

**Міністерство освіти і науки,
молоді та спорту України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»**

О. О. ЗАКЛАДНИЙ

УДК 62-83-52.003(082)

**ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
СИСТЕМ**

МОНОГРАФІЯ

Київ – 2013

УДК 62-83-52.003(082)

ББК 31.261.63-04

3-18

*Рекомендовано вченою радою інституту енергозбереження та енергоменеджменту
НТУУ «КПІ» (Протокол № 4 від 26.11.2012)*

Рецензенти: завідувач кафедри «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв»
Національного технічного університету України «КПІ»,
д-р техн. наук, професор Шевчук С.П.;
професор кафедри «Автоматизації управління електротехнічними
комплексами» Національного технічного університету України «КПІ»,
д-р техн. наук, професор Чермалих В.М.

Закладний О.О.

Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія /
О.О. Закладний – К.: Видавництво «Лібра», 2013. – 195 с.: ил.

ISBN 978-617-693-003-0

У монографії розглядається нова технологія діагностування енергоефективності електромеханічних систем для зниження їх електроспоживання і виявлення джерел неефективного використання енергії. Технологію засновано на контролюванні у реальному часі енергоефективності електромеханічних систем засобами функціонального діагностування, обслуговуванні за фактичним станом та безперервному захисті під час експлуатації. Значну увагу приділено дослідженню технічного стану і енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами.

Для наукових співробітників, інженерів, викладачів, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів.

УДК 62-83-52.003(082)

ББК 31.261.63-04

ISBN 978-617-693-003-0

© О.О. Закладний

© Лібра 2013

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	6
 1 МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ	 9
1.1 Загальні положення.....	9
1.2 Методи та засоби діагностування електромеханічних систем.....	15
1.3 Класифікація методів діагностування електромеханічних систем з асинхронними двигунами.....	25
 2 ЗАВДАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	 39
2.1 Фактори впливу на енергоефективність і технічний стан електромеханічних систем з асинхронними двигунами	39
2.2 Вплив якості напруги живлення на електромеханічні системи з синхронними двигунами.....	53
2.3 Завдання моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем	61
 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ.....	 67
3.1 Аварійні режими асинхронних двигунів..	67
3.2 Методичні рекомендації щодо визначення аварійних режимів асинхронних двигунів	73
3.3 Визначення технічного стану електромеханічних систем з асинхронними двигунами.....	96
3.4 Теплова модель асинхронних двигунів з урахуванням впливу якості напруги живлення	105
3.5 Прогнозування залишкового ресурсу асинхронних двигунів.....	109

3.6 Визначення енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами.....	114
3.7 Техніко-економічний ефект від впровадження функціонального діагностування електромеханічних систем.....	118
3.8 Вартість життєвого циклу електромеханічних систем.....	124

4 ЗАСОБИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	127
4.1 Схемно-технічні рішення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем.....	127
4.2 Алгоритм функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами.....	136
4.3 Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами...	140
4.4 Алгоритми теплового і струмового захисту асинхронних двигунів для засобів функціонального діагностування електромеханічних систем	147
4.5 Мобільний програмно-апаратний комплекс для функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем	153

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	162
------------------------	-----

ДОДАТОК А (Вимоги до енергетичних показників асинхронних двигунів і показників якості електроенергії.....)	178
ДОДАТОК Б (Протоколи програм діагностування).....	181

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ

ЕМС – електромеханічна система;

ЕП – електричний привод;

АЕП – асинхронний електропривод;

АД – асинхронний електродвигун;

СД – синхронний електродвигун;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ГЕН – графік електричного навантаження;

ПЯЕ – показники якості електроенергії;

ЕН – електричне навантаження;

CEMER – Comite European de Constructeurs de Machines Electriques et d'Electronique de Puissance;

IE – international Efficiency;

LCC - analysis – Life Cycle Costs analysis;

ВС - вимірювальні системи;

АСУ ТП - автоматизовані системи управління технологічними процесами;

АСУП - автоматизовані системи управління підприємствами;

SCADA - системи збору даних і оперативного диспетчерського управління;

MES (Manufacturing Execution Systems) - інформаційні системи управління виробництвом;

АКФ – автокореляційна функція;

ПФ – передатна функція;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ПЕОМ – персональна електронна обчислювальна машина;

СКЗ - середньоквадратичне значення;

КЗ – коротке замикання;

ЕРС – електрорушійна сила;

СР – споживачі-регулятори.

ВСТУП

Енергозбереження – найважливіше завдання сьогодення. Одним з актуальних завдань є підвищення ефективності енерговикористання. Значні резерви економії енергії мають електромеханічні системи (ЕМС) з електроприводом, оскільки оснащені ним машини і установки є одними з найбільш енергоємних споживачів електроенергії (понад 60% виробленої у світі електричної енергії споживається ЕМС).

Частка ЕМС з асинхронними електродвигунами (АД) становить близько 80% [1–4]. Регульовані асинхронні електроприводи (АЕП) зі складним технологічним процесом становлять невелику частку від загальної їх кількості. Основна ж їх частина – прості, зазвичай нерегульовані масові АД, які приводять в дію вентилятори, насоси, конвеєри, підйомні механізми тощо. Саме ці ЕМС з АД є основними споживачами електроенергії і тут можлива реальна її економія.

Значна частина промислових установок і механізмів на підприємствах України експлуатуються з перевищенням установленого строку служби, що призводить до їх високої аварійності та виходу з ладу АЕП [5,6]. Наприклад, близько 80% установок і механізмів гірничовидобувних підприємств в Україні експлуатуються з перевищенням установленого строку служби, а його середнє значення для АЕП в галузі не перевищує 5 років.

Щороку виходять з ладу до 30% АД у гірничовидобувній, 20% - у машинобудівній промисловості, 15% - у металургійній, 55% - у будівництві, 15 – 25% - у сільському господарстві, 25% - у промисловості будівельних матеріалів, 25% - у харчовій промисловості, 10 -15% - у хімічній, 20% - у машинобудуванні [8]. Переважна більшість двигунів може ремонтуватися 3–4 рази й після ремонту часто не відпрацьовує навіть одного року, а третина з них – і трьох місяців [4].

Експлуатація ЕМС з АД, яка супроводжується численними ремонтами, призводить до того, що на підприємствах використовується АЕП, реальні

енергетичні показники якого значно нижчі декларованих виробником, а середній строк служби двигунів не перевищує 5–7 років.

За умови правильної експлуатації АЕП має досить високі енергетичні показники та рівень надійності. Експлуатація АЕП, що знаходиться в незадовільному технічному стані, призводить до зростання фінансових витрат (до 10%), які обумовлені зростанням електроспоживання внаслідок збільшення втрат у вузлах агрегату [41]. До того ж має місце фізичне старіння конструкційних матеріалів, що виражається в зростанні втрат у сталі й міді, а також у зниженні навантажувальної спроможності АЕП. Відбувається неякісне перетворення енергії, яке супроводжується додатковим нагріванням та вібрацією устаткування, збільшенням реактивної потужності, що споживається.

Основними причинами низької енергоефективності ЕМС та виникнення аварій є недостатній рівень експлуатації, неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан обладнання, відсутність ефективного безперервного захисту двигунів, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт тощо [6].

Однією з перешкод широкому впровадженню енергозбереження в життя є те, що управління раціональним використанням енергії не поширюється на конкретного технологічного споживача – ЕМС. Енергоефективність її оцінюється аперіодично, наприклад, під час проведення енергетичного аудиту [1,9]. Перспективним підходом методології енергоменеджменту є впровадження постійно діючого моніторингу та діагностування енергоефективності й технічного стану ЕМС для оперативного реагування на погіршення її стану і порушення технологічного режиму [14,36].

Ефективність енергозберігаючих заходів значною мірою визначається енергоефективністю ЕМС, і нині вона лишається низькою. В літературі [2,3,9-15,45] з питань енергоефективності ЕМС пропонуються проекти з енергозбереження, але їх реалізація потребує значних коштів. Окремим заходом енергозбереження може стати використання засобів моніторингу та

діагностування енергоефективності й технічного стану ЕМС, вартість яких значно нижча у порівнянні з витратами на реалізацію проектів енергозбереження.

Застосування інструментарію моніторингу та діагностування енергоефективності й технічного стану ЕМС дозволить: зменшити витрати електроенергії; здійснювати попереджувальне обслуговування ЕМС у реальному часі та керування їх енергетичним і технічним станом з ефективним безперервним захистом від аварійних режимів роботи; виявляти неефективні режими роботи ЕМС та приймати обґрунтовані рішення щодо подальшої їх експлуатації; мінімізувати збитки від пошкодження устаткування за рахунок вчасного виявлення несправностей; вирішувати завдання автоматизації ЕМС.

Також слід ураховувати тенденцію до переходу від використання окремих приладів енергоаудиту до мобільних комп'ютеризованих комплексів, що дозволить отримати повну якісну й кількісну інформацію щодо процесів, які відбуваються в ЕМС, та їх параметрів.

1 МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Загальні положення

Практично всі процеси, пов'язані з механічною енергією та рухом, здійснюються електроприводом [35]. Виняток становлять автономні транспортні засоби (автомобілі, літаки тощо), які використовують неелектричні двигуни. У відносно невеликій кількості промислових установок використовується гідропривод, ще рідше – пневмопривод.

Електроприводом оснащено до 85% всіх технологічних механізмів (насоси, компресори, вентилятори, ліфти, конвеєри, станки, різноманітні технологічні машини, побутова техніка тощо). Отже, АЕП є основою більшості виробничого устаткування [1,2].

Сфера застосування електропривода в промисловості, на транспорті й у побуті постійно розширюється. У деяких галузях промисловості – гірничовидобувній та металургійній – споживання електроенергії електроприводом сягає 80% [1,5,77-80,122]. Лише на одному потужному гірничо-металургійному комплексі ВАТ «Криворіжсталь» встановлено понад 30000 електродвигунів потужністю понад 2000 МВт [26].

Низька надійність електротехнічного комплексу промислових підприємств, наявність вищих гармонік в мережі, поява нових технічних засобів призводять до зростання плати за електроенергію, скорочення строку служби і збільшення витрат на технічне обслуговування та ремонт електрообладнання. Значне споживання реактивної потужності призводить до збільшення втрат потужності й напруги, що погіршує якість електроенергії як у системі електропостачання, так і в мережі підприємства. Перевантаження елементів системи електропостачання підприємства обумовлено високим рівнем споживання реактивної потужності, що значною мірою впливає на процес видобутку та перероблення корисних копалин.

