою та фазою гармонік споживаної потужності за фазами:

$$P_{\varphi i_v} = \frac{P_{i_v}}{Pa_v + Pb_v + Pc_v}; \quad (3.14)$$

$$\varphi_{\varphi i_v} = \frac{\varphi_{i_v}}{\varphi a_v + (\varphi b_v + 2\pi/3) + (\varphi c_v + 4\pi/3)}. \quad (3.15)$$

Вирази являють собою відношення амплітуди v -ї гармоніки або фази потужності однієї з фаз до сумарного значення амплітуд гармонік або фаз сумарної потужності трьох фаз того ж порядку. В ідеальному випадку коефіцієнт за всіма фазами дорівнює 1/3 [92]. Найбільш зручно проводити аналіз при $v=2$, оскільки

сигнали потужностей фаз двигуна коливаються з подвійною частотою мережі живлення, тобто дана гармоніка завжди присутня у сигналі, і на її значення впливає наявність вищих гармонік, спричинених різного роду неякісностями.

З метою всебічного аналізу характеристик електричних сигналів, додатково до запропонованих, розраховано сформульовані в роботах [139] коефіцієнти ефективності використання споживаної енергії, що характеризують машину як у цілому, так і пофазно [141]:

– узагальнений коефіцієнт, що характеризує неякісність перетворення в цілому:

$$\varepsilon_p = \frac{P_0}{P_e} 100\%,$$

– коефіцієнт, що характеризує неякісність перетворення пофазно:

$$\varepsilon_{pi} = \frac{P_{0i}}{P_e} 100\%,$$

де $i = A, B, C$ – фаза АД; $P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_i^{A,B,C} p_i(t) dt$ – середнє значення потужності трьох фаз;

$P_{0i} = \frac{1}{T} \int_0^T p_i(t) dt$ – середнє значення потужності фази;

$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t))^2 dt}$ – еквівалентне значення потужності двигуна.

3.2.2 Дослідження інформативності сформованих на основі аналізу сигналу потужності показників та показників якості електричної енергії для діагностики асинхронних двигунів

Як зазначалось у попередніх розділах, аналіз характерних особливостей, а також частотний аналіз спектра сигналу споживаної потужності за наявності дефектів та неякісностей АД, можуть бути використані для процедур діагностики та оцінювання поточного технічного стану АД. Проте зміна технічного стану АД при розвитку різних видів дефектів по-різному відображається на значеннях сформованих показників. Тобто показник може бути більш інформативним для виявлення одних видів дефектів і неінформативним для визначення інших. Інформативність показника для виявлення певного виду пошкодження або дефекту

полягає в інтенсивності зміни його значення при розвитку дефекту.

Для проведення аналізу інформативності сформульованих показників та показників якості електричної енергії для діагностики АД, за допомогою розроблених математичних моделей, отримано миттєві значення вихідних сигналів, на основі яких виконується подальший аналіз, а саме: отримано миттєві значення струмів, напруг та потужностей для різного ступеня пошкодження або розвитку неякісностей АД. Дослідження виконувались для моделі двополюсного АД АО90S–4 (1,1 кВт, 1410 об/хв; 2,8 А), для випадків роботи в режимі неробочого ходу та значень відносного моменту навантаження рівним $0,5M_n$, M_n , $1,5M_n$.

З метою аналізу впливу якості параметрів напруги мережі живлення на непошкоджений двигун з використанням розроблених математичних моделей були досліджені наступні режими:

- живлення від синусоїдної симетричної мережі;
- живлення від несинусоїдної симетричної мережі (існує 3-тя гармоніка);
- живлення від несинусоїдної симетричної мережі (існують 3-тя і 5-та гармоніки);
- живлення від несинусоїдної несиметричної мережі (існують 3-тя і 5-та гармоніки, амплітуди гармонік вирізняються за фазами).

Моделювання виконувалось для випадку з'єднання обмоток АД типу «зірка з нулем». Задля спрощення аналізу, решта дослідів виконувались з урахуванням припущення, що двигун живиться від синусоїдної мережі. Так, для дослідження впливу якості кріплень АД до основи на електричні сигнали була змодельована робота АД при жорсткому кріпленні до основи та при послабленні жорсткості з однаковими і різними коефіцієнтами жорсткості в місцях кріплень. Вплив дисбалансу досліджувався для випадків наявності від 10 до 50 відсоткового динамічного дисбалансу та за наявності одночасно динамічного та статичного дисбалансу. Вплив несиметрії обмоток статора досліджувався за наявності несиметрії від 10 до 40 %. Вплив наявності обривів стрижнів ротора було досліджено для випадків обриву від одного до трьох стрижнів, розташованих або

поруч, або в різних місцях обмотки ротора. Моделювання роботи АД за наявності виткових замикань однієї з фаз виконувалось для наявності замикань 10–70 % витків обмотки (табл. 3.1). У таблиці взято наступні позначення: U_1, U_3, U_5 – амплітуди відповідно першої, третьої та п’ятої гармонік напруги за умови рівності їх значень за фазами; c_1, c_2, c_b – коефіцієнти жорсткості опор відповідно лівої, правої та базове значення, що відповідає цілковитій жорсткості ($c_b = 500000$); ε – коефіцієнт відносної несиметрії обмотки статора; w – кількість короткозамкнених витків.

Таблиця 3.1 – Ступінь наявного пошкодження в математичних моделях АД

| Вид дефекту | Номер досліджу | | | |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Неякісність напруги живлення | Симетрична синусоїдна мережа | $U_3 = 0,3U_1$ | $U_3 = 0,3U_1$ $U_5 = 0,1U_1$ | $U_3 = 0,3U_1$ $U_{a5} = 0,2U_1$ $U_{b5} = 0,2U_1$ $U_{c5} = 0,1U_1$ |
| Неякісність кріплення | $c_1 = c_b,$ $c_2 = 0,9c_b$ | $c_1 = 0,5c_b$ $c_2 = 0,45c_b$ | $c_1 = 0,05c_b$ $c_2 = 0,045c_b$ | $c_1 = 0,005c_b$ $c_2 = 0,0045c_b$ |
| Дисбаланс ротора | Динамічний, 10 % | Динамічний, 20 % | Динамічний, 50 % | Динамічний, 50 %, статичний 10 % |

Продовження таблиці 3.1

| Несиметрія обмоток статора | $\varepsilon = 0,9$ | $\varepsilon = 0,8$ | $\varepsilon = 0,65$ | $\varepsilon = 0,4$ |
|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|
| Обрив стрижнів ротора | Обрив одного стрижня | Обрив двох не поруч розташованих стрижнів | Обрив трьох не поруч розташованих стрижнів | Обрив двох поруч розташованих стрижнів |
| Виткові замикання обмотки статора | $w = 10 \%$ | $w = 20 \%$ | $w = 50 \%$ | $w = 70 \%$ |

На основі отриманих даних струмів, напруг та потужностей було отримано спектри сигналів струмів і потужностей фаз та сумарної споживаної потужності трьох фаз, а також розраховано сформульовані діагностичні показники та досліджено їх інформативність для діагностики різних видів дефектів та можливості використання при моніторингу поточного стану АД.

Середньозважені показники потужності за фазами

Несиметричність мережі живлення відображається у сигналі потужності. Тому досліджуваний коефіцієнт буде чутливим до наявності несиметрії мережі живлення, проте за несинусоїдного, але симетричного живлення значення коефіцієнта за фазами залишаться однаковими.

Неякісність кріплень АД до основи неістотно впливає на зміну електромагнітних параметрів АД за фазами, тому розбіжності даного коефіцієнта сягають не більше 1–2 %, тобто він не є інформативним для діагностики даного роду дефектів.

Як було зазначено вище, дисбаланс ротора впливає на формування магнітного потоку в повітряному проміжку, а отже, і на значення струмів за фазами. Тобто за наявності даного пошкодження АД також порушується симетричність параметрів АД за фазами, що може використовуватись як інформативна ознака при діагностиці АД. За наявності несиметрії обмоток статора або виткових замикань симетричність параметрів машини порушується істотно, що призводить до значної різниці досліджуваних коефіцієнтів за фазами.

При роботі двигуна, що має обриви стрижнів ротора, при навантаженнях, менших за номінальне, не спостерігається значної різниці даних показників за фазами. Однак при збільшенні навантаження показники значно погіршуються.

Отже, даний коефіцієнт є інформативним для діагностики несиметричних режимів роботи АД, таких як несиметричність мережі живлення, несиметричність обмоток статора внаслідок наявності обривів чи конструктивної несиметрії обмоток, а також наявності дисбалансу ротора, що викликає порушення електромагнітної симетрії параметрів АД за фазами.

Коефіцієнт потужності полігармонічних сигналів K_{ϕ}

За наявності пошкоджень значення коефіцієнта потужності полігармонічних сигналів у режимі неробочого ходу більше, порівняно з коефіцієнтом за відсутності пошкоджень. Це пояснюється тим, що за наявності пошкоджень частина споживаної енергії йде на додаткові втрати. При цьому, під час роботи під навантаженням за наявності пошкодження коефіцієнт потужності полігармонічних сигналів є меншим за коефіцієнт потужності ідеалізованого АД, оскільки при

однаковій споживаній потужності пошкоджена машина має більші додаткові втрати.

Найбільш інформативною зміна значення коефіцієнта потужності полігармонічних сигналів є за наявності несиметрій або виткових замикань обмотки статора – значення коефіцієнта змінюється в межах 20 % при розвитку дефектів від 10 до 70 % замикань обмотки однієї з фаз та зміні відносної несиметрії від 0,9 до 0,4 у. о. У даних випадках під час розвитку неякісності коефіцієнт істотно змінюється як у режимі неробочого ходу, так і за роботи під навантаженням.

При обриві стрижнів ротора досліджуваний коефіцієнт істотно змінюється при роботі під навантаженням (у межах 10 % за номінального навантаження при обриві від 8 до 25 % стрижнів ротора). При цьому в режимі неробочого ходу залишається майже незмінним.

У решті випадків зміна коефіцієнта при розвитку пошкодження є незначною, тобто коефіцієнт не є досить інформативним для діагностики цих пошкоджень.

Таким чином, коефіцієнт потужності полігармонічних сигналів можна використовувати при оцінюванні поточного технічного стану АД для діагностики пошкоджень обмоток ротора та статора АД: у випадку наявності даних типів пошкоджень істотно зменшується значення коефіцієнта при роботі за номінального навантаження та в режимі неробочого ходу. Подальші випробування в режимі неробочого ходу дають можливість визначити причину погіршення стану – неякісність ротора (коефіцієнт у режимі неробочого ходу мало відрізняється від коефіцієнта для двигуна без пошкоджень), чи статора (коефіцієнт має значно більше значення в режимі неробочого ходу).

До даної групи коефіцієнтів віднесено коефіцієнти несинусоїдності (K_{Inc} , K_{Pnc}) та несиметрії (K_{Iac} , K_{Pac}) струмів і потужностей.

Оскільки дослідження (окрім випадку живлення ідеального двигуна від неякісного джерела) виконувались при допущенні, що досліджувані моделі двигунів живляться від синусоїдного симетричного джерела, нормовані показники якості електричної енергії для напруги не враховувались. Оскільки сигнал потужності формують сигнали струму та напруги, а в даному випадку – напруга ідеальна, існує сенс розглядати показники лише для сигналів

струму.

При живленні непошкодженої машини від несинусоїдної або несиметричної мережі, несинусоїдними або несиметричними також будуть і струми машини.

Зміна якості кріплень машини до основи мало впливає на формування вищих гармонік у сигналі струму, та аналізований коефіцієнт для проведених дослідів не перевищував 1 % при дослідах для АД з абсолютно жорстким кріпленням і значенням жорсткості кріплення на рівні 0,5 % від початкового.

При дослідженні різних видів дисбалансу встановлено, що найбільш істотний внесок у формування вищих гармонік сигналу струму здійснює статичний та змішаний дисбаланс. Так, за наявності 10 % статичного дисбалансу значення коефіцієнта також змінюється в межах 10 % у режимі неробочого ходу. У той же час за наявності до 20 % динамічного дисбалансу значення коефіцієнта зменшується менш ніж на 1 %.

Наявність виткових замикань та несиметрії обмоток статора найбільшу несинусоїдність спричиняють у фазі, що має несиметрію – до 30 %, порівняно з несиметрією до 10 % для інших фаз.

Обрив стрижнів ротора призводить до збільшення несинусоїдності струмів при збільшенні навантаження. Проте для діагностики даного виду пошкодження коефіцієнт не є інформативним, оскільки при обриві навіть 25 % стрижнів його значення в режимі неробочого ходу змінюється на соті частки відсотка, а за номінального навантаження – до 2 %.

При неякісному кріпленні з основою, дисбалансі ротора, неякісному живленні несиметрія струмів є неістотною (менше 1 %). При обриві стрижнів ротора несиметрія струмів дещо збільшується (2–5 %). Найбільш істотною несиметрією струмів є за наявності виткових замикань та несиметрії обмоток, і може сягати 100 % за відсутності однієї з фаз (замкнено близько 100 % витків обмотки, у реальних умовах даний режим неможливий).

Таким чином, на основі аналізу сигналів, отриманих на математичних моделях АД з моделюванням найбільш поширених видів дефектів, проведено дослідження інформативності сформульованих у роботі діагностичних показників. За результатами аналізу можна зробити висновок, що досліджувані коефіцієнти

відображують процеси, що відбуваються за наявності тих чи інших видів пошкоджень, проте не завжди можна за значенням коефіцієнта точно визначити тип пошкодження, що має двигун. Таким чином, існує необхідність сукупного аналізу спектрів сигналу потужності та додаткових показників з метою формування правил для діагностики конкретних типів пошкоджень, що має машина.

3.3 Розробка методу діагностики АД на основі аналізу сигналу потужності

3.3.1 Розробка правил (семантичних виразів) для процедури оцінювання поточного технічного стану асинхронних двигунів

Визначені за вищенаведеною процедурою (рис. 3.8.) характеристики АД є вихідними параметрами для розрахунку обґрунтованих у попередньому розділі діагностичних показників. Результати аналізу показали чутливість запропонованих коефіцієнтів до зміни режимів роботи АД унаслідок наявності або розвитку дефектів. Для використання даних коефіцієнтів у системах оцінювання поточного технічного стану АД необхідно сформулювати на їх основі правила, за якими система оцінювання поточного технічного стану АД могла б надавати висновок про режим його роботи. Правила сформовано на основі відповідності значень сформованих показників значенням віброшвидкості для аналогічних режимів роботи обладнання, згідно з вимогами ГОСТ ИСО 10816-1-97 [50]:

- «відмінний» – обладнання працює в ідеальному режимі при синусоїдному симетричному живленні, параметри АД симетричні, немає пошкоджень, перетворює енергію без перевищення паспортних втрат; даний режим загалом відповідає двигунам без пошкоджень та дефектів за ідеальних умов експлуатації;
- «добрий» – обладнання працює в режимі, який відповідає встановленим допустимим нормам параметрів експлуатації, сукупний стан параметрів мережі живлення та наявних дефектів або неякісностей АД суттєво не впливає на

якість виконання технологічних операцій та погіршення технічного стану обладнання, машина вважається придатною для тривалої експлуатації;

- «задовільний» – обладнання спроможне виконувати технологічні операції із заданими вимогами з достатньою надійністю, однак значно погіршуються експлуатаційні показники внаслідок виникнення додаткових втрат, викликаних наявністю дефектів або неякісностей, що призводить до більш інтенсивного зменшення ресурсу АД, чинить негативний вплив на навколишнє середовище та обслуговуючий персонал. Допускається робота машини в даному режимі певний час, до виникнення сприятливої можливості для виконання ремонтних робіт;
- «аварійний» – обладнання здатне виконувати технологічні операції, проте не надається гарантія якості їх виконання та надійності функціонування обладнання, спостерігається значне відхилення експлуатаційних характеристик від номінальних, значна частина енергії йде на втрати, видається рекомендація вивести машину в ремонт і виконати детальну діагностику.

Попереднє оцінювання технічного стану АД здійснюється шляхом порівняння коефіцієнтів, отриманих на основі експериментальних даних з граничними коефіцієнтами, що відповідають одному з указаних вище режимів роботи. Граничні коефіцієнти розраховуються на основі аналізу даних математичних моделей АД з дефектами при моделюванні кожного режиму з урахуванням поточного навантаження.

З огляду на результати попереднього аналізу, для оцінювання поточного технічного стану було вибрано наступні коефіцієнти.

Коефіцієнт потужності полігармонічних сигналів K_{φ} . За даним коефіцієнтом, урахувавши поточне навантаження, можна робити висновок про зміну споживаної потужності АД унаслідок появи вищих гармонічних складових сигналів струму та напруги.

Коефіцієнт вищих гармонік потужності $K_{P_{\omega 2}}$. За даним гармонік змінної складової потужності відносно її номінального значення. Порівнюючи значення змінної складової потужності відносно номінального зі значеннями

віброшвидкості, можна судити про ступінь безпечності подальшої експлуатації АД.

Коефіцієнт корисної дії η . За даним коефіцієнтом також можна судити про ефективність використання споживаної потужності.

Миттєве значення гріючих втрат $\Delta P_{zp} = \Delta P_{ml} + \Delta P_{ct}$ дозволяє судити про перевищення робочої температури обмотки і небезпеку аварійного виходу з ладу АД через перегрів.

У результаті розроблено наступні правила для оцінювання поточного режиму роботи АД.

Якщо виконується правило:

$$(K_{\varphi} = K_{\varphi \text{ відм}}) \wedge (K_{P_{\epsilon z}} = 0) \wedge (\eta = \eta_{\text{ном}}) \wedge (\Delta P_{zp} = \Delta P_{zp \text{ відм}}) = 1, \quad (3.16)$$

де $K_{\varphi \text{ відм}}$, $\Delta P_{zp \text{ відм}}$ – значення коефіцієнта потужності та гріючих втрат для справного АД при живленні від синусоїдної симетричної мережі, а $\eta_{\text{ном}}$ – паспортне значення ККД, то технічний стан досліджуваного двигуна «відмінний».

Двигун працює в режимі «добрий», якщо справедливе правило:

$$\begin{aligned} & (K_{\varphi \text{ хор}} \leq K_{\varphi} < K_{\varphi \text{ відм}}) \wedge (0 < K_{P_{\epsilon z}} \leq K_{P_{\epsilon z \text{ хор}}}) \wedge \\ & \vee (\eta_{\text{хор}} \leq \eta < \eta_{\text{ном}}) \wedge (\Delta P_{zp \text{ хор}} \leq \Delta P_{zp} < \Delta P_{zp \text{ відм}}) = 1, \end{aligned} \quad (3.17)$$

де $K_{\varphi \text{ хор}}$, $K_{P_{\epsilon z \text{ хор}}}$, $\eta_{\text{хор}}$, $\Delta P_{zp \text{ хор}}$ – допустимі значення відповідних коефіцієнтів, визначені для «доброго» стану двигуна.

Відповідно двигун працює в «задовільному» режимі роботи, якщо:

$$\begin{aligned} & \forall \left((K_{\varphi} > K_{\varphi \text{ зад}}) \wedge (K_{P_{\epsilon z}} > K_{P_{\epsilon z \text{ зад}}}) \wedge \right. \\ & \left. \wedge (\eta > \eta_{\text{зад}}) \wedge (\Delta P_{zp} > \Delta P_{zp \text{ зад}}) \right) \exists \\ & \exists \left((K_{\varphi} < K_{\varphi \text{ хор}}) \vee (K_{P_{\epsilon z}} < K_{P_{\epsilon z \text{ хор}}}) \vee \right. \\ & \left. \vee (\eta < \eta_{\text{хор}}) \vee (\Delta P_{zp} < \Delta P_{zp \text{ хор}}) \right) = 1, \end{aligned} \quad (3.18)$$

де $K_{\varphi \text{ зад}}$, $K_{P_{\epsilon z \text{ зад}}}$, $\eta_{\text{зад}}$, $\Delta P_{zp \text{ зад}}$ – допустимі значення відповідних коефіцієнтів, визначені для «задовільного» стану двигуна.

Виконання правила:

$$\begin{aligned} & \forall \left((K_{\varphi} > K_{\varphi \text{ ав}}) \wedge (K_{M_{\text{вз}}} > K_{M_{\text{вз ав}}}) \wedge \right. \\ & \left. \wedge (\eta > \eta_{\text{ ав}}) \wedge (\Delta P_{\text{ зр}} > \Delta P_{\text{ зр ав}}) \right) \exists \\ & \exists \left((K_{\varphi} < K_{\varphi \text{ зад}}) \vee (K_{P_{\text{вз}}} < K_{P_{\text{вз зад}}}) \vee \right. \\ & \left. \vee (\eta < \eta_{\text{ зад}}) \vee (\Delta P_{\text{ зр}} < \Delta P_{\text{ зр зад}}) \right) = 1, \end{aligned} \quad (3.19)$$

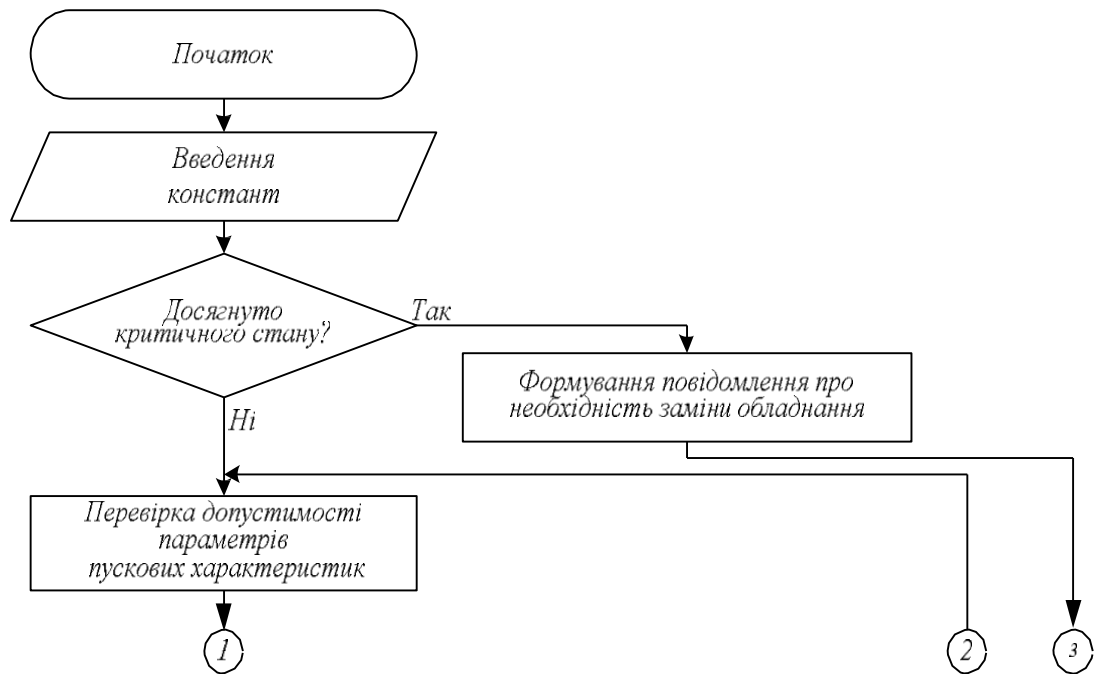
де $K_{\varphi \text{ ав}}, K_{P_{\text{вз а}}}, \eta_{\text{ ав}}, \Delta P_{\text{ зр ав}}$ – допустимі значення відповідних коефіцієнтів, визначені для «аварійного» стану двигуна, свідчать про настання «аварійного» режиму роботи АД.

Допустимі значення коефіцієнтів при визначенні кожного з режимів роботи АД обчислюються згідно з вимогами ГОСТ 183-74 [95] для відповідного типу двигуна.

Таким чином, за сформульованими правилами можна спостерігати за допустимістю подальшої роботи АД, і в разі необхідності формувати сигнали попередження.

Розраховані значення гріючих втрат $\Delta P_{\text{ зр}}$ та коефіцієнта вищих гармонік потужності $K_{P_{\text{вз}}}$ можна додатково використати для прогнозу залишкового ресурсу роботи. Для цього необхідно знати базові параметри експлуатації двигуна, для яких розраховувався його базовий ресурс роботи. У процесі експлуатації через певні встановлені проміжки часу визначаються поточні значення параметрів експлуатації двигуна, порівнюються з базовими і в разі перевищення, проводиться перерахунок залишкового ресурсу відповідно до реальних поточних експлуатаційних параметрів роботи двигуна.

Алгоритм роботи запропонованої системи оцінювання поточного стану АД наведено на рис. 3.9.



*Рис. 3.9 – Алгоритм системи оцінювання поточного режиму роботи АД
(початок)*

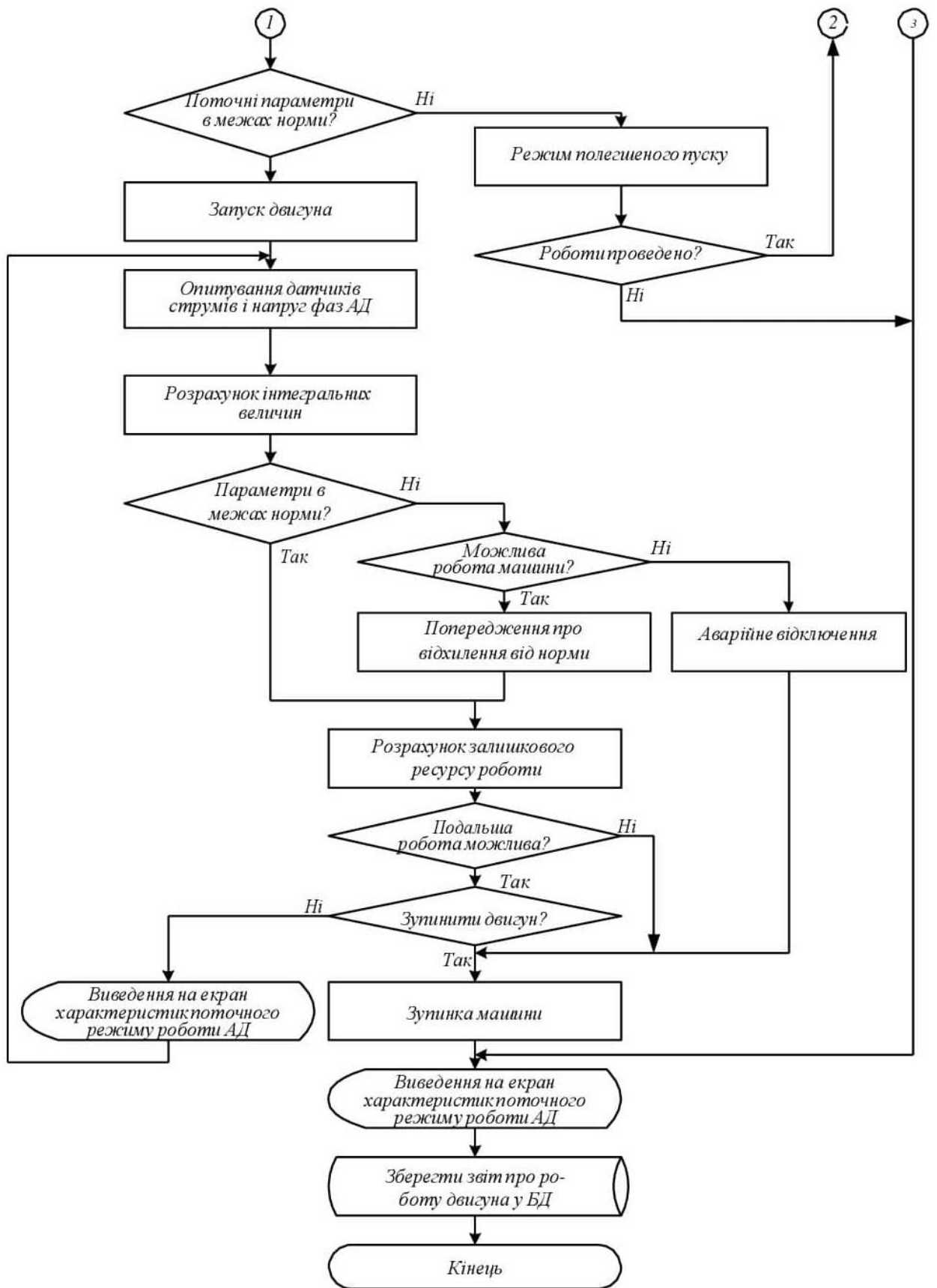


Рис. 3.9 – Алгоритм системи оцінювання поточного режиму роботи АД
(продовження)

3.3.2 Розробка методу діагностики асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності

Попередній аналіз даних математичного моделювання роботи АД з різним ступенем розвитку розглянутих дефектів показав ефективність визначення дефектів на основі аналізу спектра сигналу потужності. Однак при аналізі даних роботи АД з незначним ступенем дефекту, за наявності електричних завад або за наявності одночасно кількох типів дефектів, можуть виникати помилки, викликані неможливістю виділення інформативних ознак конкретних дефектів у спектрі сигналу потужності. Тому виникає необхідність використання додаткових діагностичних показників з метою унеможливлення виникнення помилок під час діагностики. Як і як такі використано показники, сформульовані у розділі 3. З метою комплексного аналізу спектра потужності запропонованих діагностичних показників та для розробки критеріїв виявлення конкретних дефектів, за допомогою розроблених математичних моделей було отримано миттєві значення струмів, напруг та потужностей при різних ступенях розвитку неякісностей та дефектів, на основі чого розраховано сформульовані у розділі 3 показники для кожного випадку.

Попередній аналіз показав, що найбільш інформативними для процедури діагностики є:

- коефіцієнти ефективності використання споживаної енергії ε_p – загальний, ε_{pi} – пофазний;
- середньозважені значення гармонік моменту за фазами P_{spi} ;
- коефіцієнт потужності полігармонічних сигналів K_φ .

Для врахування впливу неякісних параметрів мережі живлення додатково було розраховано показники якості електричної енергії [66, 67], а саме: показник за несиметрією напруги ε_2 , показник за несиметрією струму ε_{I2} , показник за несиметрією потужності ε_{p2} , показник за несинусоїдністю напруги k_{ncU} , показник за несинусоїдністю струму I_{knc} . На рис. 4.10, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21 порядкові номери графіків відповідають порядковим номерам ступеня розвитку дефекту формування діагностичних виразів для АД типу АО90S-4 (1,1 кВт, 1410 об/хв; 2,8

А). Аналіз значень амплітуд вищих гармонік спектра споживаної потужності трьох фаз доцільно виконувати в разі, коли сумарне значення амплітуд вищих гармонік споживаної потужності не менше 2 % від номінального значення ($K_{P_{\Sigma}} > 0,02$), що виключає вплив похибки вимірювань і обчислень на результати аналізу. У такому випадку виключається аналіз незначних за амплітудою гармонік, при цьому можлива діагностика дефектів, що зароджуються. За сукупним аналізом наведених показників та частотного спектра потужності можна зробити наступні висновки.

Для непошкодженого двигуна у спектрі сигналу споживаної потужності трьох фаз характерна наявність лише незначної за значенням низькочастотної складової (рис. 3.10, графік 1), що зумовлено похибками при розрахунках математичних перетворень під час розрахунку параметрів математичної моделі АД, у спектрах сигналів потужності за фазами наявна основна складова подвійної частоти мережі живлення (100 Гц) та незначні гармоніки, симетричні відносно неї та частоти мережі живлення (50 Гц) (рис. 3.11, б). Ці явища також пов'язані з похибками математичних перетворень. Основний відсоток вищих гармонік припадає на діапазон 5–45 Гц (рис. 3.11, а).

Оскільки двигун не має пошкоджень, то сформульовані коефіцієнти мають граничні значення, які відповідають роботі АД із синусоїдними струмами та напругами. Таким чином, якщо виконується правило:

$$\begin{aligned} & (K_{P_{\Sigma}} < 0,02) \wedge (\varepsilon_{PA} = \varepsilon_{PB} = \varepsilon_{PC}) \wedge \\ & \wedge (P_{cp A_2} = P_{cp B_2} = P_{cp C_2} = 0,33) \wedge (K_{\text{гарм}(6-45)} > 0,75) = 1, \end{aligned} \quad (3.20)$$

то можна сказати, що досліджуваний двигун непошкоджений, живиться від синусоїдної мережі.