Однією з найважливіших проблем підвищення конкурентоздатності вітчизняної продукції на світовому ринку є зниження енергетичної складової в структурі її собівартості. Вартість електроенергії, яку споживає ЕМС з АД протягом життєвого циклу (строку експлуатації), значно перевищує вартість устаткування і витрати на обслуговування [3]. Експлуатація ЕМС, які знаходяться в незадовільному технічному стані, призводить до збільшення фінансових витрат, зумовлених зростанням електроспоживання [16]. Крім того, плата за електроенергію містить систему надбавок за додатково спожиту реактивну потужність. Плата за реактивну потужність на підприємствах становить до 10% від загальних витрат коштів на електроенергію, і ці витрати мають тенденцію до зростання.

АД розраховано на строк служби 15 – 20 років без капітального ремонту за умови його експлуатації відповідно до ТУ і виконання. На практиці має місце значне відхилення від проєктних режимів експлуатації. Наслідками таких відхилень є низький рівень енергоефективності і виникнення аварійних режимів роботи електропривода.

Вихід з ладу електропривода може призвести до складних аварій та порушення безперервності технологічного процесу, зупинки взаємопов'язаного виробничого устаткування, значних витрат на ремонт АЕП, а також на поновлення технологічного процесу, що супроводжується значними витратами, а іноді й створює загрозу безпеці життя людини. Фінансові збитки також пов'язані з браком та недовідпуском продукції. Крім цього робота в аварійних режимах призводить до підвищеного енергоспоживання і збільшення реактивної потужності, що споживається.

Аварії поділяються на технологічні – близько 35%, експлуатаційні – 50% та конструкційні – 15% [7]. У більшості випадків (85–95%) відмови АЕП трапляються через пошкодження обмоток та розподіляються таким чином: міжвиткові замикання – 93%, пробій міжфазної ізоляції – 5%, пробій пазової ізоляції – 2%. На підшипниковий вузол приходиться 5–8% відмов. Також

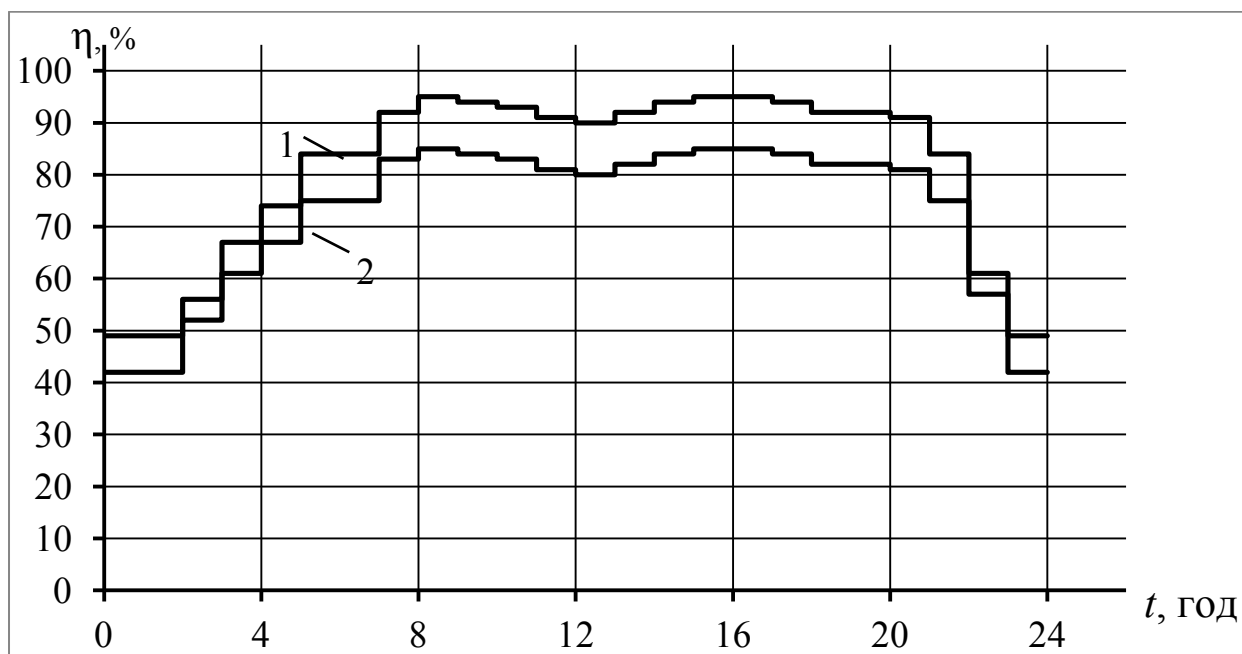
невеликий відсоток їх зумовлено такими причинами, як дефекти розпаювання вивідних кінців, скручення валів, розрив стрижнів ротора.

За статистикою до 50% електродвигунів виходять з ладу внаслідок незадовільної системи захисту. В більшості випадків тепловий захист взагалі відсутній. Застосування надійного й ефективного захисту від аварійних режимів роботи за допомогою моніторингу й діагностування дозволить завчасно виявити аварійний режим і вимкнути електрообладнання, значно скоротити кількість і частоту аварійних ситуацій та подовжити строк служби двигунів, зменшити витрату електроенергії, а також експлуатаційні витрати та зберегти життя й здоров'я працівників промислових підприємств.

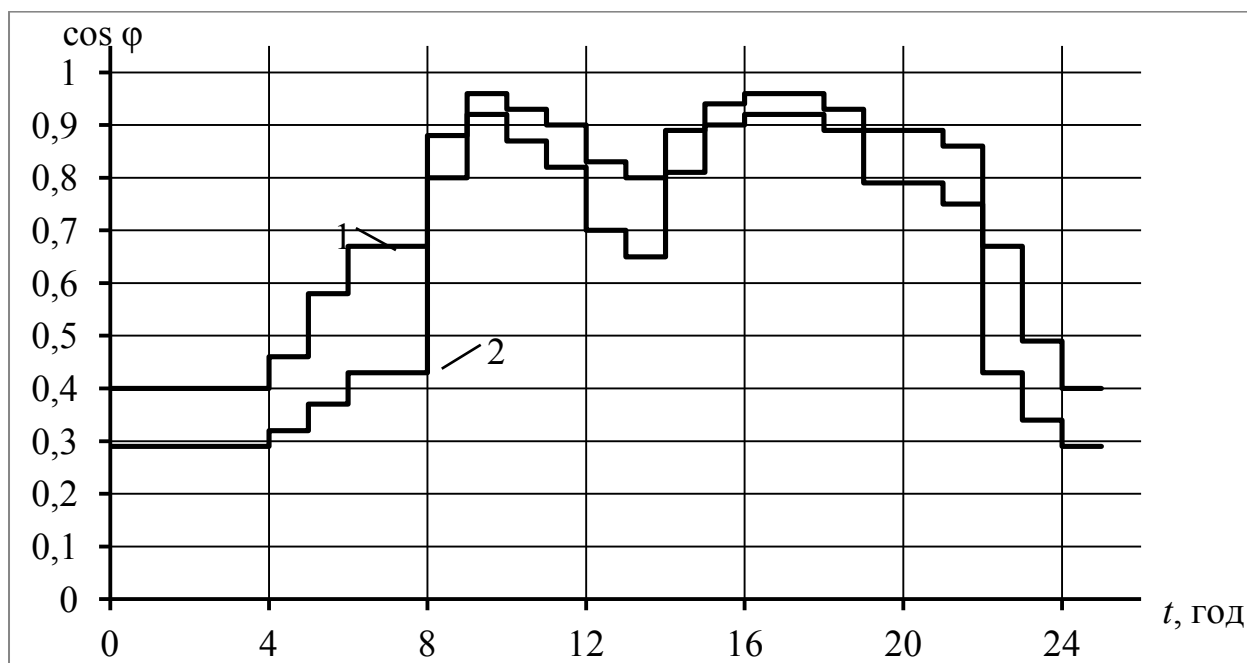
Переважає більшість АЕП після ремонту повертається на підприємство і експлуатується до наступного виходу з ладу. Після ремонту параметри й характеристики машин значно відрізняються від заводських, і, по суті, відремонтований двигун – це інша електрична машина. Така машина вимагає іншого підходу до її оцінки з позиції якості перетворення енергії. Зниження якості електричної машини - це відхилення параметрів і характеристик, обумовлених проектом: несиметрія електричних параметрів, зміна геометрії, ушкодження сталі статора й ротора, фізичне старіння елементів, низькі показники енергоефективності, ККД та $\cos \phi$ (рис. 1.1).

Неякісність перетворення енергії в електричній машині призводить до того, що частина енергії йде не на виконання корисної роботи, а на додаткове нагрівання й вібрацію. У такій машині навіть симетрична номінальна напруга може призвести до насичення сталі, зниження потужності, а згодом – перегрівання й виходу з ладу.

Існує взаємозв'язок між якістю електроенергії, режимом навантаження, технічним станом та процесами перетворення енергії ЕМС. Аварійність та енергоефективність ЕМС визначається комплексом “мережа-двигун-навантаження”.



а



б

Рис. 1.1 Показники енергоефективності ЕМС ККД (а) та $\cos \varphi$ (б):

1 – паспортні; 2 – після ремонту

Питання підвищення енергоефективності АЕП промислових установок і механізмів вирішуються різними шляхами. Характерною для них є відсутність єдиного підходу до цієї проблеми [10,17,18]. В літературі, присвяченій питанням енергоефективності АЕП [2,3,11,12, 109,110], розглядаються такі шляхи енергозбереження:

- перехід від нерегульованого АЕП до регульованого (він висвітлюється, як такий, що має найбільший ефект на перспективу);

- перехід на енергозберігаючі двигуни поліпшеної конструкції та усунення проміжних передач;

- вибір раціонального типу, режимів роботи й експлуатації АЕП для конкретної технологічної установки;

- економія електроенергії робочими установками і механізмами за рахунок підвищення ефективності технологічного процесу.

Одним з механізмів втілення енергозбереження в життя є енергетичний менеджмент [114]. Дотепер в енергетичному менеджменті деталізоване управління раціональним використанням енергії не поширювалося на конкретного технологічного споживача, його режими роботи. В першу чергу розглядалось підприємство в цілому або певна технологічна лінія. Контроль конкретного обладнання, наприклад, ЕМС, не був постійним і безперервним та відбувався за фактом, а не в реальному часі, коли неефективне споживання електроенергії мало місце значний проміжок часу.

Останнім часом енергетичний менеджмент набуває нових рис, а саме, – він став поширюватися на кінцевого споживача [1]. Це є новим стандартом у методології енергетичного менеджменту – запроваджуються високий ступінь деталізації, моніторинг та діагностування енергоефективності й технічного стану АЕП і, відповідно, оперативне реагування на їх погіршення.