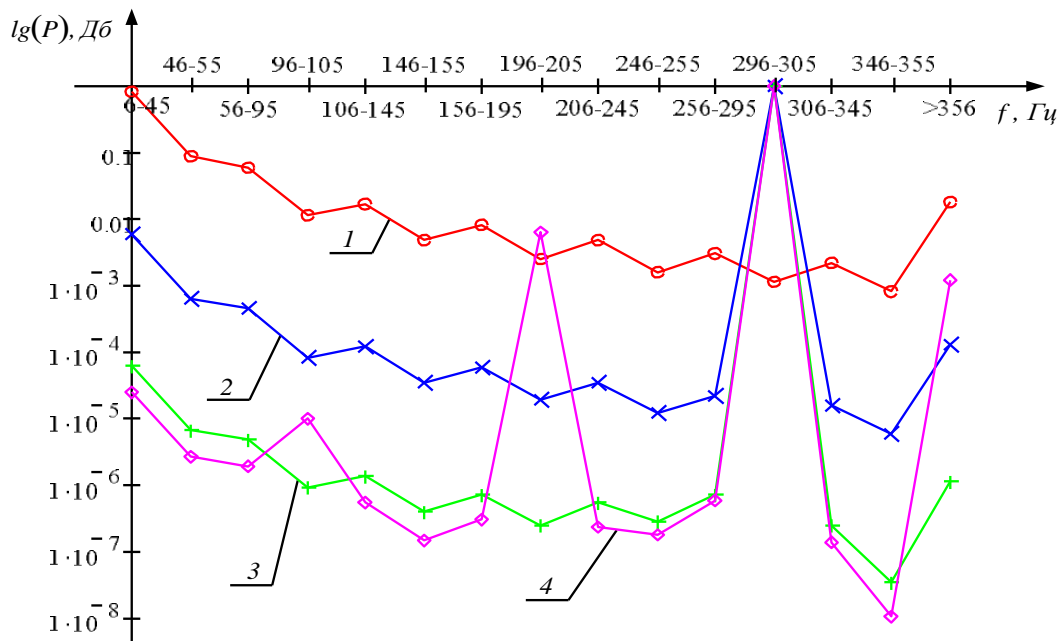


Рис. 3.10 – Розподіл частот вищих гармонік сигналу трифазної миттєвої потужності непошкодженого двигуна при живленні від мережі різної якості

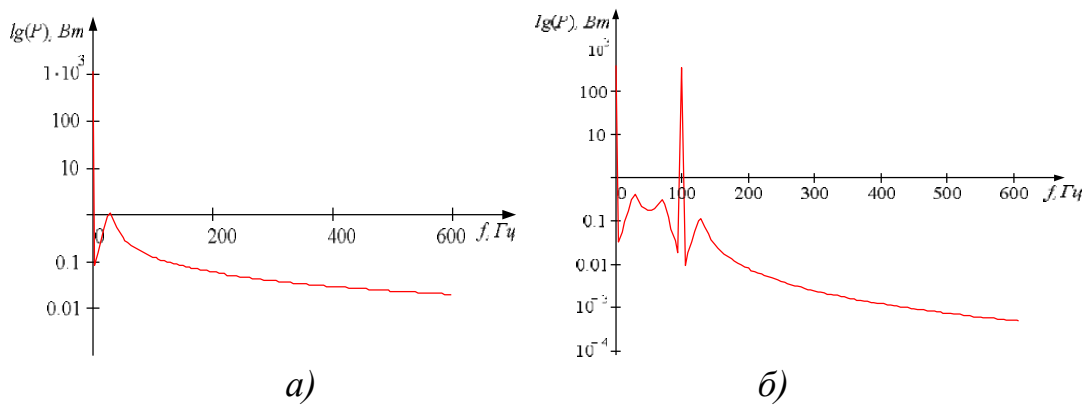


Рис. 3.11 – Спектр трифазної миттєвої потужності (а) та потужності фази А (б) ідеалізованого двигуна без пошкоджень з ідеальним живленням

За наявності несинусоїдності мережі живлення (3-тя гармоніка) у спектрі сигналу потужності трьох фаз з'являється гармоніка із частотою 300 Гц (рис. 3.12, а), за наявності 3-ї та 5-ї гармонік напруги в спектрі сигналу трифазної потужності також з'являється гармоніка із частотою 600 Гц (рис. 3.12, б). За наявності одночасно несинусоїдності та несиметрії мережі живлення у спектрі потужності трьох фаз з'являються всі частоти, кратні подвійній частоті мережі живлення (рис. 3.12, в). При цьому гармоніки, характерні для непошкодженого двигуна, залишаються незмінними як за значенням частоти, так і за значенням амплітуди. Основний відсоток вищих гармонік при несинусоїдності припадає на частоту 300 Гц (рис. 3.12). За наявності несиметрії значною стає гармоніка із частотою 200 Гц

(рис. 3.12, в, рис. 4.10, криві 2, 3, 4).

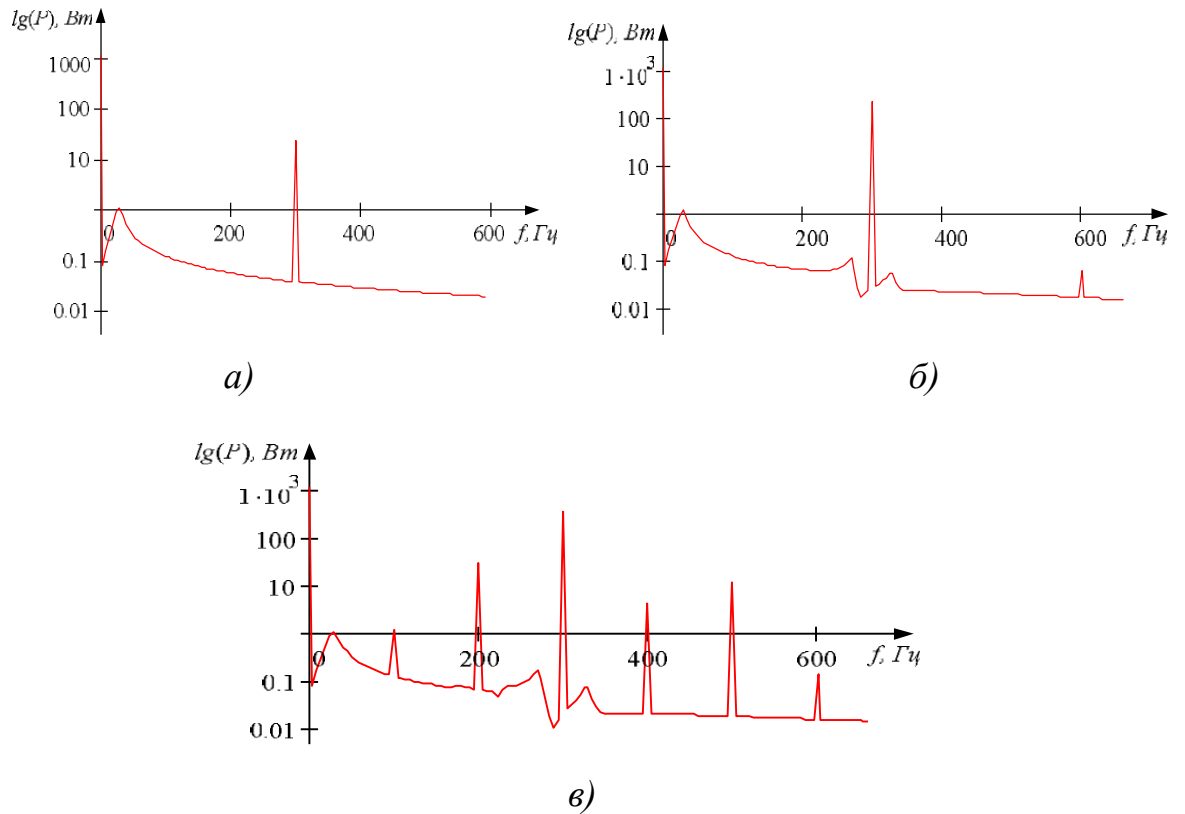


Рис. 3.12 – Спектри трифазної потужності при несинусоїдному живленні:

а) 1, 3 гармоніки; б) 1, 3, 5 гармоніки;

в) 1, 3, 5 гармоніки, амплітуда 5-ї гармоніки має різні значення за фазами (несиметрія).

Таким чином, наявність гармоніки частотою 300 Гц у спектрі сигналу трифазної потужності при рівності середньозважених показників за всіма фазами свідчить про несинусоїдність мережі живлення. Отже, якщо виконується правило:

$$\begin{aligned} & (K_{P_{\Sigma}} > 0,02) \wedge (\varepsilon_P > 0,9) \wedge (\varepsilon_{PA} \approx \varepsilon_{PB} \approx \varepsilon_{PC}) \wedge \\ & \wedge (P_{cpA_2} = P_{cpB_2} = P_{cpC_2} = 0,33) \wedge (K_{зарм(296-305)} > 0,7) = 1, \end{aligned} \quad (3.21)$$

то досліджуваний двигун непошкоджений, живиться від несинусоїдної симетричної мережі, а якщо виконується правило:

$$\begin{aligned} & (K_{P_{\Sigma}} > 0,02) \wedge (\varepsilon_P > 0,9) \wedge (\varepsilon_{PA} \neq \varepsilon_{PB} \neq \varepsilon_{PC}) \wedge \\ & \wedge (P_{cpA_2} \neq P_{cpB_2} \neq P_{cpC_2}) \wedge (K_{зарм(196-205)} > K_{зарм(146-195)} \cdot 10^3) \wedge \\ & \wedge (K_{зарм(296-305)} > 0,7) = 1, \end{aligned} \quad (3.22)$$

то двигун живиться від несинусоїдної несиметричної мережі.

При погіршенні кріплень АД з основою в спектрі трифазної миттєвої потужності спостерігається лише низькочастотна складова (рис. 3.13, а), зумовлена низькочастотними вібраціями двигуна, а в спектрі фазних потужностей – основна гармоніка із частотою 100 Гц, та бічні гармоніки симетричні відносно 100 Гц та 50 Гц (рис. 3.13, б). При погіршенні якості кріплень частоти бічних гармонік змінюються, а їх амплітуда збільшується (рис. 3.14). При цьому сформульовані вище показники змінюються незначно (1–2 %). Це явище пояснюється наближенням до частоти автоколивань АД при різній жорсткості кріплення з основою. Основний відсоток гармонік припадає на діапазон 5–45 Гц (рис. 3.13, а).

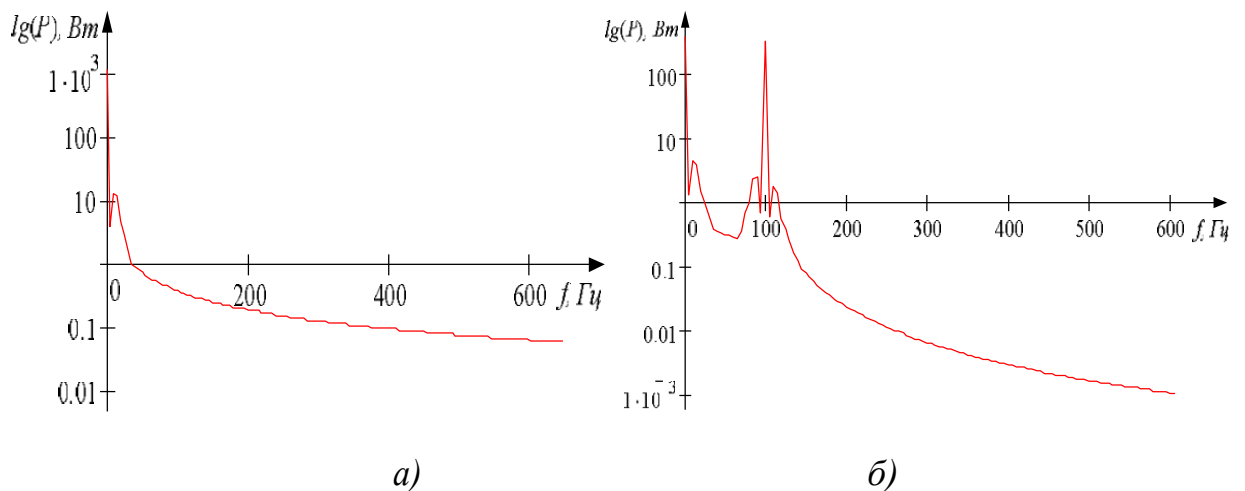


Рис. 3.13 – Спектр трифазної миттєвої потужності (а) та потужності фази А (б) двигуна з неякісними кріпленнями

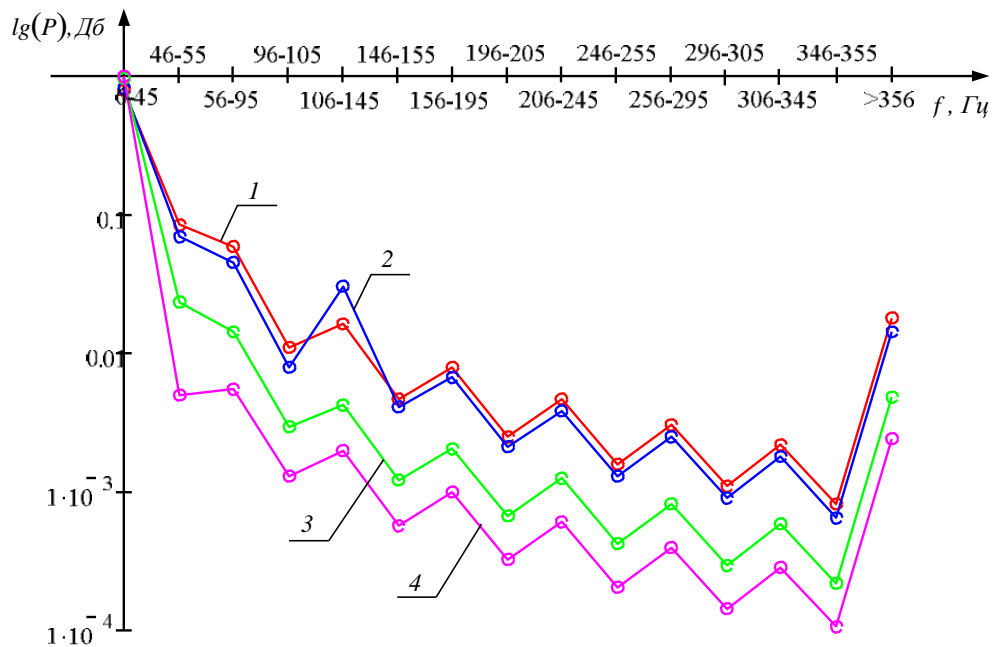


Рис. 3.14 – Розподіл частот вищих гармонік сигналу трифазної миттєвої потужності двигуна з неякісним кріпленням

Тобто, якщо справедливий вираз:

$$\begin{aligned} & (K_{P_{\Sigma}} > 0,02) \wedge (\varepsilon_{PA} = \varepsilon_{PB} = \varepsilon_{PC}) \wedge \\ & \wedge (P_{cp A_2} = P_{cp B_2} = P_{cp C_2} = 0,33) \wedge (K_{\text{гарм}(\delta-45)} > 0,2) = 1, \end{aligned} \quad (3.23)$$

то двигун неякісно закріплений.

У режимі неробочого ходу при статичному або динамічному дисбалансі ротора у спектрі потужності трьох фаз спостерігається явно виражена гармоніка із частотою 200 Гц (чотирикратна частота мережі), що свідчить про наявність несиметрії. При зростанні навантаження до номінального частота даної гармоніки стає дещо меншою за 200 Гц (рис. 3.15, а), таким чином, основний відсоток вищих гармонік при дисбалансі ротора за номінального навантаження знаходиться у діапазоні 156–205 Гц (рис. 3.16). Також характерним для даного дефекту є зростання коефіцієнта несиметрії струмів зі збільшенням навантаження, та одночасно зменшення коефіцієнта несиметрії потужності.

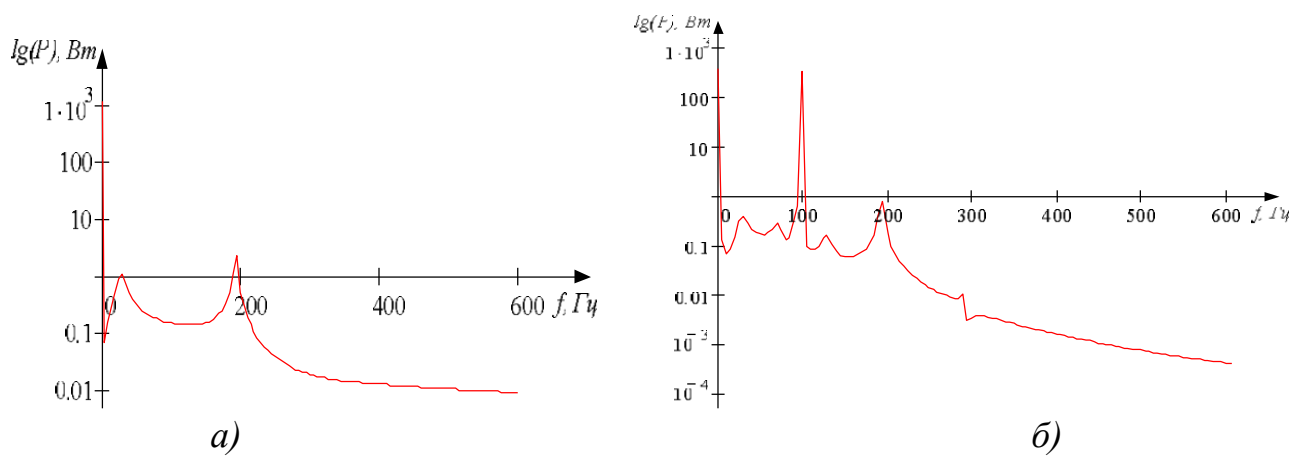


Рис. 3.15 – Спектр трифазної миттєвої потужності (а) та потужності фази А (б) двигуна з наявністю дисбалансу ротора

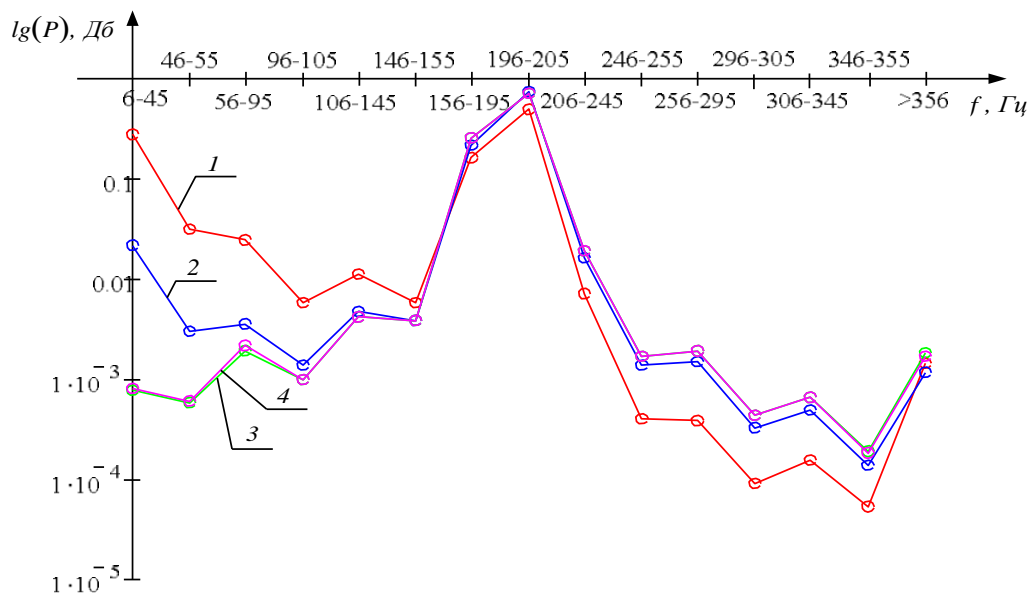


Рис. 3.16 – Розподіл частот вищих гармонік сигналу трифазної миттєвої потужності двигуна з наявністю дисбалансу ротора

Таким чином, за наявності дисбалансу ротора набуває справедливості вираз:

$$\begin{aligned}
 & (K_{P_{\text{ср}2}} > 0,02) \wedge (\varepsilon_{PA} \neq \varepsilon_{PB} \neq \varepsilon_{PC}) \wedge \\
 & \wedge (P_{\text{ср}A_2} \neq P_{\text{ср}B_2} \neq P_{\text{ср}C_2}) \wedge \\
 & (K_{\text{зарм}(156-195)} > 0,1) \wedge (K_{\text{зарм}(196-205)} > 0,2) = 1.
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

Для частотного спектра потужності трьох фаз при фазній несиметрії АД та виткових замиканнях характерна поява значної за амплітудою гармоніки частоти 100 Гц (рис. 3.17, а, б). Зі зростанням ступеня пошкодження амплітуда гармоніки зростає. Основний відсоток вищих гармонік для потужності фаз знаходиться у

діапазоні 96–105 Гц, також значний відсоток гармонік діапазону 196–205 Гц (рис. 3.17, б). Оскільки в обох випадках істотно різняться значення електричних параметрів за фазами, різними є і значення коефіцієнта ефективності використання енергії за фазами; також значно змінюються показники за несиметрією струму та потужності ϵ_{I2} , ϵ_{P2} . У зв'язку зі збільшенням втрат, що спричиняє нерівномірність тепловиділення, значно зменшується коефіцієнт ефективності використання потужності ϵ_p . Розділення цих дефектів можливе за аналізом значення коефіцієнта потужності полігармонічних сигналів (K_ϕ): значення коефіцієнта за наявності виткових замикань збільшується внаслідок збільшення кута зсуву фази струму і напруги.

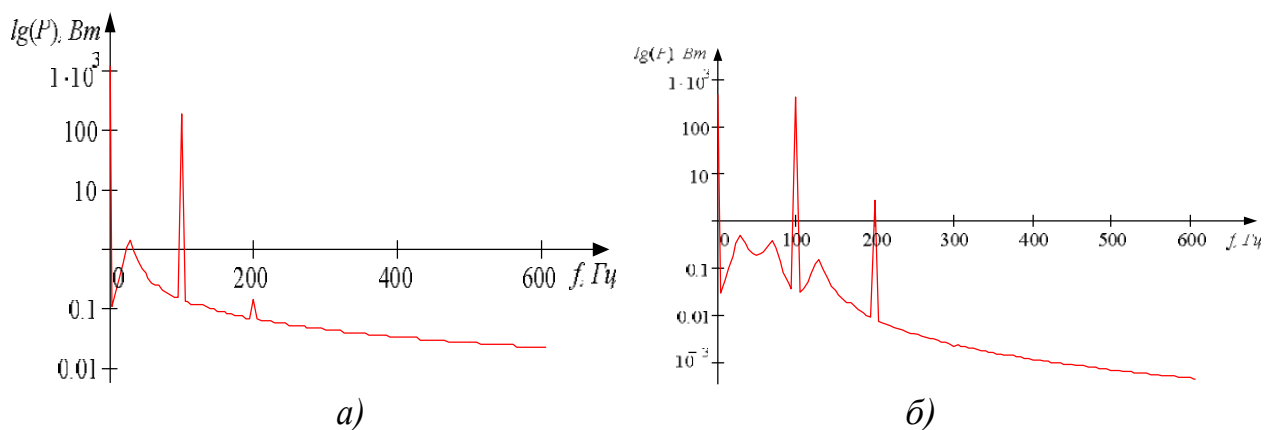


Рис. 3.17 – Спектр трифазної миттєвої потужності (а) та потужності фази А (б) двигуна при несиметрії фази А

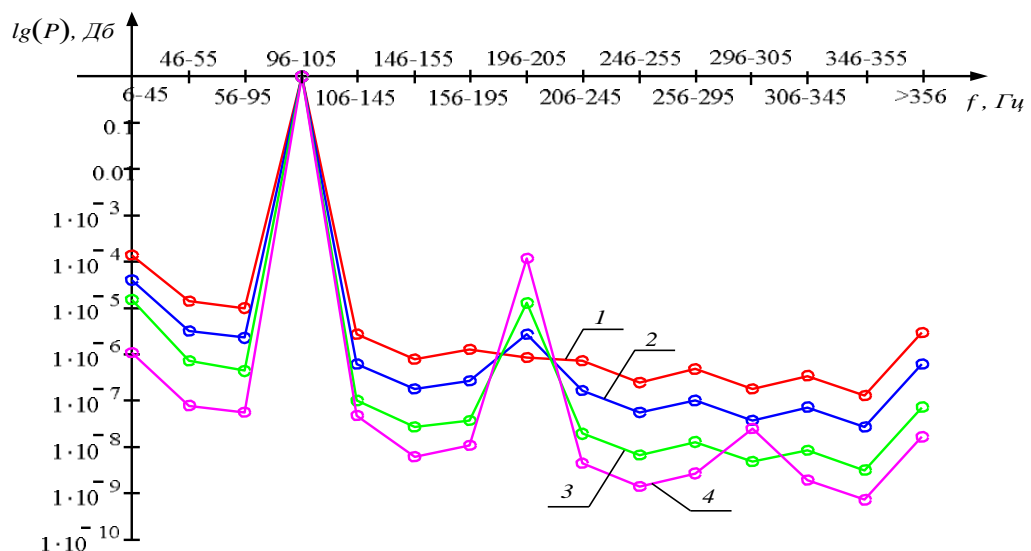


Рис. 3.18 – Розподіл частот вищих гармонік сигналу трифазної миттєвої потужності двигуна при несиметрії фази А

Тобто, істинність виразу:

$$\begin{aligned} & (K_{P_{\varepsilon 2}} > 0,02) \wedge (\varepsilon_{PA} \neq \varepsilon_{PB} \neq \varepsilon_{PC}) \wedge \\ & \wedge (P_{cp A_2} \neq P_{cp B_2} \neq P_{cp C_2}) \wedge \\ & \wedge (K_{\text{гарм}(96-105)} > 0,4) \wedge \left(\begin{aligned} & (K_{\text{гарм}(196-205)} > K_{\text{гарм}(156-195)}) \vee \\ & \vee (K_{\text{гарм}(196-205)} \approx K_{\text{гарм}(156-195)}) \end{aligned} \right) = 1, \end{aligned} \quad (3.25)$$

свідчить або про наявність несиметрії, або про наявність виткових замикань в обмотці статора. Розділення дефектів виконується шляхом аналізу коефіцієнта потужності полігармонічних сигналів.

При обриві стрижнів ротора у частотному спектрі потужності трьох фаз спостерігається лише низькочастотна складова, що збільшується зі зростанням дефекту (рис. 3.19, а, рис. 3.20). Характерною ознакою даного режиму також є зменшення коефіцієнта неякості перетворення моменту при збільшенні навантаження, що є відмінністю від поведінки даного коефіцієнта за інших неякостей. При цьому значення решти показників змінюються неістотно, несиметрії параметрів, що фіксуються, не спостерігається, оскільки зміна параметрів ротора непрямо проявляється на зміні параметрів статора, її дія «розсіюється» за фазами статора, і може бути зафіксована у вигляді модуляції зафіксованих параметрів низькою частотою (що і видно з частотної характеристики). Додатковим показником при визначенні наявності даного дефекту є наявність у спектрі сигналу струму симетричних бокових частот відносно 50 Гц (рис. 3.19) [106].

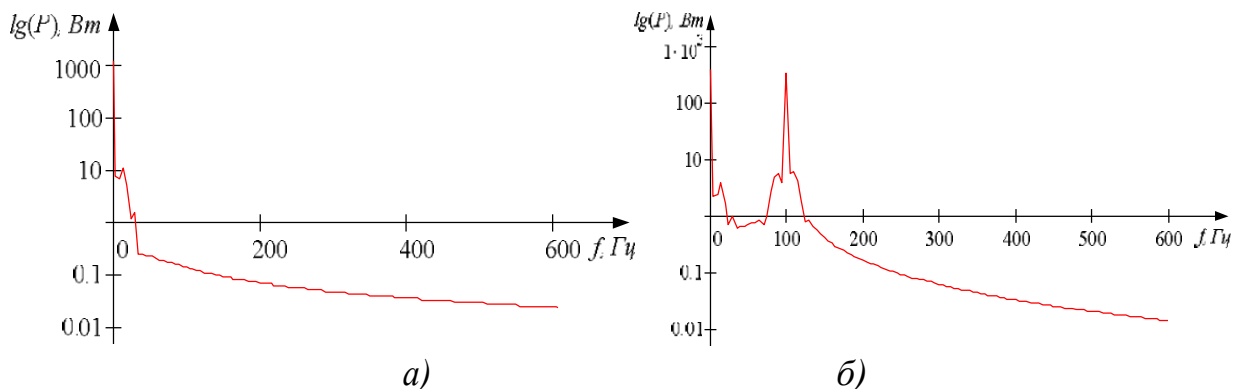


Рис. 3.19 – Спектр трифазної миттєвої потужності (а) та потужності фази А (б) двигуна при обриві одного стрижня ротора

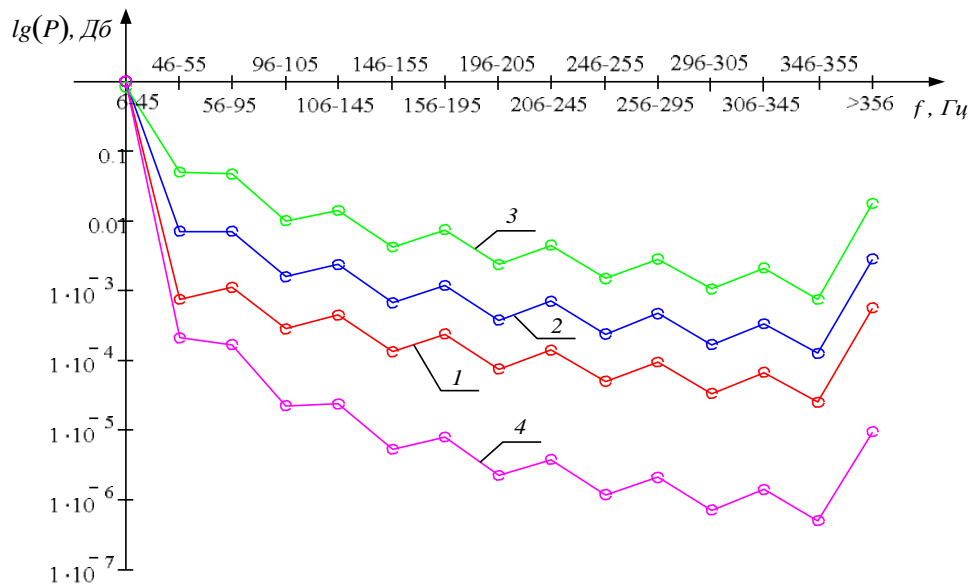


Рис. 3.20 – Розподіл частот вищих гармонік сигналу трифазної миттєвої потужності двигуна при обриві одного стрижня ротора

Таким чином, за наявності обриву стрижнів ротора справедливий вираз:

$$(K_{P_{\text{вз}}} > 0,02) \wedge (\varepsilon_{PA} = \varepsilon_{PB} = \varepsilon_{PC}) \wedge (P_{\text{ср } A_2} \neq P_{\text{ср } B_2} \neq P_{\text{ср } C_2}) \wedge (K_{\text{загрм}(6-45)} > 0,2) = 1. \quad (3.26)$$

Числові значення у виразах 3.21–3.26 обчислено для АД типу АО90S–4 (1,1 кВт, 1410 об/хв; 2,8 А) з умови перевищення значення змінної складової моменту $K_{P_{\text{вз}}} > 0,02$, що відповідає межі допустимих норм вібрацій згідно з ГОСТ 20815-93 [94]. Для АД інших типів дані показники можуть бути перераховані на основі сигналів відповідної математичної моделі.

Таким чином, у роботі сформульовано правила для діагностики технічного стану АД і показана можливість їх застосування для розділення найбільш розповсюджених видів дефектів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ

4.1 Створення експериментального обладнання для дослідження зміни технічного стану асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності

Для експериментальної перевірки роботи методу оцінювання технічного стану та діагностики АД було створено відповідне експериментальне лабораторне обладнання. Дане обладнання містить фізичну модель експериментальної установки для дослідження дефектів електричних машин, блок вимірювання електричних сигналів, за якими виконується діагностика, та спеціалізоване програмне забезпечення для вимірювання, запису, обробки електричних сигналів та реалізації розроблених алгоритмів діагностики.

4.1.1 Експериментальні установки для дослідження дефектів електричних машин

Для розв'язання задач дослідження методів діагностики пошкоджень та оцінювання поточного технічного стану АД було розроблено лабораторний стенд, який дозволяє здійснювати випробування як у режимі неробочого ходу, так і під навантаженням. Навантаження на валу АД здійснюється за допомогою навантажувального генератора постійного струму. Керування струмом збудження навантажувального генератора дозволяє змінювати момент навантаження на валу АД (рис. 4.1). Технічні характеристики двигунів, які використовувалися при проведенні досліджень, наведено у табл. 4.1.

Одним із найпростіших варіантів живлення АД є пряме підключення до мережі живлення 0,4 кВ (рис. 4.2). Недоліком проведення досліджень при такому підключенні є низька якість енергії живлення, що спотворює результати випробувань та діагностики.