У проектуванні технологічного процесу під час вибору АЕП не береться до уваги його енергоефективність протягом усього життєвого циклу. На сьогодні повинні розглядатися не просто режими завантаження електропривода

і не лише його робочі характеристики та енергоефективність на даний момент – слід здійснювати оцінювання енергоефективності за весь життєвий цикл.

Тому на сьогодні актуальним є завдання розроблення і широкого впровадження засобів моніторингу та діагностування енергоефективності й технічного стану АЕП, які дозволять вирішити проблему енергозбереження на промислових підприємствах. Основні витрати на розроблення таких систем приходяться не на створення апаратної частини системи, а на методичне й програмне забезпечення. Згідно [92] річний економічний ефект від зниження витрат під час використання системи технічного діагностування на потоковій технологічній лінії з розрахунку на один електродвигун потужністю 5 кВт становить 100 у.о., а строк окупності пристрою – 3 роки.

Створення таких систем особливо актуальне для гірничовидобувних підприємств і галузей, схильних до впливу численних випадкових факторів, які істотно ускладнюють ефективне управління цими складними динамічними об'єктами, що взаємодіють з довкіллям і ринковим середовищем.

Питання моніторингу та діагностування ЕМС з АД займають провідне місце в дослідженнях, спрямованих на підвищення енергоефективності, надійності та ресурсу устаткування.

Найближчими за функціональною побудовою до систем моніторингу та діагностування є електронні системи обліку електричної енергії та системи вимірювання якості електроенергії на основі промислових засобів автоматизації [89]. Однак, володіючи розвиненими функціями вимірювання та оброблення даних, вони, з одного боку, не забезпечують аналізу отриманої інформації про енергетичні процеси, а з іншого – зовсім не призначені для моніторингу ЕМС, оскільки не мають функції математичного моделювання.

На сьогодні постала необхідність застосування нових технічних рішень і наукових підходів до вирішення проблеми підвищення рівня енергоефективності та безаварійної роботи ЕМС з АД. Визначення енергоефективності АЕП на основі енергетичних критеріїв та, за необхідності,

фінансово обґрунтована його заміна дозволять скоротити витрати підприємства на спожиту електроенергію, технічне обслуговування і ремонт.

Таким чином, постає завдання розроблення системи діагностування ЕМС, яка б дозволяла оцінювати їх енергоефективність і технічний стан в умовах дії комплексу факторів (неякісної напруги живлення, зміни навантаження, низького рівня експлуатації тощо).

1.2 Методи та засоби діагностування електромеханічних систем

У зв'язку з розвитком обчислювальної техніки й мікропроцесорних систем керування отримали подальший розвиток системи діагностування, контролю й керування, спрямовані на підтримання ефективного функціонування електроустаткування. Передові іноземні фірми Nippon Steel, Chugai Ro, Ebner, Siemens, ABB, «Инкотес» і ряд інших мають випробувальні стенди для досліджень двигунів [82]. Автоматизація випробувань електричних машин дозволяє одержати об'єктивні й достовірні результати випробувань, прискорити проведення контрольних вимірювань і підвищити продуктивність праці. ЕОМ використовуються не лише для оброблення результатів випробувань, але й керування процесом випробувань, статистичного контролю й аналізу результатів випробувань (як для вибіркового контролю, так і для суцільного).

Аналіз існуючих методів діагностування АЕП показує, що на даний час контроль технічного стану в більшості випадків відбувається під час проведення планових регламентних робіт і ремонтів за допомогою тестового діагностування [81,82,111,112]. Це не дозволяє виявити дефекти, що зароджуються, і запобігти ушкодженню АЕП аж до створення аварійної ситуації.

Стенд універсальний для випробування високовольтних електродвигунів [87]. Універсальний стенд призначений для перевірки якості ремонту високовольтних двигунів шляхом пуску до номінальної швидкості й прокручування в ненавантаженому стані двигунів таких типів: ДАЗО 15-69-

8/10, ДАЗО 14-69-6, ДАЗО 13-67-6, ДАЗО 13-55-10, ДАЗО 13-42-8, А 13-52-8, ДАЗО А 113-4, А 112-4 (швидкість обертання, об/хв – 600, 750, 1000, 1500; довжина сердечника статора 420–1130 мм), ВА 12-41-4 й АВ 113-4 (швидкість обертання 1500 об/хв; довжина сердечника статора 410–1130 мм).

Стенд містить випробувальне поле з фундаментною підставкою для встановлення двигунів з вертикальним валом і фундаментною рамою для двигунів з горизонтальним валом; огороження сітчасте розбірне випробувального поля; осередок вводу напругою 6 кВ; тамбур осередку, де знаходяться приводи ножів високовольтного роз'єднувача; низьковольтну електроапаратуру.

Стенд для діагностики асинхронних електродвигунів ЗАТ "НИПО" розроблено і впроваджено на СП "Енергоремонт" [86].

Стенд являє собою програмно-технічний комплекс і містить: комп'ютер, розширений за шиною ISA платою аналого-цифровий перетворювач (АЦП), принтер; власне стенд, що являє собою технічний комплекс для різних видів діагностики двигунів і поєднання комп'ютера з вимірювальною частиною; програмне забезпечення, що здійснює організацію та реєстрацію діагностики двигунів.

Стенд забезпечує виконання таких функцій: проведення дослідів холостого ходу та короткого замикання; вимірювання активного опору обмоток статора двигунів; цифрове оброблення вимірювальної інформації; контроль вимірювальної інформації за показами амперметрів і вольтметрів; складання протоколу випробувань двигуна й виведення його на друк; формування бази даних результатів випробувань двигунів.

Випробування двигунів здійснюються відповідно ГОСТ 11828-86, ГОСТ 7217-87, ТУ 16-05810695-048-2000. Засоби вимірювання і методика виконання вимірювань електричних параметрів відповідають вимогам ГОСТ 11828-86, ГОСТ 7217-87. Вимірювання електричних параметрів двигунів у стенді здійснюється шляхом сполучення вимірювальної частини (трансформаторів

струму й напруги) з АЦП комп'ютера. Стрілочні прилади, встановлені на лицьових панелях стенду, призначені головним чином для візуального контролю вимірювань. Сформовані протоколи фіксують результати випробувань і можуть бути доповнені на розсуд оператора виведенням розрахункових статичних характеристик двигуна, у тому числі: механічної $n = f(M)$, робочих характеристик $\cos\phi$, ККД $= f(P_2)$.

Стенд випробування асинхронних електродвигунів потужністю до 100 кВт типу 02.01.07, 02.01.07/M1, виготовлений на заводі «Электромаш», м. Ростов-на-Дону(Росія).

Даний стенд призначено для випробування АД із короткозамкненими й фазними роторами, потужністю до 100 кВт на вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу машини та між обмотками, опору обмоток постійному струму в практично холодному стані, визначення коефіцієнта трансформації двигунів з фазними роторами, випробування ізоляції обмоток відносно корпусу електродвигуна й між обмотками на електричну міцність, випробування міжвиткової ізоляції обмоток на електричну міцність, визначення струму й втрат холостого ходу й короткого замикання; обкатування на холостому ходу. У стенді 02.01.07/M1 автоматизовано процес вимірювання і проведення випробувань із виведенням усіх протоколів у комп'ютер.

Діагностичний стенд електродвигунів для лабораторій і виробництва [84]. Стенд розроблено у Німеччині, в лабораторії доктора Штайгера Мохило. До складу стенда входять: ящик з піднімальним пристроєм; кріпильна пластина, гальмо двигуна; датчик обертального моменту/швидкості; механізм утримування зразка; універсальне джерело живлення; коробка для контрольного зразка й датчика температури; кліматична камера; апаратура активації для двигунів і вимірювання сигналів стану; апаратура для обміну даних з комп'ютером; аналізатор потужності; ПК із принтером та мережевим доступом; необхідне програмне забезпечення.

Стенд реалізує різні модулі тестування, ручні операції, досліди короткого замикання і холостого ходу, операції перегрівання, статичну операцію, відсутність навантаження, сімейства характеристик, рівні гармонік, завантаження необхідних контурів, збирання даних, завантаження й запуск характеристик, специфічне застосування клієнтом, систему лабораторної звітності.

Серія комп'ютеризованих стендів для діагностики електродвигунів ELMOTE XX [83]. Стенди серії ELMOTE XX, розроблені румунською компанією ICPE S.A. - Laboratory 57, належать до повністю комп'ютеризованих стендів вимірювання й тестування електродвигунів і можуть бути використані в післяремонтному й контрольному випробуваннях у серійному виробництві.

Основні технічні характеристики: максимальна потужність тестованих двигунів – 10 кВт; максимальний вимірюваний струм – 100А ; рівень напруги (змінного або постійного) – 500В; діапазон махового моменту – 0–50 Нм; швидкість обертання – 0–10,000 с^{-1} ; тривалий максимум розсіюваної потужності – 3 кВт; короткочасна пікова потужність – 10 кВт.

Стенд для випробування асинхронних електродвигунів розроблений компанією «AviaOk International» [85]. Устаткування: LabVIEW; NI PXI-1042; NI PXI-8175; NI PXI-4070; NI PXI-6527; NI PXI-8422/2; мегомметр M4122B.

Стенд забезпечує автоматичне проведення випробувань електродвигунів різних марок. У процесі випробувань електродвигуна повинні визначатися такі параметри: опір ізоляції на високій напрузі; коефіцієнт потужності; опір обмоток постійному струму; коефіцієнт трансформації обмоток; струм холостого ходу; пусковий струм; активна й реактивна потужність; випробування ізоляції обмоток і міжвиткової ізоляції. Блок-схему стенду випробування АД зображено на рис. 1.2.

Як основу для побудови системи, призначеної для керування випробуванням електродвигунів, вимірювання й обчислення електричних

параметрів застосовано комп'ютер із шиною PXI, розроблений компанією National Instruments.