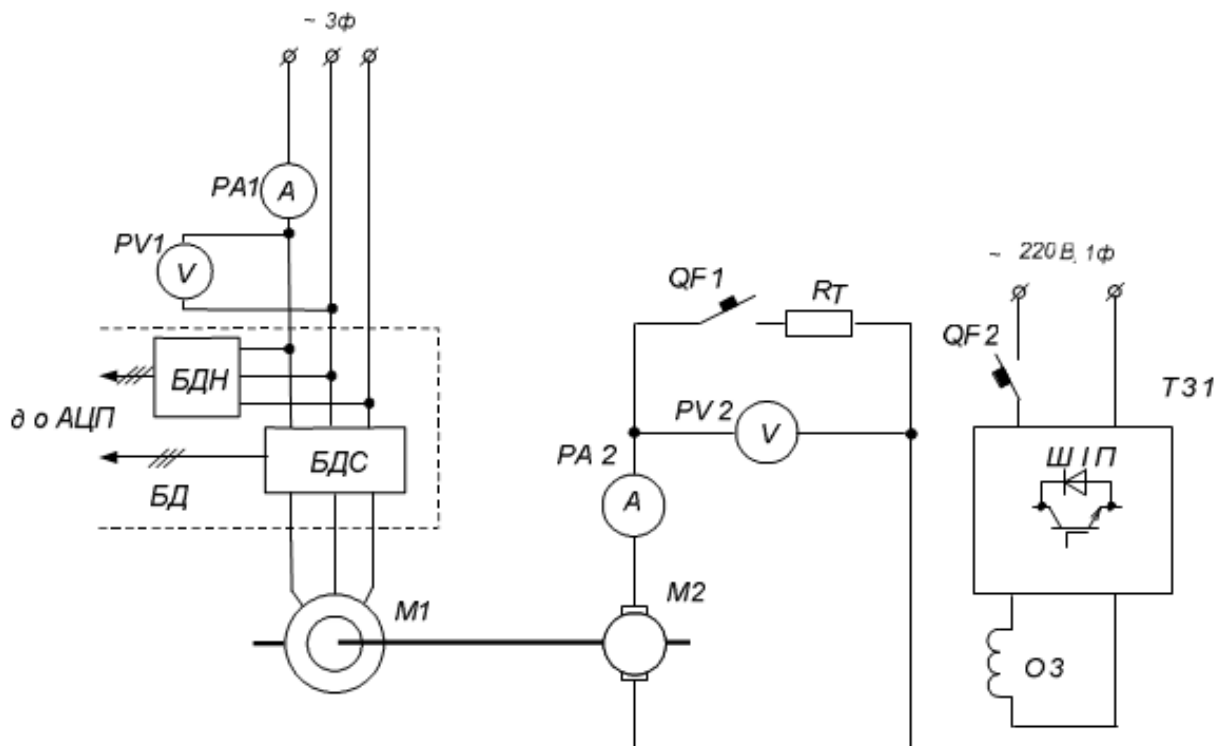


Рис. 4.1 – Функціональна схема випробувань АД під навантаженням

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики досліджуваних двигунів

| Технічні характеристики асинхронного двигуна АИР80В4У2 | | |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Номінальна напруга, В | 220/380 Δ/Υ |
| 2 | Номінальна потужність, кВт | 1,5 |
| 3 | Номінальний струм, А | 6,3/3,6 |
| 4 | Номінальний ККД, % | 77 |
| 5 | Номінальний коеф. потужності | 0,81 |
| 6 | Номінальна частота обертання, хв-1 | 1395 |
| 7 | Режим роботи | S1 |
| 8 | Клас ізоляції | F |
| 9 | Ступінь захисту | IP 54 |
| 0 | Активні та індуктивні опори контурів схеми заміщення | $R_s=5 \text{ Ом}; X_s=4,35 \text{ Ом};$ $R'_r=3,69 \text{ Ом}; X'_r=4,01 \text{ Ом};$ $X_\mu=58,61 \text{ Ом}; R_\mu=3,9 \text{ Ом}$ |
| Технічні характеристики двигуна постійного струму 2ПБ | | |
| 1 | Номінальна напруга, В | 110 |
| 2 | Номінальна потужність, кВт | 1,2 |
| 3 | Номінальний струм, А | 15,4 |
| 4 | Номінальний ККД, % | 71 |
| 5 | Номінальна частота обертання, хв-1 | 2820 |
| 6 | Активний опір обмотки якоря у холодному/нагрітому стані, Ом | 4,0/4,7 |

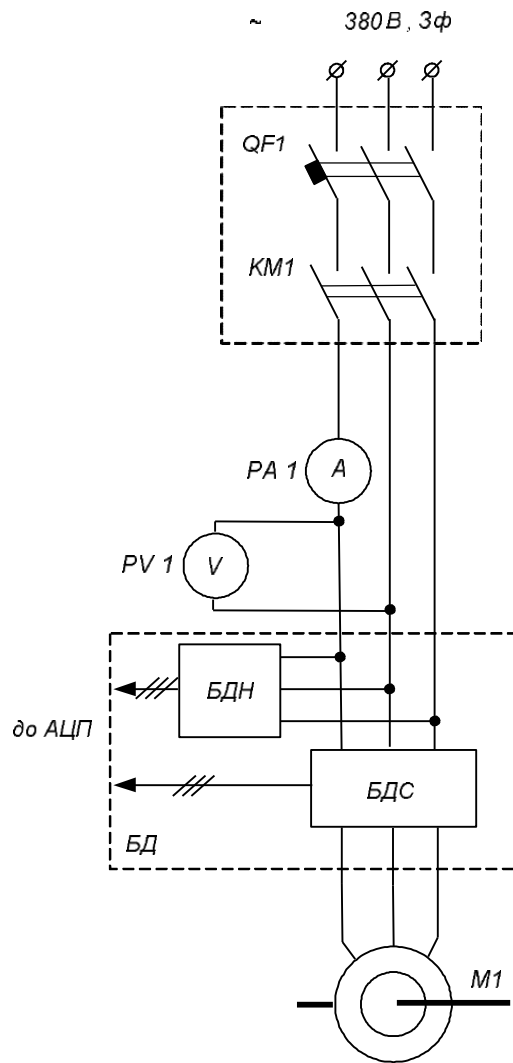


Рис. 4.2 – Функціональна схема підключення АД до мережі живлення

Для дослідження методів діагностики при живленні від перетворювача частоти використовувався перетворювач *Lenze 8200 Vector* з однофазним входом та трифазним виходом (рис. 4.3). Обмотки статора АД при цьому з'єднувались у трикутник. Перетворювач *8200 Vector* (табл. 4.2) дозволяє досліджувати статичні та динамічні характеристики АД при зміні частоти живлення.

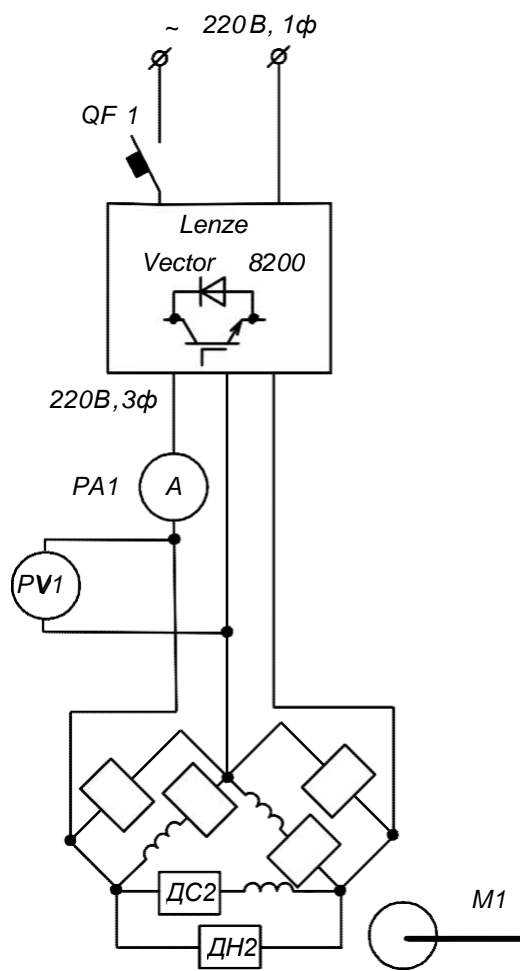


Рис. 4.3 – Функціональна схема підключення АД до перетворювача частоти

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики перетворювача частоти Lenze 8200 Vector

| Тип | Потужність двигуна | Струм перетворювача | |
|------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|----------|
| | | вхідний | вихідний |
| | кВт | А | А |
| Напруга живлення 1 фаза 180...264 VAC / 3 фази 0...240 VAC | | | |
| E82EV152K2C | 1,50 | 15,00 | 7,00 |

Для тих же цілей, але при з'єднанні обмоток статора АД у зірку, використовується схема, наведена на рис. 4.4. Після перетворювача ввімкнено підвищуючий трансформатор 220/380В (табл. 6.3) та П- подібний фільтр (табл. 4.4), який згладжує пульсації напруги та струму. Наведена схема джерела живлення дозволяє підвищити показники якості електроенергії, яку споживає АД під час випробувань, що позитивно впливає на результати випробувань та діагностики.

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики трансформатора

| | | |
|---|-----------------------------------|---------|
| 1 | Номинальна напруга, В | 220/380 |
| 2 | Номинальна потужність, кВА | 10 |
| 3 | Схема з'єднання обмоток | Y /Y |
| 4 | Номинальний ККД, % | 96 |
| 5 | Номинальний коефіцієнт потужності | 0,92 |

Таблиця 4.4 – Технічні характеристики П-подібного фільтра

| | | |
|---|---------------------------------------|--------|
| 1 | Номинальна напруга конденсаторів, В | 1000 |
| 2 | Номинальна ємність конденсаторів, мкФ | 1 |
| 3 | Активний опір дроселя, Ом | 0,0134 |
| 4 | Індуктивний опір дроселя, Ом | 0,21 |

Для дослідження режимів роботи АД при несинусоїдній напрузі використовується схема з тиристорним трифазним перетворювачем напруги (рис. 4.5). Наведена схема також дозволяє досліджувати режими плавного пуску та способи визначення втрат у сталі при полігармонічному живленні. Технічні характеристики тиристорного перетворювача напруги наведені у табл. 4.5.

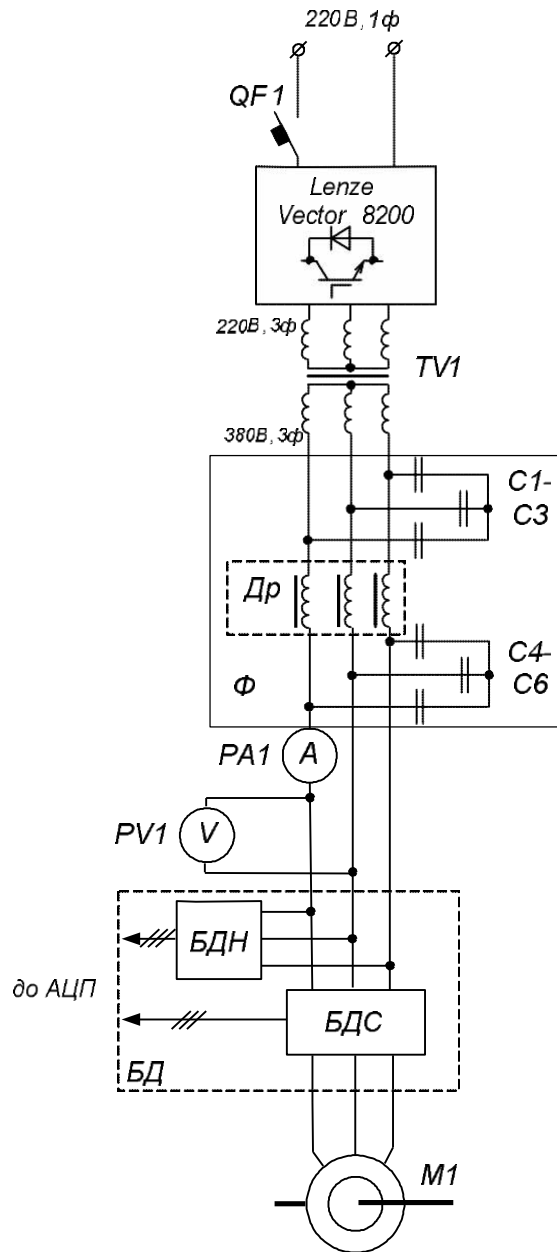


Рис. 4.4 – Функціональна схема підключення АД до перетворювача частоти з підвищенням та фільтрацією напруги живлення

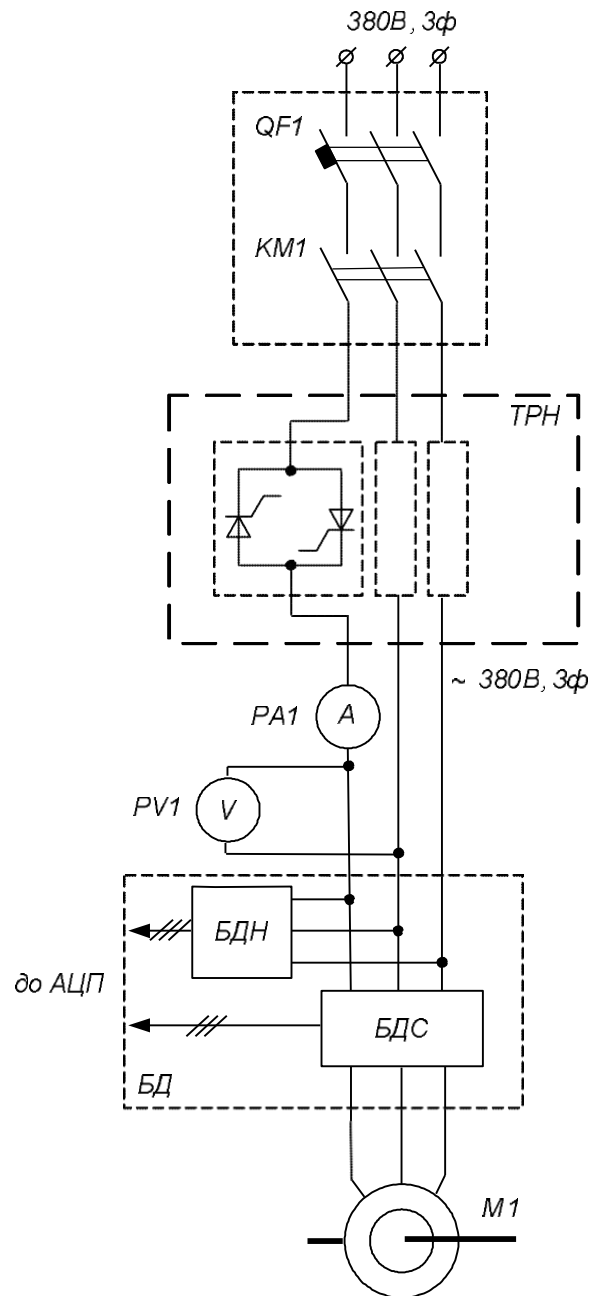


Рис. 4.5 – Функціональна схема підключення АД до ТРН

Таблиця 4.5 – Технічні характеристики тиристорного перетворювача напруги

| | | |
|---|----------------------------|--------------------|
| 1 | Номінальна напруга, В | 380 |
| 2 | Кількість фаз | 3 |
| 3 | Номінальна потужність, кВА | 6,5 |
| 4 | Номінальний струм, А | 12 |
| 5 | Тип навантаження | активно-індуктивне |

Для проведення дослідів та випробувань у режимі неробочого ходу для

визначення втрат у сталі та механічних втрат АД використовується схема з трифазним автотрансформатором (табл. 4.6), за допомогою якого можна змінювати фазну напругу у діапазоні 0–250 В (рис. 4.6). Конструктивно три однофазних автотрансформатори сполучені спільною обертовою віссю, яку приводить у дію однофазний малопотужний реверсивний мотор-редуктор. Керування мотор-редуктором здійснюється з пульта керування.

Таблиця 4.6 – Технічні характеристики трифазного автотрансформатора

| | | |
|---|-------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Номінальна лінійна напруга вхідна/вихідна, В | 380/0–430 |
| 2 | Кількість фаз | 3 |
| 3 | Номінальна потужність, кВА | 12 |
| 4 | Номінальний струм фази, А | 20 |
| 5 | З'єднання обмоток | Y |

Створене обладнання дозволяє реалізувати найрозповсюдженіші схеми живлення і підключення АД до мережі, а також досліджувати режими роботи двигуна при несиметричному живленні.

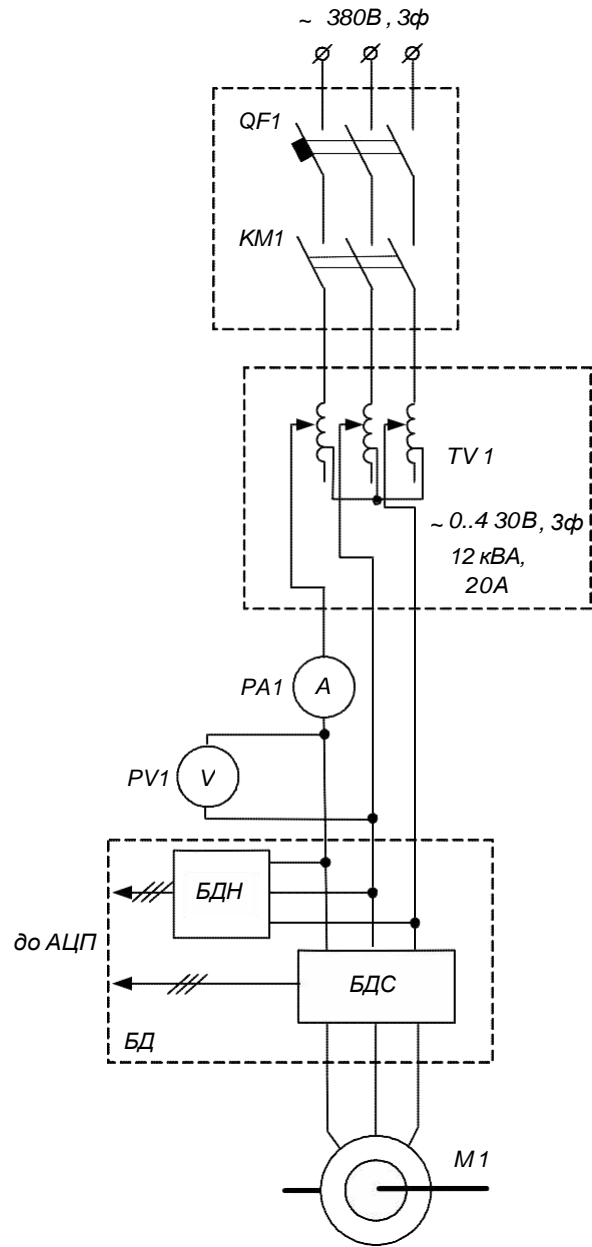


Рис. 4.6 – Функціональна схема живлення АД від трифазного автотрансформатора

Як досліджуваний двигун було використано три ідентичні АД, до яких було штучно внесено пошкодження статора і ротора різного ступеня.

Для імітації виткових замикань в одній з фаз обмотки статора було виведено відпайки (рис. 4.7), що відповідають замиканню певної кількості відсотків обмотки (табл. 4.1).

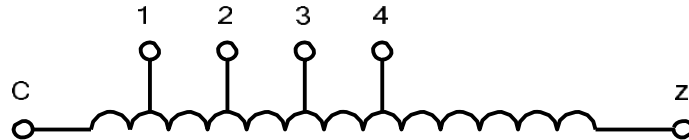


Рис. 4.7 – Схема відпайок обмотки фази статора

Таблиця 4.7 – Дані вимірювання опорів обмоток АД

| Фаза | Опір, Ом | | |
|-----------------|-----------------|----------|---------------------------------------|
| А | 5,102 | | |
| В | 4,972 | | |
| С | 4,945 | | |
| Відпайки фази С | Частина обмотки | Опір, Ом | Зменшення кількості витків обмотки, % |
| | 1–z | 4,93 | 0,3 |
| | 2–z | 4,878 | 1,36 |
| | 3–z | 4,82 | 2,52 |
| | 4–z | 4,253 | 14 |

Для дослідження обривів стрижнів короткозамкнутого ротора було використано три ідентичні ротори, які можуть бути взаємно заміненими. У місцях кріплення стрижнів до короткозамкнутого кільця були висвердлені отвори для порушення електричного контакту. Схему розташування отворів зображено на рис. 4.8.

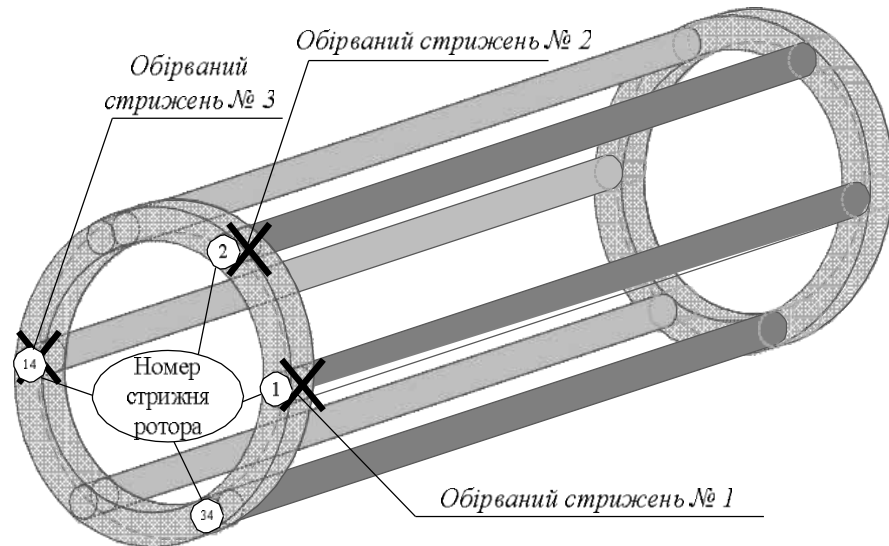


Рис. 4.8 – Схема розташування обірваних стрижнів

4.1.2 Програмне забезпечення для реалізації алгоритмів діагностики електричних машин

Програмне забезпечення для реалізації методів діагностики на основі аналізу електричних сигналів також було створено у середовищі LabVIEW. Математичне забезпечення, яке було покладено в основу програми діагностики, базується на основі виразів, розроблених у другому розділі, і надає можливість виконувати діагностику як за аналізом спектра фазного струму, так і за аналізом сигналу потужності.

Інтерфейс користувача показано на рис. 4.8 – 4.10. Дане програмне забезпечення дозволяє завантажувати попередньо записані за допомогою вимірювального комплексу сигнали (рис. 4.8). У даному вікні існує можливість також визначати довжину даних, які будуть використовуватися для подальшого аналізу. Базуючись на зчитаних сигналах, програма виконує алгоритм швидкого перетворення Фур'є та показує отримані спектри електричних сигналів (рис. 4.9). Згідно з розробленим алгоритмом, програма надає результат діагностики АД щодо наявності дефектів та пошкоджень машини, базуючись як на основі аналізу спектра струму фаз статора, так і потужності фаз і сумарної потужності трьох фаз АД (рис. 4.10).

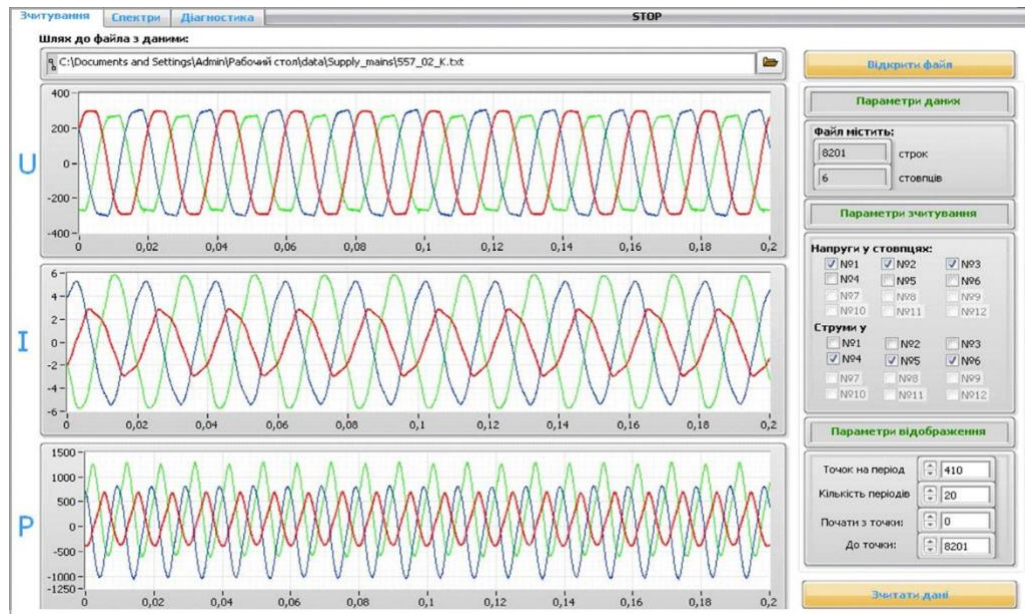


Рис. 4.8 – Програмне забезпечення системи діагностики. Вкладка «Зчитування»

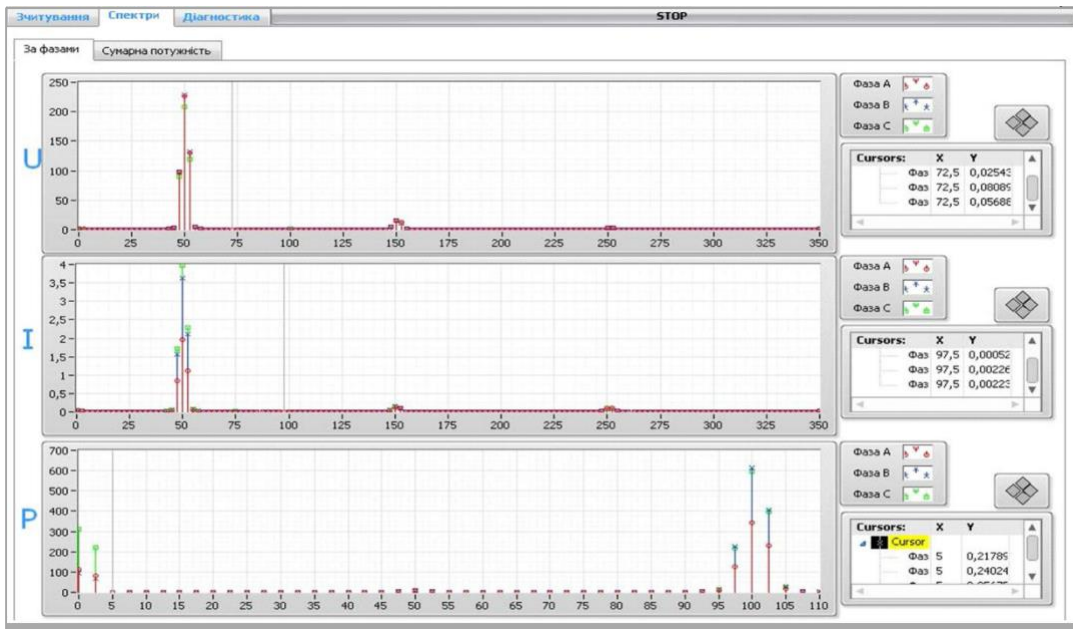


Рис. 4.9 – Програмне забезпечення системи діагностики. Вкладка «Спектри»

The figure shows two panels of diagnostic results. The top panel is titled 'Результати діагностики:' and lists the following items:

- обрив стрижнів ротора - відсутній
- виткові замикання обмоток стаора - відсутні
- несиметрія обмоток статора - відсутня
- якість кріплення до основи - задовільна
- дисбаланс ротора - відсутній

Below this panel is a button labeled 'Діагностика за спектрами струнів'. The bottom panel is also titled 'Результати діагностики:' and lists the following items:

- обрив стрижнів ротора - присутній
- стан - не критичний
- виткові замикання обмоток стаора - відсутні
- несиметрія обмоток статора - відсутня
- якість кріплення до основи - задовільна
- дисбаланс ротора - присутній
- стан - не критичний

Below this panel is a button labeled 'Діагностика за спектрами потужностей'.

Рис. 4.10 – Програмне забезпечення системи діагностики. Вкладка «Діагностика»

4.2 Експериментальна перевірка розроблених методів

4.2.1 Експериментальна перевірка методу оцінювання поточного стану асинхронних двигунів

Для перевірки ефективності розробленого методу діагностики та оцінювання технічного стану АД на основі аналізу сигналу потужності та порівняння даного методу з методом гармонічного аналізу спектра струму, було проведено ряд дослідів з ідентичними АД типу АІР80В4У2, до яких штучно було внесено дефекти статора і ротора. Для дослідження параметричної несиметрії обмоток статора, у фазі С одного зі статорів зроблено відпайки відповідно до схеми на рис. 4.2. Для дослідження обриву короткозамкнених стрижнів у роторах висвердлено отвори для порушення електричного контакту стрижнів із короткозамкненим кільцем (згідно зі схемою на рис. 4.3). Оскільки двигуни є ідентичними, то для дослідження різних дефектів і їх комбінацій є можливість змінювати досліджувані ротори і статори.

Для аналізу вибрано випадки, при яких можна досліджувати розвиток ступеня таких дефектів, як обрив стрижнів ротора та параметрична несиметрія обмоток статора. Відповідність наявних дефектів порядковому номеру виконаних дослідів наведено у табл. 4.8. Усі досліді наведено для випадку роботи АД з номінальним навантаженням.

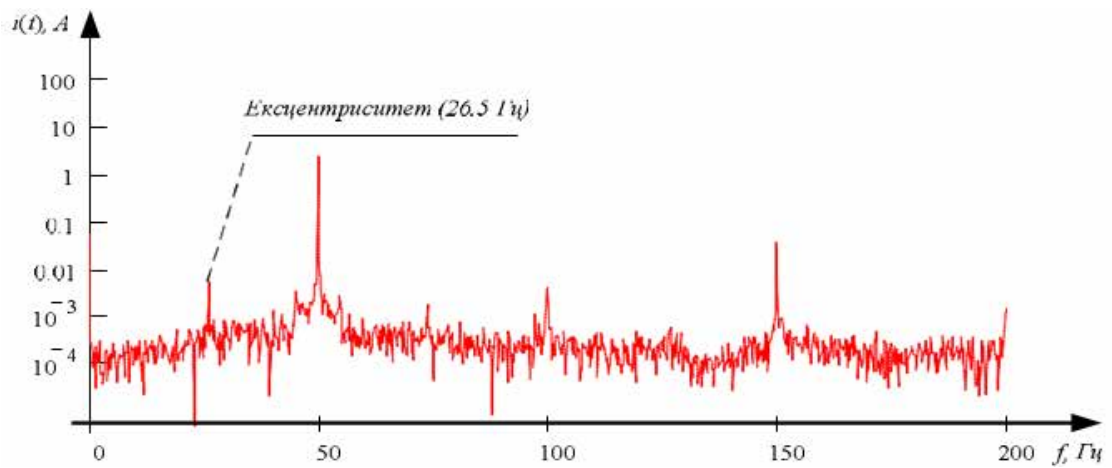
За попереднім аналізом спектрального складу фазного струму та потужності, а також сумарної потужності трьох фаз базового варіанта АД (дослід № 1) можна сказати, що досліджуваний АД без штучних пошкоджень має ексцентриситет, про що свідчить гармоніка на частоті обертання у спектрі сигналу струму (рис. 4.11, а) та її комбінації з основною частотою мережі живлення у спектрах сигналу потужності (рис. 4.11, б, в). Ексцентриситет пояснюється зміщенням центральної осі статора відносно центральної осі ротора внаслідок процедур збирання-розбирання досліджуваного АД.