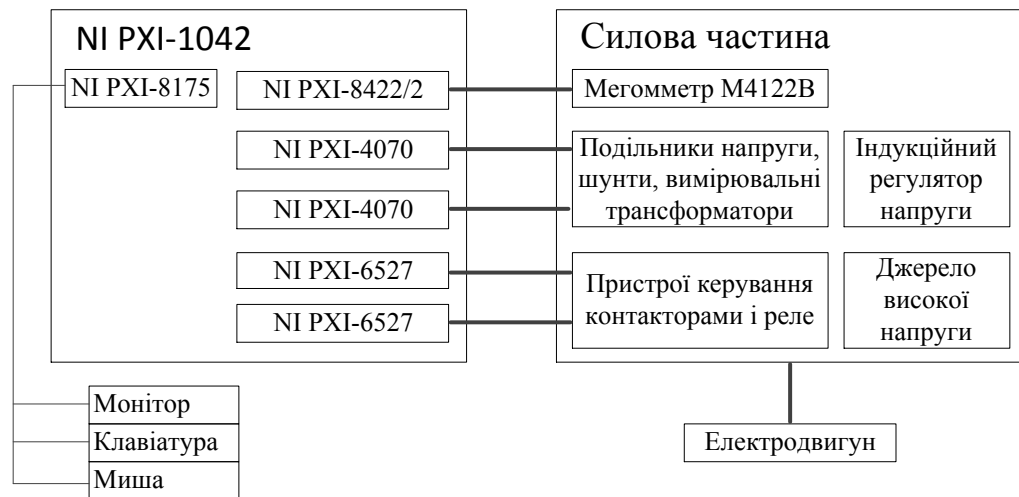


Рис. 1.2 Стенд для випробування АД компанії «AviaOk International»

Застосування двох мультиметрів NI PXI-4070 дає можливість одночасного вимірювання 2 параметрів або одночасного спостереження осцилограм напруги й струму, синхронізованих у часі. Це дозволило одержати пускові характеристики електродвигуна й визначити зсув між фазами струму й напруги. Дві плати NI PXI-6527 цифрового введення-виведення забезпечили автоматичне керування ходом випробувань і зміну робочих напруг у силовій частині стенду.

Для вимірювання опору ізоляції електродвигуна було застосовано портативний мегомметр M4122B, підімкнений кабелем до плати NI PXI-8422/2, що реалізує інтерфейс RS-232. Для розроблення програмного забезпечення стенду використано середовище програмування LabVIEW.

Універсальні прилади ИВЗ фірми «ТЕХПРИБОРСЕРВИС» С.-Петербург (Росія) застосовуються для виявлення обривів, виткових замикань обмоток та опору корпусної ізоляції електричних машин всіх типів змінного і постійного струму. Прилади забезпечують випробування: виткової і

корпусної ізоляції, визначення наявності й місця замикання, обриву проводу обмотки, перевірку правильності міжсекційних з'єднань; випробування виткової і корпусної ізоляції обмоток роторів турбогенераторів (без бандажів) і визначення місця ушкодження;

виткової ізоляції окремих шаблонних секцій (до укладання в паз) машин змінного і постійного струму;

котушок без осердя електричних апаратів і машин;

випробування виткової і корпусної ізоляції малих і середніх якорів машин постійного струму;

виткової ізоляції статорів електричних машин із всипною обмоткою;

виткової і корпусної ізоляції й визначення місця ушкодження при повних і неповних (з великим перехідним опором) замиканнях на корпус обмоток якорів машин постійного струму зі зрівнювачами;

виткової і корпусної ізоляції котушок, встановлених на полюс, і окремих котушок машин змінного і постійного струму;

виткової ізоляції статорних секцій; високовольтних електричних машин (до укладання в статор і після нього, до паяння обмотки).

Принцип дії приладів – імпульсний. Імпульсна напруга, що створюється приладом, залежно від об'єкта випробувань або індукується в обмотці (за допомогою електромагнітних скоб або електромагнітів) – індуктивний метод, або безпосередньо подається на виводи обмотки, що випробовується, за допомогою щупів або кабелю – кондуктивний метод.

Програмно-апаратний комплекс призначено для післяремонтних випробувань, дослідження, аналізування та експериментальної оцінки технічного стану електродвигунів і видачі рекомендацій щодо умов експлуатації діагностованої машини [21,22]. Комплекс визначає номінальні потужність, частоту обертання, струм, момент, а також активний та індуктивний опори обмоток, електромагнітну та електромеханічну сталі часу, швидкість ідеального холостого ходу (синхронну) та момент інерції двигуна

без приєднання до них навантажувальних пристроїв. Функціональну схему програмно-апаратного комплексу діагностування наведено на рис. 1.3.

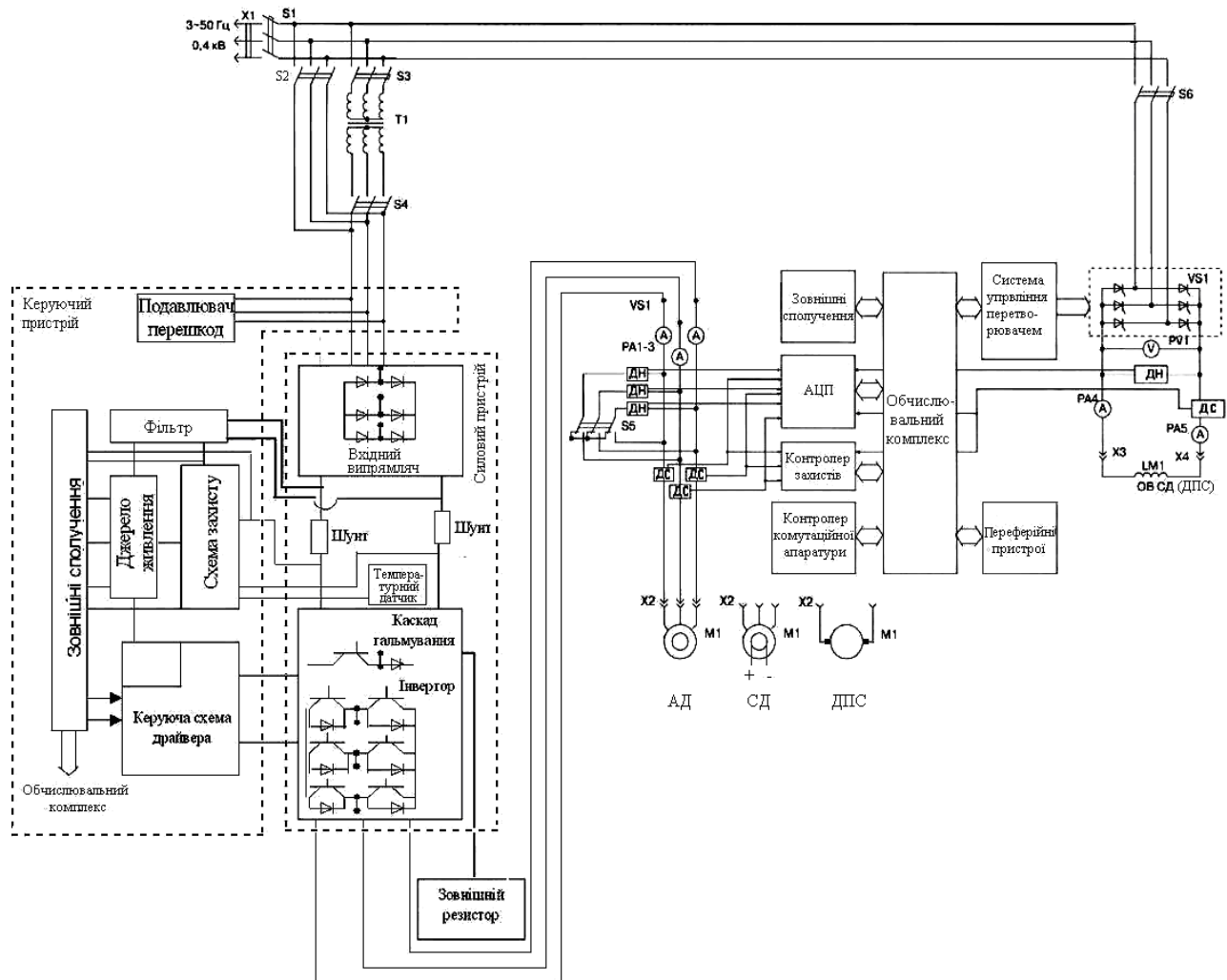


Рис. 1.3 Функціональна схема програмно-апаратного комплексу діагностування електричних машин

Алгоритм роботи системи діагностування, складається з циклу випробувань, що включає послідовну роботу машини у трьох динамічних режимах – короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу; проведення контрольних вимірювань значень струму двигуна, частоти обертання та тривалості режимів короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу;

обробки результатів тестування за допомогою спеціального математичного апарату й визначення параметрів випробуваного двигуна; формування нового паспорта діагностованої машини.

Комплекс має 7 основних етапів випробувань АД. На першому етапі випробувань контролюється обрив фаз, на другому – опори ізоляції обмоток стосовно корпусу двигуна й між ними. На третьому і четвертому здійснюються випробування міжвиткової ізоляції обмоток на електричну міцність. На п'ятому електродвигуни випробовуються у режимах холостого ходу й короткого замикання. Шостий етап призначено для випробувань ізоляції обмоток стосовно корпусу й між ними на електричну міцність, а сьомий – для вібраційних тестувань.

Під час випробувань на етапах 1–4, 6 і 7 блок порівняння видає негативний результат, якщо на відповідному етапі електродвигун не витримує випробування, і позитивний – якщо витримує. Під час випробувань АД на 5-му етапі в режимах холостого ходу й короткого замикання вимірюються струми і втрати. Тестування механічних і робочих характеристик здійснюється у процесі розгону електродвигуна. При цьому опір обмоток відповідає сталій температурі, отриманій випробуваннями на нагрівання. Ця температура досягається автоматично в режимі короткого замикання.

Система діагностування електродвигунів «Компакс-РПЭ» призначена для діагностування технічного стану двигуна за вібрацією, температурою і струмом, з реєстрацією вимірюваних параметрів. Всі електродвигуни, що виходять з ремонту, проходять випробування на низьковольтних (до 380В) і високовольтних (до 6000В) стендах. Вібро- і термодатчики з магнітним кріпленням забезпечують швидку підготовку двигунів до випробувань. Система дозволяє проводити випробування до восьми електродвигунів одночасно і виключає проходження в експлуатацію електродвигунів з підвищеною вібрацією через дефекти підшипників, ротора, статора і помилок складання.

Робота системи заснована на вимірюванні поточних значень параметрів вібрації (віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення), температури,

струму, частоти обертання ротора. Якість електродвигуна оцінюється за результатами цифрового оброблення сигналів 6 датчиків вібрації, 2 датчиків температури, датчика обертання ротора і датчиків струму електродвигуна. Результати вимірювань відображаються на моніторі за допомогою діаграм з цифровими значеннями параметрів.

Вбудована автоматична експертна система дозволяє діагностувати такі несправності електродвигуна: дефект зовнішньої і внутрішньої обойм підшипника, перекошування установки підшипника і підшипникового щита, дисбаланс, незадовільна якість мастила, перевантаження по струму, перекошування фаз і т. ін.

Розглянутим системам тестового діагностування властиві такі недоліки:

необхідність механічного сполучення випробуваного двигуна зі схемою навантажувального пристрою, що тягне за собою трудомісткі ручні операції з'єднання та вимагає наявності додаткових механічних пристроїв (кріпильні пластини, ящик з піднімальним пристроєм, наявність самого навантажувального пристрою тощо);

випробування проводяться на повній напрузі, що призводить до ускладнення схеми стенду та процесу досліджень.