На основі вимог ГОСТ 183-74 [95] та допустимих норм вібрацій АД згідно з ГОСТ 20815-93 [94] попередньо обчислено граничні значення аналізованих коефіцієнтів, що характеризують відповідний технічний стан двигуна. Аналіз

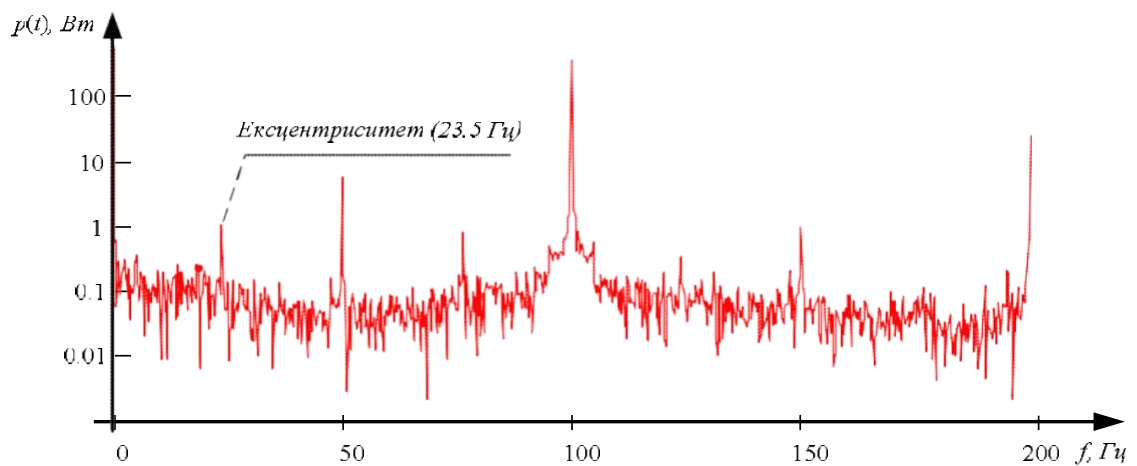
отриманих даних показав, що коефіцієнт потужності полігармонічних сигналів K_φ для дослідів 1–3 та 5–8 складає не більше 25 % від номінального значення. Тобто технічний стан двигуна відповідає правилу «задовільний», що свідчить про необхідність проведення додатково діагностики наявних дефектів. Для досліду 4 (замикання 14 % обмотки фази С статора) спостерігається перевищення допустимого значення змінної складової моменту, тобто стан двигуна «аварійний», і подальша робота може призвести до відмови. Такий висновок є справедливим, оскільки наявність виткових замикань навіть 5 % обмотки фази статора призводить до швидкого перегріву та аварійного виходу з ладу обладнання.

Таблиця 4.8 – Досліди зі штучними пошкодженнями АД

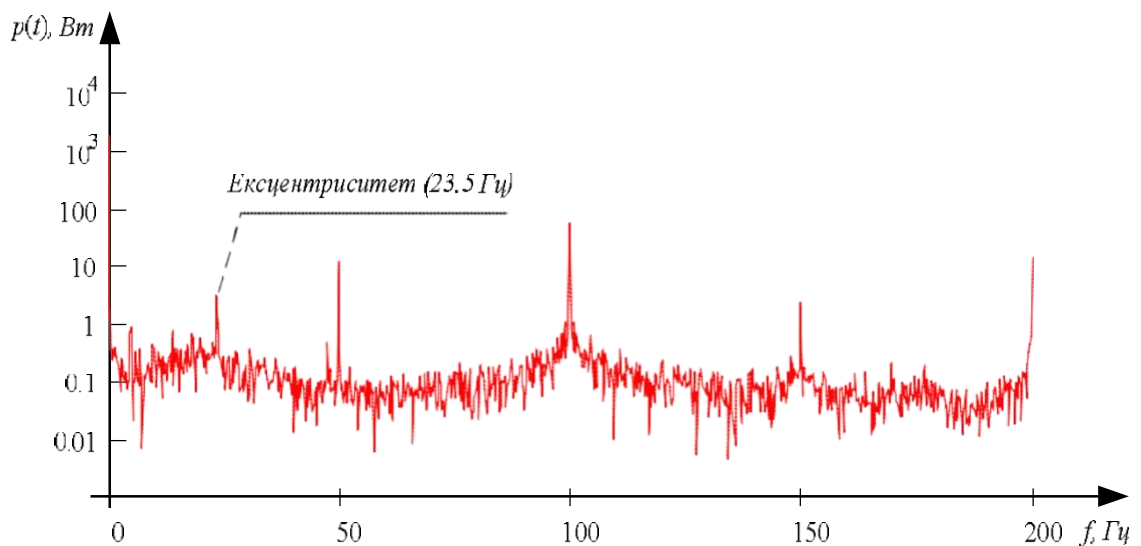
| № по р. | Тип пошкодження | % параметричної несиметрії фази С | Кількість обірваних стрижнів ротора |
|---------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Непошкоджений АД | - | - |
| 2 | Параметрична несиметрія обмоток статора | 0,3 | - |
| 3 | | 2,52 | - |
| 4 | | 14 | - |
| 5 | Обрив стрижнів ротора | - | 1 |
| 6 | | - | 2 |
| 7 | | - | 3 |
| 8 | Параметрична несиметрія обмоток статора та обрив стрижнів ротора | 2,52 | 1 |
| 9 | | 2,52 | 2 |
| 10 | | 2,52 | 3 |



а) спектр струму фази А



б) спектр потужності фази А



в) спектр сумарної потужності трьох фаз

Рис. 4.11 – Спектри електричних сигналів для досліді № 1

Таким чином, експериментально перевірено роботу методу оцінювання поточного технічного стану АД на основі логічних правил, сформульованих за аналізом значень діагностичних показників. Результат перевірки свідчить про

придатність методу до використання в реальних умовах задля можливості своєчасного виявлення небажаних та небезпечних режимів роботи АД з метою своєчасної діагностики наявних несправностей.

4.2.2 Експериментальна перевірка методу діагностики асинхронних двигунів на основі аналізу сигналу споживаної потужності

На основі експериментальних даних АД АИР80В4У2 для дослідів табл. 4.5 було перевірено роботу методу діагностики АД на основі аналізу сигналу споживаної потужності

Для оцінювання технічного стану АД було виконано гармонічний аналіз ділянки сигналів миттєвої потужності, електромагнітного моменту й струму, що містить велику кількість періодів. Це дозволило визначати частоти гармонік сигналів з точністю до десятих герца, а також аналізувати низькочастотний спектр сигналів.

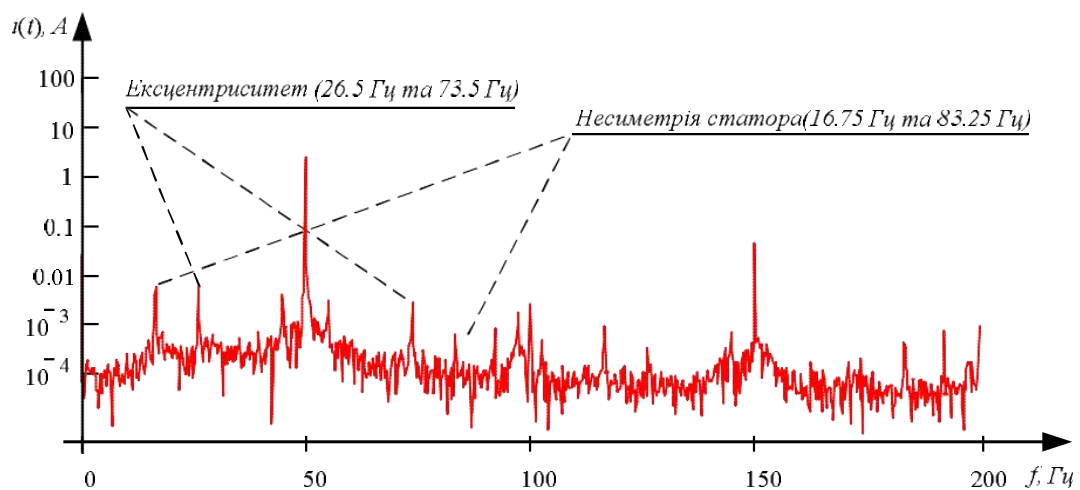
Проведено аналіз експериментальних даних для найбільш характерних випадків: параметричної несиметрії фази С на рівні 2,52 %, обриву двох стрижнів ротора та наявності одночасно двох розглянутих дефектів (табл. 4.2 досліди № 3, 6 та 8 відповідно).

Для випадку параметричної несиметрії обмоток статора у спектрі сигналу струму фази АД, окрім гармонік, пов'язаних з ексцентриситетом ротора, виникають гармоніки на частотах, розрахованих згідно з виразом 2.5, які викликані несиметрією обмоток статора (рис. 4.12, а). У спектрі сигналу потужності фази та у спектрі сигналу сумарної потужності трьох фаз виникають гармоніки, що визначаються згідно з 2.13 (рис. 4.12, б, в). Слід зазначити, що амплітуди гармонік потужності, пов'язаних з несиметрією статора, є більшими амплітуд аналогічних гармонік спектра струму.

За наявності обриву стрижнів ротора у спектрі сигналу струму з'являються бічні гармоніки основної частоти мережі живлення, що визначаються згідно з 2.1 (рис. 4.13, а). У спектрах потужності фази та сумарної потужності трьох фаз, окрім бічних гармонік подвійної частоти мережі живлення, виникає низькочастотна складова на частоті модуляції (в даному випадку 5,5 Гц), яка є додатковою

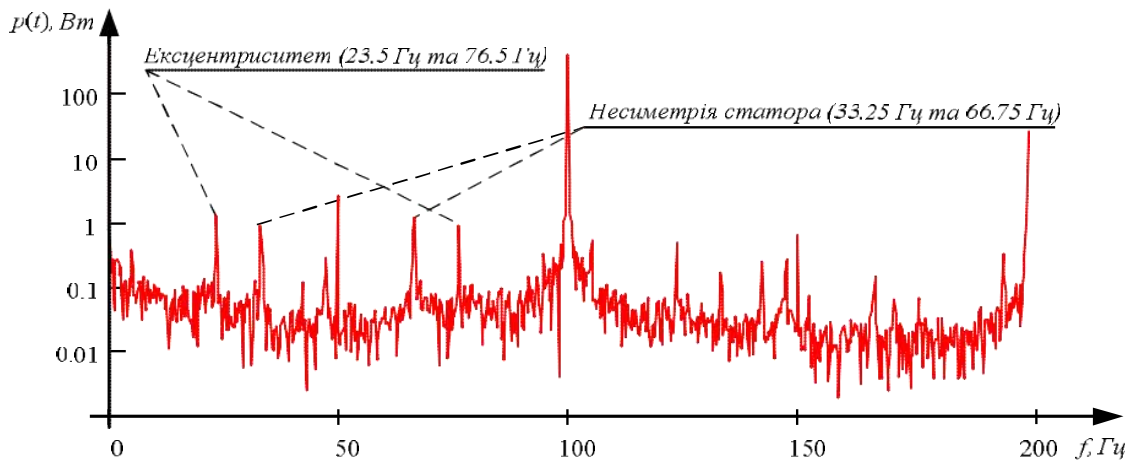
діагностичною ознакою (рис. 4.13, б, в). Цей факт підтверджує теоретичні висновки розділу 2 та справедливість виразу 2.9.

У випадку наявності одночасно двох розглянутих дефектів, гармоніки, пов'язані з несиметрією обмоток статора, є досить незначними, порівняно з іншими гармоніками спектра, і можуть бути помилково визначені як завади (рис. 4.14, а). У спектрах сигналів потужності амплітуди гармонік, пов'язаних з несиметрією, легко визначити. Також легко визначити гармоніки, пов'язані з обривом стрижнів (рис. 4.14, б, в). Таким чином, проведений аналіз показав, що діагностика дефектів АД, проведена за аналізом спектра потужності є більш надійною, оскільки містить більшу кількість діагностичної інформації, оперує з більшими амплітудами гармонік, пов'язаних з дефектами, а також придатна для визначення одночасно наявних дефектів. Застосування розроблених логічних правил для діагностики розглянутих дефектів також дало змогу безпомилково визначити всі розглянуті пошкодження АД.

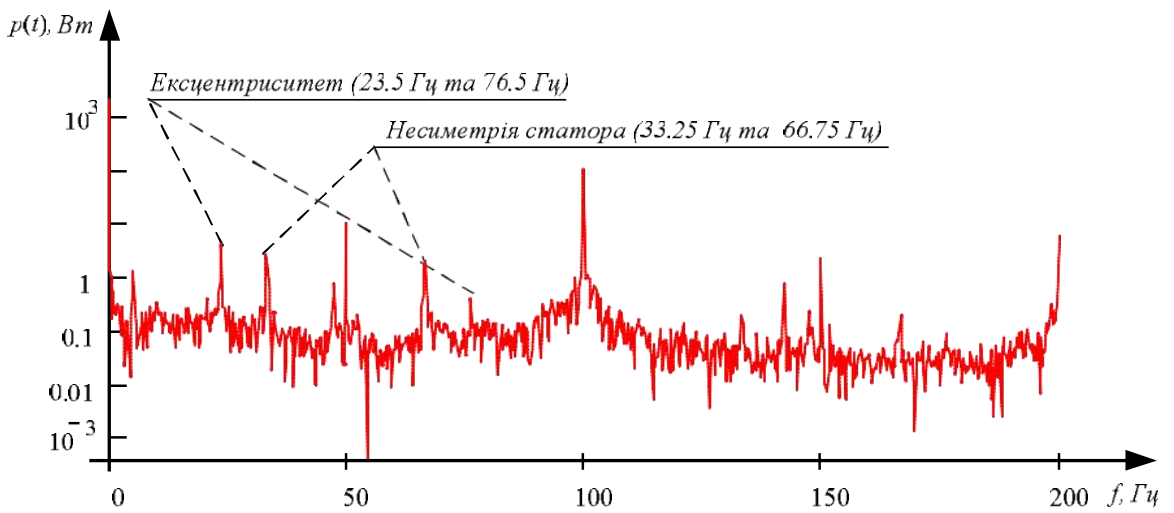


а) спектр струму фази А

Рис. 4.12 – Спектри електричних сигналів для досліду № 3(початок)

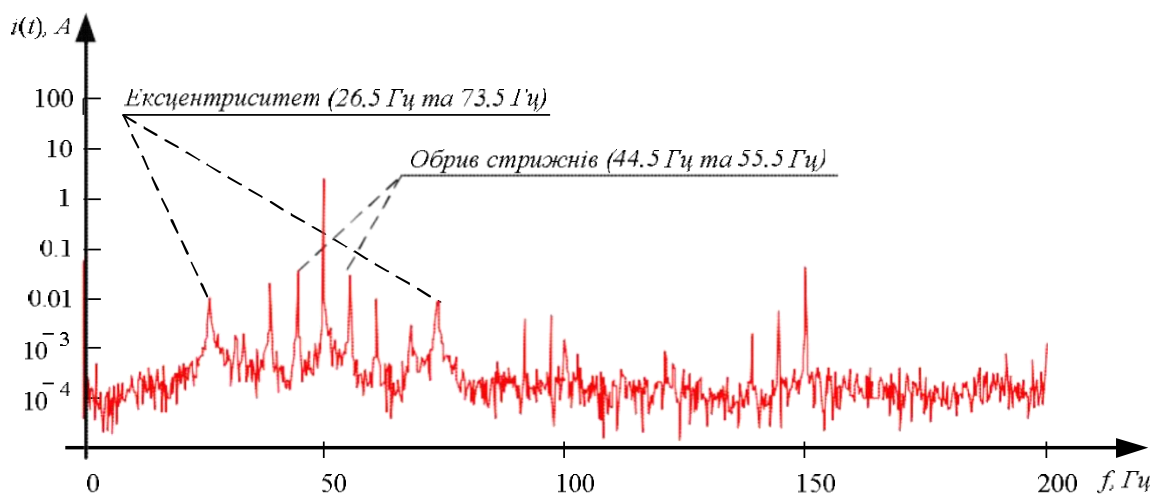


б) спектр потужності фази А



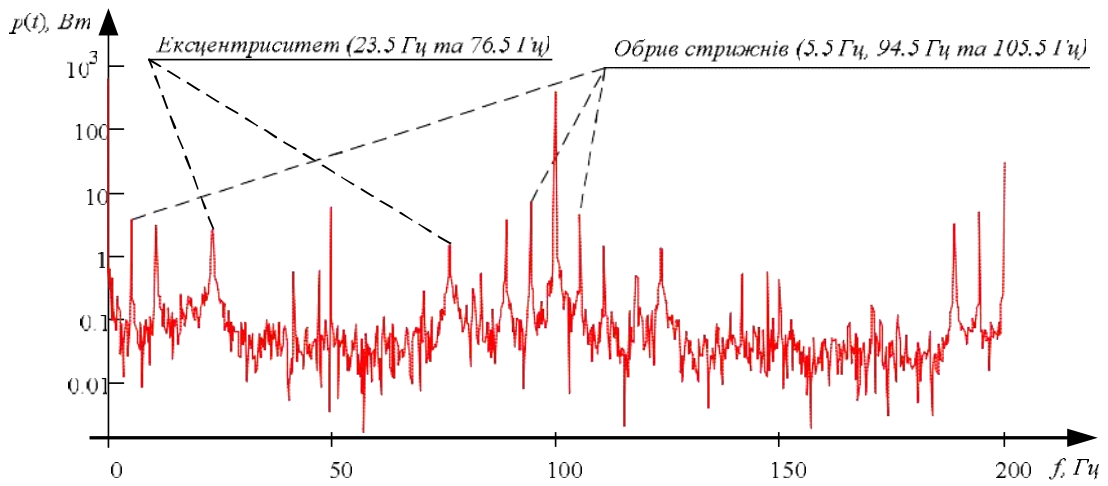
в) спектр сумарної потужності трьох фаз

Рис. 4.12 – Спектри електричних сигналів для досліду № 3 (продовження)