Вимірювальні системи (ВС) складають основу функціонування автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) і підприємствами (АСУ П), систем обліку і контролю кількості енергоносіїв. ВС дозволяють реалізувати оперативний моніторинг складних технологічних процесів [27]. Розробка програмного забезпечення для ВС, АСУ ТП, АСУ П заснована на використанні систем збору даних і оперативного диспетчерського управління - SCADA-систем. Вирішення проблеми комплексного обліку призводить до створення та впровадження інтегрованої інформаційної системи управління виробництвом - MES (Manufacturing Execution Systems).

Автоматизована система контролю технологічних параметрів роботи головних електроприводів безперервно-заготовочного стану 730/500 і електропривода летючих ножиць РПЛН-150 (БАТ «Криворіжсталь») [26].

Система забезпечує безперервний контроль технологічного процесу прокатки в єдиному масштабі часу, що дає можливість виявляти порушення ходу технологічного процесу, вибирати раціональний режим прокатки при зміні технології, забезпечити відновлення передісторії виникнення аварійних подій, скоротити час пошуку несправностей при аваріях в електричних колах головних електроприводів.

Програмний комплекс «Діагностика +» оцінює стан електрообладнання в режимі ON-LINE [25]. «Діагностика +» забезпечує: ведення паспортних даних і даних випробувань; ведення даних про ремонти; фіксацію в базі даних (БД) зовнішніх впливів на обладнання, проведення діагностичних експертиз із видачею протоколів; планування і контроль проведення регламентних робіт. Підсистема моніторингу функціонує в темпі протікання технологічного процесу і оснащена засобами збирання, оброблення, відображення, реєстрації, аналізування, зберігання і передачі інформації. Також система забезпечує моніторинг силових трансформаторів.

Монітор струму двигуна (МТД-RS) з функцією обміну даними по інтерфейсу RS-485 в комплекті з первинними перетворювачами - датчиками струму призначено для вимірювання струму і напруги мережі, а також для захисного відключення навантаження в мережах змінного струму частотою 50 Гц, напругою 220 / 380 В і номінальними значеннями струму навантаження від 1 до 250 А [24]. Монітор забезпечує: активізацію функцій і зміну заводських установок споживачем; захисне відключення електропривода; передавання інформації через послідовний порт RS-485; дистанційне встановлення допустимих струмів навантаження, напруги, частоти, часу тривалого перевантаження, часу спрацьовування захисту, часу перемикання реверсу живлячих фаз.

В літературних джерелах, присвячених діагностуванню, розглядаються питання пошуку несправностей, тобто діагностування технічного стану. Проблеми енергоефективності ЕМС практично не висвітлюються.

1.3 Класифікація методів діагностування електромеханічних систем з асинхронними двигунами

Неврахування зв'язків між процесами перетворення енергії та їх наслідками є істотним недоліком існуючих засобів діагностування ЕМС. Воно не дозволяє встановити причини, які призводять до погіршення енергоефективності, виникнення і розвитку несправностей та аварій.

Низька надійність АЕП є причиною значних збитків. Основні нормативно-правові питання діагностичного контролю електроустаткування регулюються існуючим ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». Відповідно до ГОСТ 27.002-89 під надійністю розуміють властивість об'єкту зберігати протягом деякого часу у встановлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах та умовах використання, технічного обслуговування, зберігання й транспортування.

Заходи діагностичного контролю повинні бути складовою частиною розробки електрообладнання [49]. Питання про характер діагностичних заходів та методів їх виконання неодмінно постає в процесі експлуатації – для неблагополучного обладнання, або по завершенні строку його служби.

Складність діагностування ЕМС з АД зумовило появу значної кількості різних методів та підходів, кожний з яких має свої переваги, недоліки й сферу використання [21,22,49,50]. Аналіз існуючих методів діагностування електропривода дозволив розробити загальну їх класифікацію (рис. 1.4).

Існують причини, через які жодні гарантії не можуть закрити проблему безвідмовної, безаварійної експлуатації: по-перше, термін служби будь-якого обладнання – величина ймовірна і, по-друге, невідповідність рекомендованих режимів експлуатації реальним може призводити до прискореного витрачання ресурсу. Головний аргумент на користь діагностування – вирішення питання про продовження терміну служби (що робити з обладнанням після закінчення призначеного строку служби).



Рис. 1.4 Загальна класифікація методів діагностування електропривода

Ресурс об'єкту можливо визначити лише після того, як настала відмова, або досягнуто граничного стану. Поки ці події не настали, можна говорити лише про їх прогнозування з більшою чи меншою вірогідністю. При досягненні граничного стану об'єкт повинен бути знятий з експлуатації, направлений у капітальний ремонт, списаний, знищений або переданий для застосування за іншим призначенням. Капітальний ремонт дозволяє частково або повністю відновлювати ресурс, повернути привод у працездатний стан. Правильно сплановані діагностичні заходи можуть значно збільшити строк реальної експлуатації обладнання, що призводить до зниження витрат.

Підходи до керування працездатністю устаткування. Існує два основних підходи підприємств до керування працездатністю устаткування.

Фокусування уваги на ремонтах устаткування. Підприємства, що приділяють увагу ремонту устаткування, керуються тим, що виходи

устаткування з ладу закономірні, і завдання підприємства – швидко ліквідувати такі збої. Керівництво й персонал підприємств змушені займатися переважно ремонтом і не прагнуть з'ясовувати причини несправності устаткування.

Фокусування уваги на надійності устаткування. Підприємства, мета яких – надійність устаткування, не чекають збою у його роботі. Їх основне завдання – управляти технічним станом устаткування: проводити постійний моніторинг його фактичного стану; виявляти існуючі ушкодження устаткування й ранжувати їх за ступенями небезпеки для надійності роботи, моніторити швидкість розвитку пошкоджень; призначати й здійснювати заходи для усунення пошкоджень.

«Стандартні» проблеми технічних служб при експлуатації електропривода. На промислових підприємствах експлуатація двигунів має наступні особливості:

електропривод споживає значну частку електроенергії підприємства;

технічний стан і надійність роботи електропривода впливає на рівень виробничих ризиків (невиконання планів виробництва через простої устаткування тощо), а також на безпеку життя й здоров'я працівників;

високий рівень пошкоджуваності електропривода;

витрати на технічне обслуговування й ремонт (ТО) електродвигунів становлять значну частину в загальній структурі витрат технічних служб;

висока вартість нового обладнання, тривалі строки придбання й пуско-налагоджувальних робіт при введенні в експлуатацію нового обладнання.

Характерні риси більшості систем експлуатації двигунів на підприємствах:

відсутність комплексної системи діагностування стану електропривода з метою якнайранішого виявлення дефектів і відстеження тенденцій їх розвитку, точнішого планування видів і строків ТО електродвигунів;

високий рівень відмов і аварійних виходів електропривода з ладу й виникаючі внаслідок цього додаткові фінансові втрати підприємства;

неможливість прийняття обґрунтованих рішень про пріоритети в області відновлення й модернізації устаткування на основі достовірної інформації про ресурс електропривода;

«непрозора» структура витрат на ТО електропривода – відсутність достовірних даних про фактичний стан електродвигунів – позбавляє підприємства дієвого механізму контролю за плануванням обсягів робіт з обслуговування устаткування й витрат на видаткові матеріали, визначенням структури й складу експлуатаційно-ремонтних підрозділів.

Втрати підприємства через проблеми в експлуатації електропривода. Експлуатація електропривода, який перебуває у незадовільному технічному стані, призводить до наступних негативних наслідків:

прямих фінансових втрат, пов'язаних з непрогнозованим виходом устаткування з ладу й викликаних цим порушенням основних виробничих і операційних процесів (упущеної вигоди через простоювання рухомого складу й допоміжного устаткування; додаткових витрат на непередбачені ремонти устаткування; доплат за терміновість ремонту устаткування у разі залучення сторонніх організацій і завищених цін термінової купівлі запасних частин і агрегатів; додаткових витрат на відновлення нормальних виробничих і операційних процесів);

значних (до 3–5%) непрямих непродуктивних витрат електроенергії, обумовлених підвищенням електроспоживанням електропривода;

існування реальної загрози безпеці життя й здоров'я людей.

Таким чином, «локальні» проблеми технічних служб експлуатації електропривода за відсутності необхідної уваги й застосування адекватних методів їх вирішення можуть стати глобальними проблемами підприємства.

Ключові завдання технічних служб при експлуатації електропривода. Для усунення аварійних відмов устаткування й зниження збитків підприємства від наслідків таких відмов, а також для зниження непродуктивних витрат електроенергії, основним завданням технічних служб експлуатації є забезпечення заданого рівня надійності двигунів шляхом: виявлення

несправностей на ранній стадії їх виникнення; моніторингу динаміки розвитку несправностей; визначення й планування раціональних строків проведення ремонтів.

Вирішення завдання забезпечення надійності двигунів неможливе без застосування комплексної ефективної системи (як сукупності методів і засобів) діагностики стану електропривода.

Система діагностики повинна містити: регулярний моніторинг і діагностування енергоефективності та технічного стану устаткування; пошук дефектів і ушкоджень; визначення ступеня небезпеки дефектів; оцінку залишкового ресурсу устаткування.

На основі аналізу існуючих методів діагностування розроблено схему класифікації методів діагностування ЕМС з АД за такими ознаками: режимом роботи, способом впливу на нього, видом та методом випробування (рис. 1.5).

На сьогодні відсутня єдина стратегія діагностування ЕМС. Існує дві концепції обслуговування електрообладнання - за регламентом і за фактичним станом [31,34,42,49].

Обслуговування за регламентом (тестове діагностування, візуальне спостереження) – це система планово-попереджувальних ремонтів і випробувань. Обслуговування устаткування виконується на підставі аналізу показань ВС під час періодичних регламентних робіт і за результатами випробувань після ремонтів АД.

Характерні риси обслуговування: значні терміни між випробуваннями й ремонтами не дозволяють виявляти ушкодження на ранніх стадіях їх виникнення; не менше 50% обслуговувань і ремонтів виконуються без фактичної необхідності; виведення устаткування з роботи; у більшості випадків не зменшується частота виходу АД з ладу; не обґрунтована фактичним станом устаткування заміна вузлів і деталей з більшим залишковим ресурсом; низька якість і надійність робіт з обслуговування.

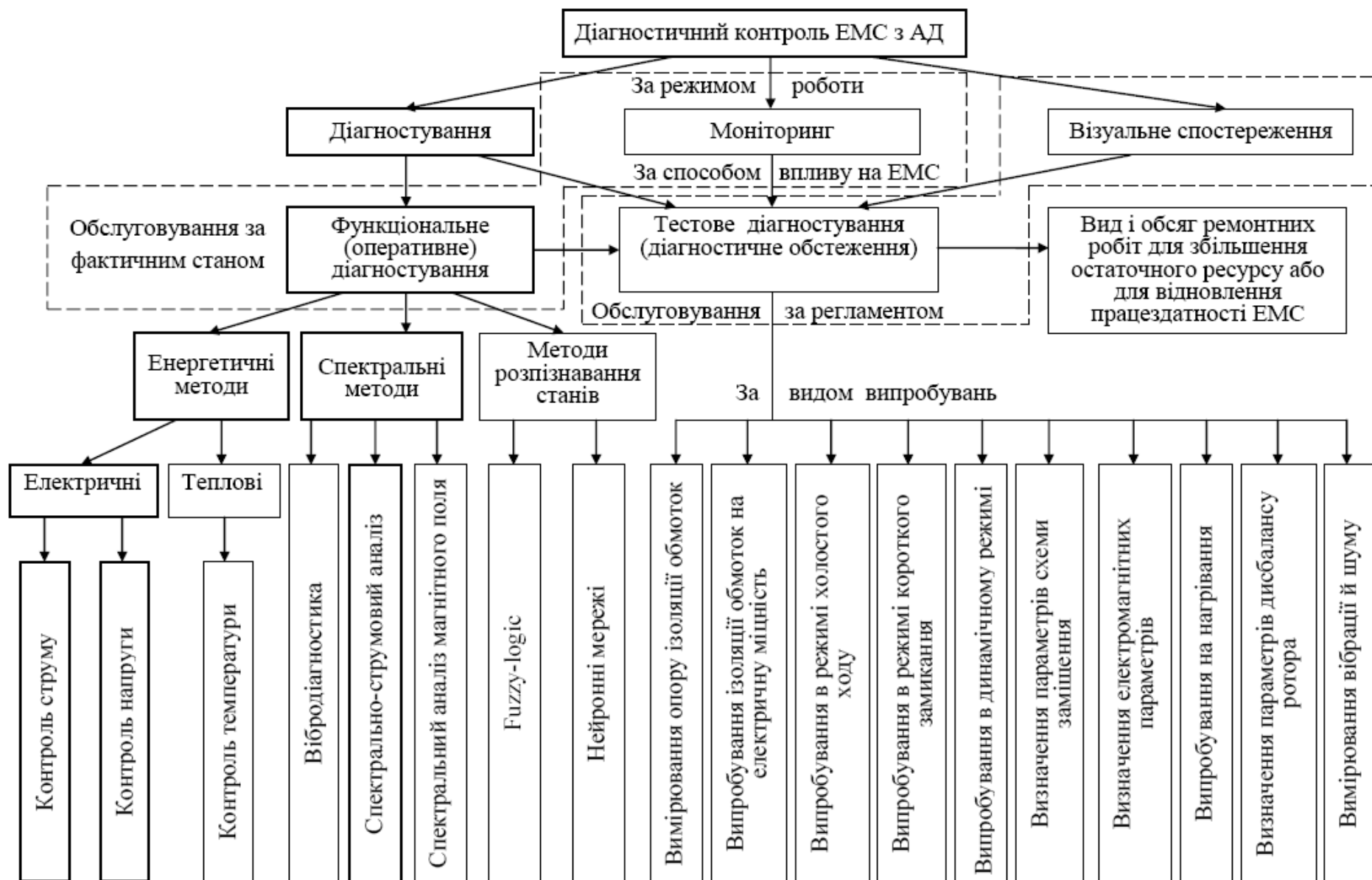


Рис. 1.5 Схема класифікації методів діагностування EMC з АД

У разі обслуговування за регламентом енергоефективність ЕМС з АД не визначається, а основними контрольованими параметрами є температура обмоток і підшипникового вузла, опір ізоляції та зазор у підшипниках [34]. Це не дозволяє виявити дефекти, які зароджуються, і запобігти ушкодженню електрообладнання аж до створення аварійної ситуації.

Обслуговування за фактичним станом (функціональне діагностування, моніторинг) дозволяє керувати рівнем енергоефективності й визначати технічний стан устаткування і полягає в тому, що обслуговування й ремонт виконуються в залежності від реального поточного стану устаткування, контрольованого в процесі експлуатації, без розбирань і ревізій.

Характерні риси обслуговування: підприємство має об'єктивні дані про реальний поточний стан устаткування; не порушується нормальна робота механізму через необґрунтоване втручання; діагностика стану АД відбувається в робочому режимі; знижується рівень раптових поломок устаткування й зупинок виробництва; визначаються необхідні терміни й обсяги ремонтних робіт; витрати на технічне обслуговування знижуються у порівнянні з обслуговуванням «за регламентом», у т.ч. – через придбання запасних частин у міру їх необхідності й скорочення запасів на складі; підвищується ресурс роботи АД (за експертними оцінками – до 2 разів), а також скорочуються на 30% обсяги робіт, що їх проводить електротехнічна служба підприємства [31].

Недоліком такого підходу є складність вимог до методів та засобів обслуговування за фактичним станом. Тому на вітчизняних підприємствах такі системи відсутні, тоді, як наприклад, в Японії системи діагностування встановлено на 30-40% устаткування. Використання систем моніторингу і функціонального діагностування дозволяє запровадити технологію обслуговування за фактичним станом (керування технічним станом), що істотно підвищує рентабельність та конкурентоздатність підприємства. Ефективна експлуатація АЕП неможлива без знання його фактичного стану.

Для підвищення ресурсу та надійності АЕП, скорочення витрат на ремонт і простої необхідно переходити від регламентованих за часом профілактичних і

ремонтно-відновлювальних робіт до обслуговування за фактичним станом. У практичному сенсі результати діагностування дозволять знизити енергоспоживання, збільшити ресурс АЕП, підвищити безвідмовність та визначати терміни й види ремонту.

Діагностичний контроль – комплекс заходів, спрямованих на визначення поточного стану обладнання для максимального й безпечного його використання [49].

Діагностичний контроль починається з моменту створення устаткування. Приймально-здавальні випробування є фактично діагностичним заходом, спрямованим на визначення подальшої працездатності обладнання за встановленими технічними вимогами. Але повною мірою поняття діагностичного контролю стосується працюючого обладнання, яке вже знаходиться в експлуатації. До завдання такого діагностичного дослідження входить або визначення можливості безаварійно завершити призначений термін служби, або, по його завершенні, визначити можливості подальшої безаварійної експлуатації обладнання.

Контрольні заходи щодо режиму роботи здійснюються шляхом: діагностування, моніторингу й візуального спостереження.

Відповідно до ГОСТ 20911-89 “Технічне діагностування. Терміни та визначення”, технічне діагностування – визначення технічного стану об’єкта, моніторинг – безперервний процес збору та аналізу інформації про значення діагностичних параметрів стану об’єкту.

В технічному діагностуванні під *моніторингом* розуміють безперервний процес збору та аналізу інформації про значення діагностичних параметрів стану об’єкту. *Багатофакторний моніторинг* - це безперервне (з частотою більшою, ніж частота, необхідна для оцінювання події, що спостерігається) стеження за встановленими параметрами з метою контролю за наближенням їх значень до граничних для подальшого прийняття відповідного рішення щодо відновлення контрольованих параметрів.

Моніторинг, як і оперативна діагностика, припускає використання неруйнівних методів контролю, тобто методів, які не призводять до витрачання ресурсу, і здійснюються одночасно з виконанням електроприводом основних своїх функцій. За наявності системи моніторингу сигнал про необхідність більш глибокого діагностичного обстеження повинен надходити від неї.

Створення систем моніторингу є логічним наслідком розвитку техніки на сучасному етапі. На систему автоматичного контролю устаткування можна покласти багато різноманітних завдань. Однак вона повинна вирішувати мінімум завдань, які не можуть бути вирішені іншим чином. Такий підхід диктується виключно економічними міркуваннями - чим складніша система контролю, тим вона дорожча, а зі збільшенням вартості знижується доцільність її застосування. На сьогодні система автоматичного контролю розглядається не тільки і не стільки як система пасивного спостереження і попередження, а як інтелектуальна система діагностичного контролю і управління.

Візуальне спостереження – традиційний профілактичний захід підтримання працездатності устаткування. Проведення оглядів пов'язано з великими витратами і з залученням спеціально підготовленого персоналу для роботи в небезпечній або віддаленій робочій зоні. Візуальне спостереження практично не розв'язує діагностичних завдань, оскільки з його допомогою неможливо попередити аварійну відмову, зробити прогноз працездатності електрообладнання і оцінити стан електропривода лише за зовнішніми, доступним проявами.

Діагностування за способом впливу на ЕМС поділяється на два види – функціональне і тестове.

Функціональне (оперативне) діагностування ЕМС – це організована з певною періодичністю система збирання, накопичення, оброблення та аналізування інформації, необхідної для оцінки її поточного стану і прогнозування тенденцій його розвитку. Діагностування використовує неруйнівні методи контролю, які не призводять до зменшення ресурсу і застосовуються одночасно з виконанням ЕМС її робочих функцій. Внаслідок

здійснення ряду вимірювань формується база даних, яка дозволяє відстежувати динаміку розвитку пошкоджень у часі. Це дає можливість планувати виведення обладнання в ремонт [20].

Основна мета функціональної діагностики - визначення виду дефекту, його небезпеки і швидкості розвитку. За відсутності моніторингу основна діагностична функція забезпечення безпечної експлуатації лягає на оперативну діагностику, і за її результатами вирішується питання про необхідність більш глибокого, фундаментального діагностичного обстеження для прийняття остаточного рішення.

Перспективними є енергетичні методи діагностування. Як діагностичні параметри використовуються струми (миттєві значення, імпульси надструмів, струми витоків, квадрат кратності струму), напруги (миттєві значення, напруга нульової та зворотної послідовності) й температура частин АД (обмотки, сталі) [50]. Технологія будується на вимірюванні величин сигналів у контрольних точках та порівнянні їх з пороговими значеннями.

Розвитком енергетичної технології є спектральні методи діагностування, які базуються на виділенні з вимірюваного сигналу частотних складових з подальшим їх аналізуванням. Найпоширенішим з них є вібродіагностика [51-53]. Комплекс параметрів вібрації практично повністю характеризує технічний стан ЕМС і дозволяє прогнозувати виникнення пошкоджень і аварій [54].

Сьогодні в Україні широко використовується метод вібродіагностики стану елементів електродвигунів. Цей метод є досить дорогим і трудомістким, вимагає використання спеціальної вимірювальної техніки і програмного забезпечення. Для здійснення вібродіагностики необхідний доступ до елементів двигуна і механічного пристрою (що не завжди можливо). Необхідно встановлювати вібродатчики в трьох проекціях. Крім того, не завжди можливо відлаштуватися від вібрацій, викликаних розташованим поряд устаткуванням.