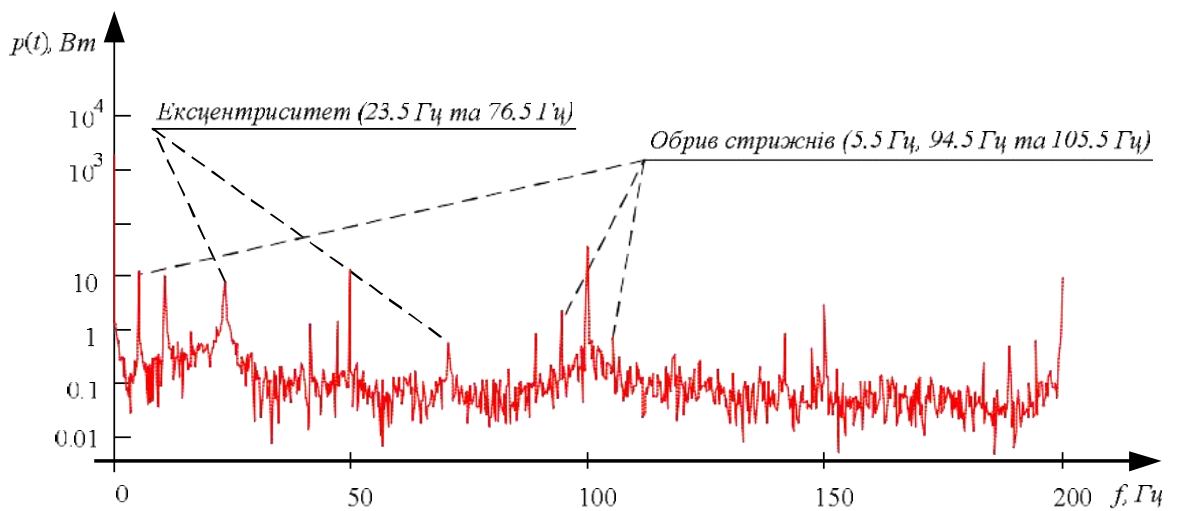


а) спектр струму фази А

Рис. 4.13 – Спектри електричних сигналів для досліду № 6 (початок)

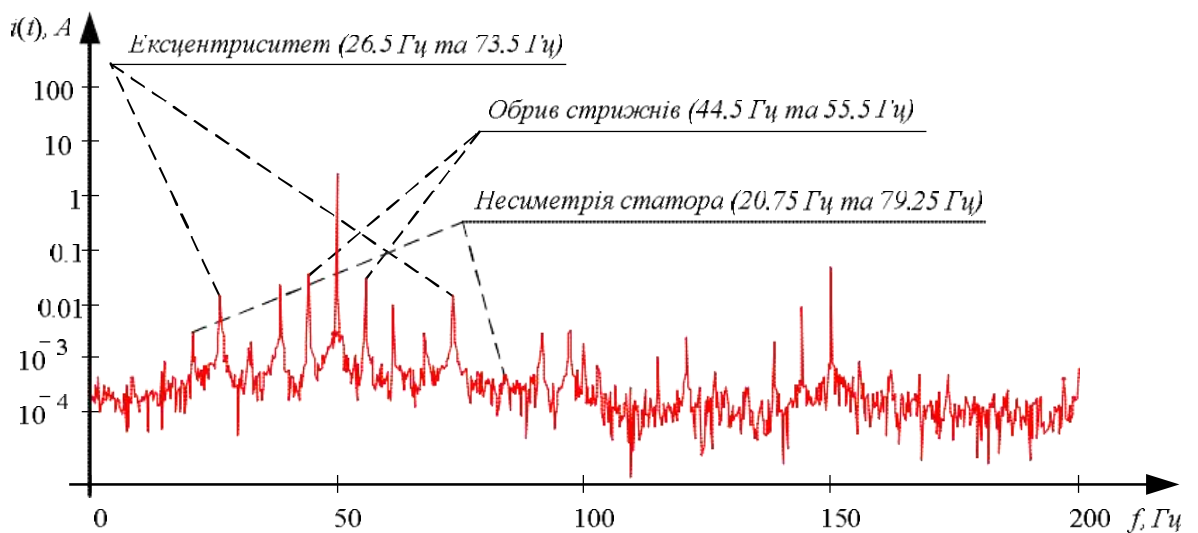


б) спектр потужності фази А



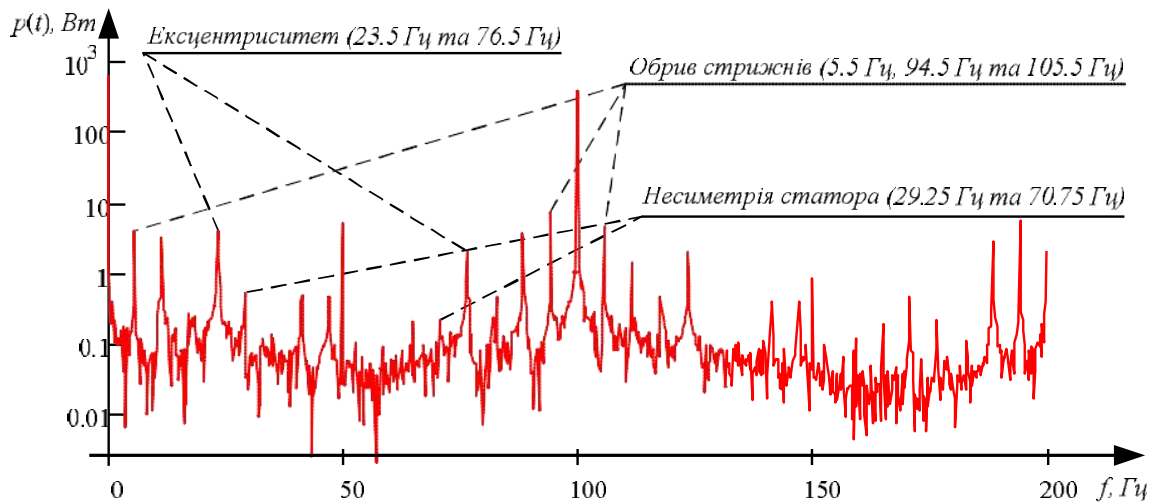
в) спектр сумарної потужності трьох фаз

Рис. 4.13 – Спектри електричних сигналів для досліду № 6 (продовження)

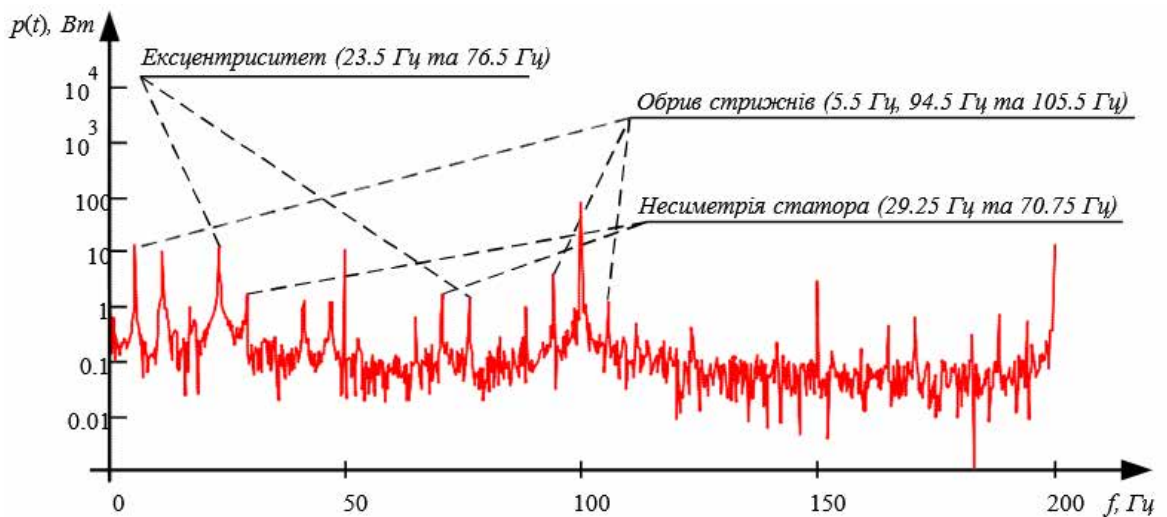


а) спектр струму фази А

Рис. 4.14 – Спектри електричних сигналів для досліду № 8 (початок)



б) спектр потужності фази А



в) спектр сумарної потужності трьох фаз

Рис. 4.14 – Спектри електричних сигналів для досліду № 8 (продовження)

Таким чином, експериментальна перевірка методу діагностики АД на основі аналізу сигналу споживаної потужності показала придатність методу для виявлення найбільш поширених дефектів АД, у тому числі й за наявності одночасно кількох дефектів. Показано можливість оцінювання ступеня розвитку дефекту за значенням амплітуди відповідної гармоніки та аналізом сукупності сформованих у роботі діагностичних показників.

ВИСНОВОК

Проведений аналіз методів та систем діагностики асинхронних двигунів показав, що на даний момент найбільш перспективними є системи, основані на аналізі електричних сигналів. Такі системи вирізняються відносною дешевизною та простотою використання. Більшість таких систем ґрунтується на аналізі сигналу струму, який найпростіше отримати та який може містити інформацію про стан електромеханічної системи. Однак слід зазначити, що існуючі системи діагностики на основі аналізу як струму, так і напруги все ще поступаються більш дорогим системам вібродіагностики у точності діагностичної інформації. Виходом є використання сигналу потужності для аналізу. Цей сигнал містить усі ознаки як сигналу струму, так і напруги, до того ж містить додаткові гармонічні складові, які можна використати як діагностичні ознаки. При цьому використання в системі діагностики одночасно датчиків струму і напруги не збільшить суттєво вартості діагностичного обладнання. Таким чином, розроблюване обладнання системи діагностики асинхронних двигунів повинно бути побудовано з огляду на можливість аналізу сигналу потужності АД.

Програмне забезпечення для реалізації методів діагностики на основі аналізу електричних сигналів було створено у середовищі LabVIEW. Математичне забезпечення, яке було покладено в основу програми діагностики, базується на основі виразів, розроблених у другому розділі, і надає можливість виконувати діагностику як за аналізом спектра фазного струму, так і за аналізом сигналу потужності.

Таким чином, експериментальна перевірка методу діагностики АД на основі аналізу сигналу споживаної потужності показала придатність методу для виявлення найбільш поширених дефектів АД, у тому числі й за наявності одночасно кількох дефектів. Показано можливість оцінювання ступеня розвитку дефекту за значенням амплітуди відповідної гармоніки та аналізом сукупності сформованих у роботі діагностичних показників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бешта О. С. Ідентифікація параметрів електропривода в задачах енерго- і ресурсозбереження (розвиток теорії, розробка і впровадження) : автореферат дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.09.03 / О.С. Бешта. – Дніпропетровськ, 2001. – 38 с.
2. Бешта О. С. Спектральний аналіз потужності в задачах діагностики стану електромеханічних систем / О. С. Бешта, І. І. Пельтек, О. В. Балахонцев // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2010 – № 28. – С. 531–532.
3. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
4. Васьковский Ю. Н. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора / Васьковский Ю. Н., Гераскин А. А. // Технічна електродинаміка : науково-прикладний журнал. – Київ : ІЕД НАН України. – 2010. – № 2. – С. 56–61.
5. Васьковский Ю. М. Математичне моделювання електрофізичних процесів в ушкодженій з'єднувальній шині обмотки ротора турбогенератора / Ю. М. Васьковский, О. І. Титко // Технічна електродинаміка : науково-прикладний журнал. – Київ : ІЕД НАН України. – 2010. – № 4. – С. 33–37.
6. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования (ISO 10816-1:1995) : ГОСТ ИСО 10816-1-97. – [Введен в действие 01.07.1999]. – Мн. : ИПК Издательство стандартов, 1998. – 18 с. – (Межгосударственный стандарт).
7. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
8. Вольдек А. И. Электрические машины. Машины переменного тока / А. И. Вольдек, В. В. Попов : учебник [для вузов]. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.
9. Генкин М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
10. Гольдберг О. Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг, И. М. Абдулаев, А. Н. Абиев.

- М. : Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
11. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин : учебн. [для вузов] / О. Д. Гольдберг. – [2-е изд.]. – М. : Высш. шк., 2000. – 255 с.
 12. Гольдберг О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг. – М. : Высш. шк., 1968. – 176 с.
 13. Гольдберг О. Д. Надёжность электрических машин общепромышленного и бытового назначения / О. Д. Гольдберг. – М. : Знание, 1976. – 58 с.
 14. Евдокимов Ю. К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков – М. : ДМК Пресс, 2007. – 400 с.
 15. Захарченко П. І. Контроль справності обмоток короткозамкнених асинхронних електродвигунів / П. І. Захарченко, В. Ф. Сивокобиленко, Д. В. Полковніченко та ін. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ, 2005.–Вип. 4/2005(33). – С. 89–92.
 16. Зеленов А. Б. Теория электропривода. Часть I : учебн. пособ. / А. Б. Зеленов. – Алчевск : ДонГТУ, 2005. – 394 с.
 17. Зеленов А. Б. Теория электропривода. Часть II : учебн. пособ. / А. Б. Зеленов. – Алчевск : ДонГТУ, 2005. – 513 с.
 18. Зиновьев Г. С. Определение результирующих энергетических показателей вентильных преобразователей / Г. С. Зиновьев // Силовые вентильные преобразователи. – Новосибирск : НЭТИ. – 1984. – С. 89–100.
 19. Ильинский Н. Ф. Критерий эффективности процесса электромеханического преобразования энергии / Н. Ф. Ильинский, А. О. Горнов // Электричество. – 1987. – № 10. – С. 24–29.
 20. Инкин А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин : учебное пособие / А. И. Инкин. – Новосибирск : ООО «Издательство ЮКЭА», 2002. – 464 с.
 21. Калинов А. П. Исследование работы асинхронных двигателей при повреждении обмоток ротора / А. П. Калинов, Ж. И. Ухань, Ю. А. Топчиенко // Тези доповідей шостої всеукр. НТК мол. учен. і спец. “Електромеханічні

- системи методи моделювання та оптимізації”. – Кременчук : КДПУ. – 2008. – С. 73–74.
22. Калинов А. П. Универсальное учебно-исследовательское оборудование для электромеханических лабораторий / А. П. Калинов, А. И. Гладырь // Щоквартальний науково-виробничий журнал Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 1. – Кременчук : КДПУ. – 2007. – С. 14–19.
23. Калинов А. П. Энергетические характеристики асинхронных двигателей в динамических режимах работы / А. П. Калинов, Д. Г. Мамчур, А. В. Чумачёва // Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету : (техн. науки). – Дніпродзержинськ : ДДТУ. – 2009. – Вип. № 1 (11). – С. 104–110.
24. Луговой А. В. Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока / А. В. Луговой, М. Н. Максимов, Д. И. Родькин и др. // Проблемы создания новых машин и технологий. – [Сб. статей]. – Кременчук : КГПИ. – 1999. – Вып. 1 (8). – С. 150–156.
25. Никулин Е. А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем : учеб. пособие [для вузов] / Е. А. Никулин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
26. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. – [Введён в действие 01.01.1999]. – Мн. : ИПК Издательство стандартов, 1998. – 31 с. – (Межгосударственный стандарт).
27. Объём и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45- 51.300-97 Производственно-практическое издание. – М. : Издательство НЦ ЭНАС, 2006. – 255 с.
28. Огарь В. А. Учет потерь в стали при оценке характеристик асинхронного двигателя / В. А. Огарь, Д. И. Родькин, А. П. Калинов // Технічна електродинаміка. – Науково-прикладний журнал. – Киев : ІЕД НАН України. – 2008. – Тематичний випуск. Ч. 7. – С. 31–35.
29. Прус В. В. Оценка эксплуатационных параметров отремонтированных асинхронных двигателей / В. В. Прус, О. Ф. Кирьянов, А. С. Гераскин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Наукові

праці КДПУ. – Кременчук : КДПУ, 2001. – Вип. 1/2002 (12). – С. 174–179.

30. Родькин Д. И. Декомпозиция составляющих мощности полигармонических сигналов / Д. И. Родькин // Электротехника. – 2003. – № 6. – С. 34–37.