Головна трудність вирішення даної задачі полягає в тому, що недостатньо досліджені окремі несправності електричних машин на предмет отримання діагностичної інформації і не стандартизовані спеціальні

інформативні параметри або ознаки (діагностичні параметри), які характеризують зміну величин і характеристик електромагнітного, вібраційного й акустичного процесів, їх функціонування в разі виникнення відповідних несправностей [60].

Вібродіагностичні методи діагностування виявляються малоефективними для використання на працюючій машині і не можуть запобігати розвитку дефектів на ранній стадії їх виникнення. Основними недоліками цього методу є відсутність можливості контролювання енергетичного стану АД та необхідність зупинки устаткування і доступу до елементів ЕМС.

Діагностування за спектральним аналізом магнітного поля висвітлено в роботах [55-59]. Недоліком цього методу є складне вимірювання сигналу – необхідність встановлення датчиків у повітряний зазор АД.

Перспективним методом є спектрально-струмовий аналіз [144]. Метод спектрально-струмового аналізу, заснований на аналізуванні спектру отриманого сигналу за допомогою швидкого перетворення Фур'є та модулів векторів Парка, дозволяє з високою достовірністю визначати технічний стан, особливо механічні ушкодження. Дослідження гармонічного складу струмів АД в різних режимах показали, що кожному з них відповідає індивідуальна сукупність гармонічних складових струму з певними значеннями параметрів окремих гармонік. Це дозволяє використовувати її для ідентифікації технічного стану АД [61]. Зміна струмових характеристик практично ідентична зміні віброшвидкості несправних вузлів. Після проведення періодичних вимірювань формується база даних, що дозволяє відстежувати динаміку розвитку ушкоджень у часі. Це дає можливість завчасно планувати виведення обладнання в ремонт.

Методи розпізнавання станів, серед яких - fuzzy-logic, нейронні мережі, а також системи розпізнавання форм та експертні використовують елементи штучного інтелекту. Штучні нейронні мережі дозволяють автономно розв'язувати завдання класифікації змінних об'єкту та їх форм, розроблювати

непараметричні моделі, які можуть відтворювати будь-який справний або несправний стан АД та апроксимувати ідентифікацію на інші приклади [62].

Тестове діагностування (діагностичне обстеження) дає можливість отримати повну інформацію про стан АД, але вимагає технологічної зупинки механізму з припиненням основної функції за показниками оперативної діагностики або моніторингу [63]. Тут повинні застосовуватись всі наявні методи детального дослідження стану елементів, що забезпечують працездатність: фізичні, хімічні, електричні, технічні та механічні методи - відповідно до рекомендації розробників незалежно від їх значимості та складності.

Методи й вимоги до тестового діагностування та випробувань висвітлено в ПУЕ, ГОСТ 7217-87, ГОСТ 25941-83, ГОСТ 11828-86, ГОСТ 8865-93, ГОСТ 27710-88, ГОСТ 2817-89, ГОСТ 183-74, ГОСТ 16264.0-85, ГОСТ 11929-87, ГОСТ 12379-75, ГОСТ 25000-81, ГОСТ 16962.1-89 Е, ГОСТ 16962.2-90 Е, ДСТУ 3886-99, ДСТУ 3545-97 (ГОСТ 30501-97), ДСТУ ІЕС 60343-97 та публікаціях [31,42,64-69].

Вузька спеціалізація вітчизняних стендів тестового діагностування, пристосована до технологій деяких виробництв та вібродіагностики механічних вузлів, обмежує функціональні можливості цих стендів. З іншого боку, параметри й характеристики електричних машин оцінюють відповідно до державних стандартів на випробування. Наприклад, ГОСТ №7217-87 «Машини електричні обертові. Двигуни асинхронні. Методи випробувань» визначає методи й методики випробувань електричних машин у спеціальних лабораторіях. Випробування двигунів в умовах електроремонтних цехів на виробництві, як правило, неможливе, оскільки існуюче устаткування неспроможне виконувати необхідну програму.

Для АД ГОСТ 183-74 пропонує програму приймальних випробувань, що визначає: вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу машини й між обмотками та опорів обмоток при постійному струмі в практично холодному стані; визначення коефіцієнта трансформації (для двигуна з фазним ротором);

випробування ізоляції обмоток на електричну міцність відносно корпусу машини й між обмотками й на електричну міцність міжвиткової ізоляції обмоток статора й фазного ротора; визначення струму й втрат холостого ходу та короткого замикання; випробування машини при підвищеній частоті обертання й на нагрівання; визначення ККД, коефіцієнта потужності й ковзання; випробування на короткочасне перевантаження по струму; визначення максимального обертаючого моменту, мінімального обертаючого моменту в процесі пуску, початкового пускового обертаючого моменту й початкового пускового струму (для двигунів з короткозамкненим ротором); виміру вібрацій і рівня шуму.

Тестові методи потребують сполучення АД з навантажувальними пристроями, його розбирання (спосіб вийнятого ротора [72]) або використання вимірювальних обмоток на статорі чи роторі [73]. Методи вимагають спеціальної підготовки двигуна до експерименту, що утруднює процес вимірювання і вимагає значної витрати часу для підготовчих робіт [74].

Методики і комплекси тестового діагностування орієнтовані на визначення окремого параметру АД або їх набору [21,22,75]. Значна частина номенклатури засобів діагностування, які випускаються у світі (Adwel International ltd; BJM Corporation; Electric Power Research Institute; Schleich GmbH), призначені для вирішення локальних задач – випробування та діагностування обмоток і не призначені для визначення енергетичного стану АД [63]. Крім цього більшість відомих автоматизованих комплексів та стендів для діагностування АЕП, як правило, враховують тільки один із експлуатаційних впливів на режим роботи електродвигунів, мають значну вартість та складні у роботі. Ці методи дослідження режимів роботи АЕП, як правило, не враховують впливу завантаження, ПЯЕ, реального значення температури середовища. Існує необхідність спрощення процедури діагностування, а також застосування нових технічних рішень і наукових підходів до вирішення даної проблеми.

Основним методом усунення дефектів є ремонт (профілактичний, дрібний, середній і капітальний). Тому кінцевою метою діагностичного обстеження як останнього етапу діагностичного контролю є визначення виду та обсягу ремонту для збільшення залишкового ресурсу або для відновлення працездатного стану.

Для виконання діагностичних заходів як правові документи повинні бути представлені зведення нормативних і критеріальних параметрів. Перші - основні технічні вимоги нормативно-технічної і конструкторської (проектної) документації - призначені для кваліфікації стану обладнання в категоріях "справне-несправне", другі - вимоги, що характеризують ЕМС з позицій виключно можливості виконання своїх заданих функцій - для кваліфікації в категоріях "працездатне - частково працездатне - непрацездатне". Ці кваліфікаційні зведення повинні бути покладені в основу комп'ютерних програм діагностування як при діагностичному обстеженні, так і при моніторингу.

Авторська концепція розвитку методів діагностування полягає в контролюванні енергоефективності та технічного стану ЕМС засобами моніторингу й функціонального діагностування та обслуговуванні за фактичним станом, що дозволяє визначати їх енергетичний і технічний стан у реальному часі. Математичний апарат діагностування поєднує методи аналізування миттєвих значень струмів, напруг АД і температури довкілля з методом спектрально-струмового аналізу. Це дозволить істотно підвищити рівень енергоефективності ЕМС та перейти до керування їх технічним станом.

2 ЗАВДАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Фактори впливу на енергоефективність і технічний стан електромеханічних систем з асинхронними двигунами

Експлуатація ЕМС з АД має такі особливості: технічний стан і надійність їх роботи спричиняють критичний вплив на рівень виробничих ризиків (простої обладнання тощо); АД використовуються не в номінальних режимах роботи; фізична зношеність - 60-90% і неефективність технологічного обладнання [15]; високий рівень пошкоджуваності (підтримання працездатності АД забезпечується за рахунок ремонтів); витрати на технічне обслуговування і ремонт становлять значну частку загальної структури витрат; висока вартість нового устаткування, тривалі терміни пуско-налагоджувальних робіт; завищена встановлена потужність двигунів. Ці обставини призводять до зниження ефективності електромеханічного перетворення енергії та ККД.

Досвід експлуатації промислових установок вказує на те, що енергоефективність ЕМС з АД залежить від різноманітних чинників, які умовно можна поділити на чотири групи: конструктивні, виробничі, монтажні та експлуатаційні [31]. Серед них найбільший вплив мають такі (рис. 2.1): якість напруги живлення; режим навантаження; умови експлуатації; якість виготовлення, технічного обслуговування і ремонтів, активних та конструкційних матеріалів; відповідність застосування двигуна його виконанню. Відхилення вказаних факторів від допустимих або номінальних значень призводить до погіршення енергетичних показників, технічного і теплового стану АЕП та зменшення ресурсу роботи.

Якість електричної енергії регламентується стандартами: Міждержавний стандарт на електроенергію ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”; Європейський стандарт EN50006; публікації МЭК 100-2-1, МЭК 1000-2-2 в частині рівнів електромагнітної сумісності в системах електропостачання та методів вимірювання електромагнітних завад [32,33].

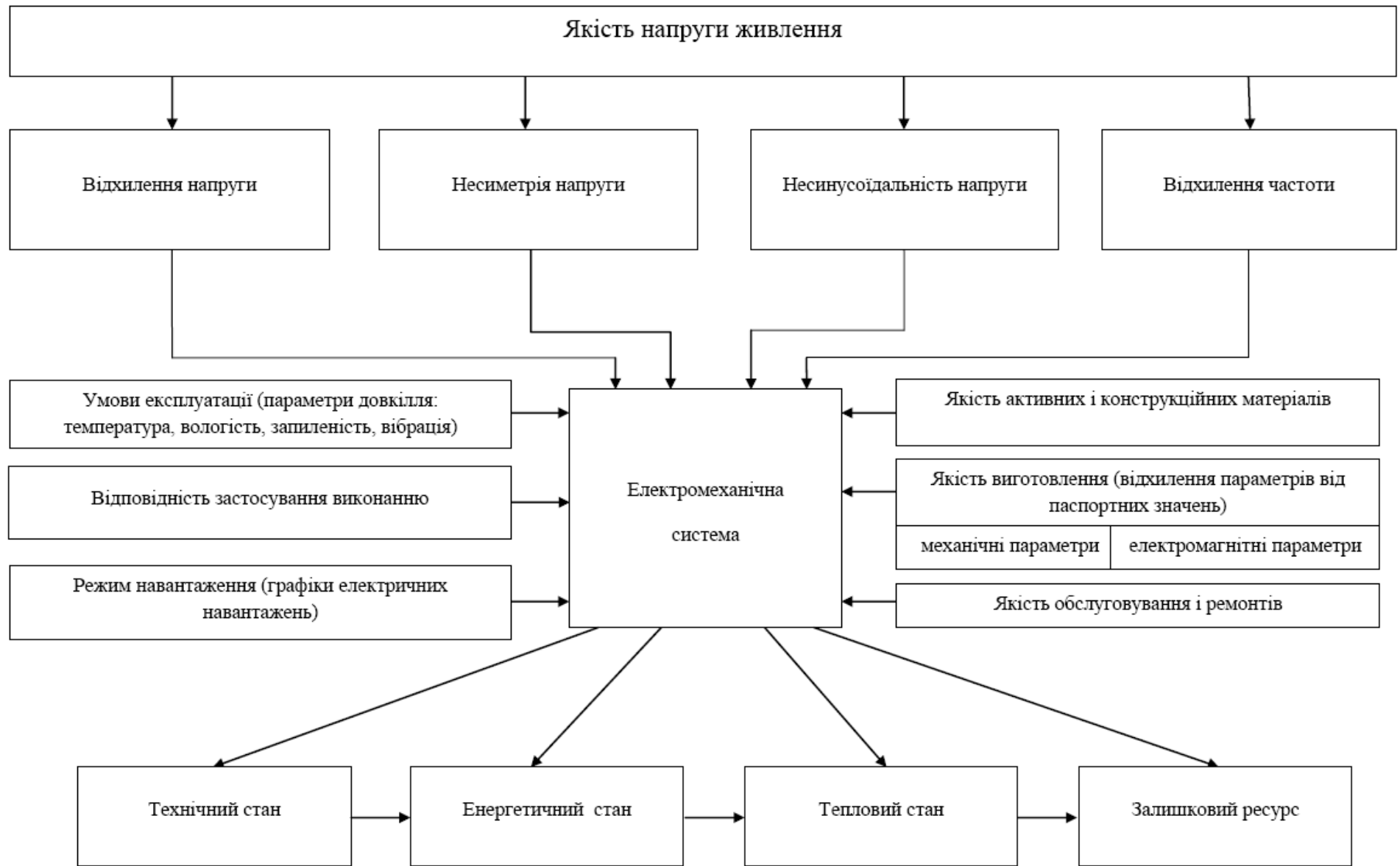


Рис. 2.1 Фактори впливу на енергоефективність та технічний стан ЕМС

Відхилення показників якості електроенергії (ПЯЕ) від нормованих значень призводить до збільшення втрат в АЕП та зміни величини моменту, знакозмінні складові якого є причиною додаткових вібрацій елементів конструкцій АЕП. Також прискорюється старіння ізоляції. В результаті зростає аварійність, знижуються такі показники як ККД, коефіцієнт потужності та строк служби.

У разі відхилень ПЯЕ, що перевищують нормовані стандартами значення, нормальна робота електрообладнання або взагалі неможлива, або може бути забезпечена лише у випадку значного зменшення навантаження. Також зниження ефективності роботи ЕМС має місце і при зміні ПЯЕ навіть в межах допустимих стандартами значень.

Дослідження впливу відхилень ПЯЕ від стандартизованих значень на роботу АЕП показують, що відхилення, несиметрія та несинусоїдальність напруги живлення, відхилення частоти – найбільш значимі фактори зниження рівня енергоефективності ЕМС з АД.

У разі відхилення напруги мережі змінюються частота обертання ротора, момент, струм намагнічування, а також реактивна потужність, що споживається. Активна потужність на валу двигуна залишається практично сталою, змінюються лише втрати активної потужності двигуна на величину $\Delta P_{\text{акт}}$, яка може бути додатною і від'ємною в залежності від зміни напруги, типу двигуна і його коефіцієнта завантаження $\cos \phi$. У загальному вигляді

— — коефіцієнт

пропорційності, який дорівнює відношенню додаткових втрат активної потужності в двигуні $\Delta P_{\text{акт}}$ до величини $P_{\text{акт}}$

Встановлено, що кожні 2,5% зростання живлячої напруги призводять до збільшення втрат в АЕП на 4% та споживаної реактивної потужності на 7,5% (за рахунок збільшення струму холостого ходу), що негативно впливає на

енергоефективність [2,3]. Для забезпечення тривалої безвідмовної роботи двигуна напруга живлення не повинна бути вищою на 10% та нижчою на 5% від номінальної [34].

Несиметрія напруг викликає значні струми зворотної послідовності, які підвищують втрати та зменшують момент і потужність двигуна. Опір зворотної послідовності в 5-8 разів менше опору прямої, т.ч. АЕП має фільтрувальні властивості по відношенню до струмів зворотної послідовності [125]. Тому навіть незначна несиметрія напруги (1%) створює помітну несиметрію струмів (7-9%) в обмотках. Струми зворотної послідовності викликають підвищення втрат, додаткове нагрівання, зменшують корисний момент (зменшення момента приблизно дорівнює квадрату коефіцієнта несиметрії) та потужність машини. Так, за несиметрії 5% втрати в статорі зростають на 93%, в роторі – на 76%, а загальні – на 50% .

Коефіцієнт погіршення потужності через несиметрію напруги, у відносних одиницях (рис. 2.2)

Коефіцієнт погіршення потужності

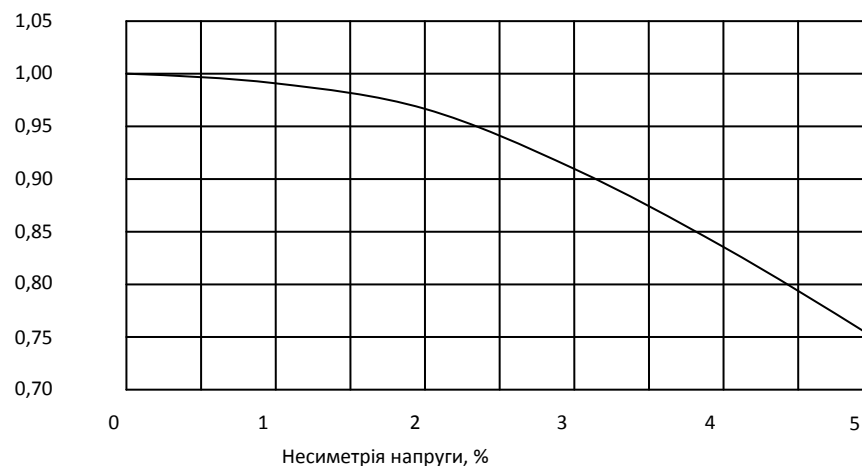


Рис. 2.2 Залежність коефіцієнта погіршення потужності від несиметрії напруги живлення

Таким чином, в умовах дії несиметрії напруг АЕП не може працювати з номінальним навантаженням на валу через небезпеку аварійної ситуації внаслідок надмірного перегрівання статорної обмотки.

Несинусоїдальність напруги призводить до зростання опору струмам вищих гармонік, що викликає в АЕП суттєві втрати активної потужності та підвищене нагрівання. У разі зростання коефіцієнту спотворень синусоїдальності напруги на 10% сумарні втрати збільшуються на 15% [5]. Якщо амплітуди 5-ї і 7-ї гармонік напруги становлять відповідно 20 і 15% амплітуди 1-ї гармоніки, коефіцієнт потужності АЕП зменшується на 2,6%.

Значне споживання реактивної потужності АД негативно впливає на втрати в мережі. Наприклад, на гірничовидобувних підприємствах фактичні питомі реактивні навантаження часто досягають величин порядку 1,4-1,6 квар/кВт, що майже вдвічі перевищує їх номінальні питомі реактивні навантаження. Основну частину в балансі реактивної потужності АЕП складає потужність холостого ходу, яка залежить від номінальної та конструктивних особливостей устаткування. В АД основну частину балансу реактивної потужності становить потужність холостого ходу, яка може складати до 60% реактивної потужності двигуна за умови 100% завантаження [16].

Реактивна потужність, що споживається АД з даним завантаженням

,

де $P_{\text{рх}}$ - реактивна потужність двигуна на холостому ході, квар; $\Delta P_{\text{р}}$ - приріст споживання реактивної потужності з даним завантаженням двигуна, квар;

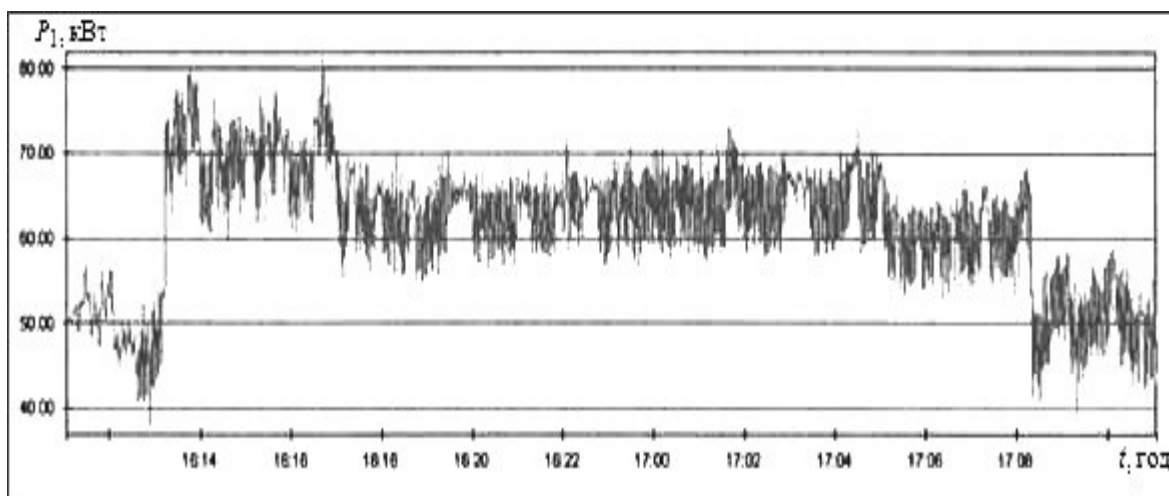
— $P_{\text{рн}}$ - реактивна потужність двигуна з номінальним завантаженням, квар; $\Delta P_{\text{рн}}$ - приріст споживання реактивної потужності з номінальним завантаженням двигуна, квар; $\tan \phi$ - тангенс відповідний коефіцієнту двигуна з номінальним навантаженням; η - ККД двигуна при .

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що робота ЕМС в умовах неякісної електроенергії призводить до зниження енергоефективності, надійності та працездатності устаткування. Однак опубліковані результати досліджень не містять даних щодо втрат та фінансового аспекту проблеми. Можливі два варіанти вирішення проблеми, а саме - корекція ПЯЕ відповідними технічними засобами або робота зі зниженими ККД, коефіцієнтом потужності й низькою надійністю (потребою частіших ремонтів або заміни АЕП).

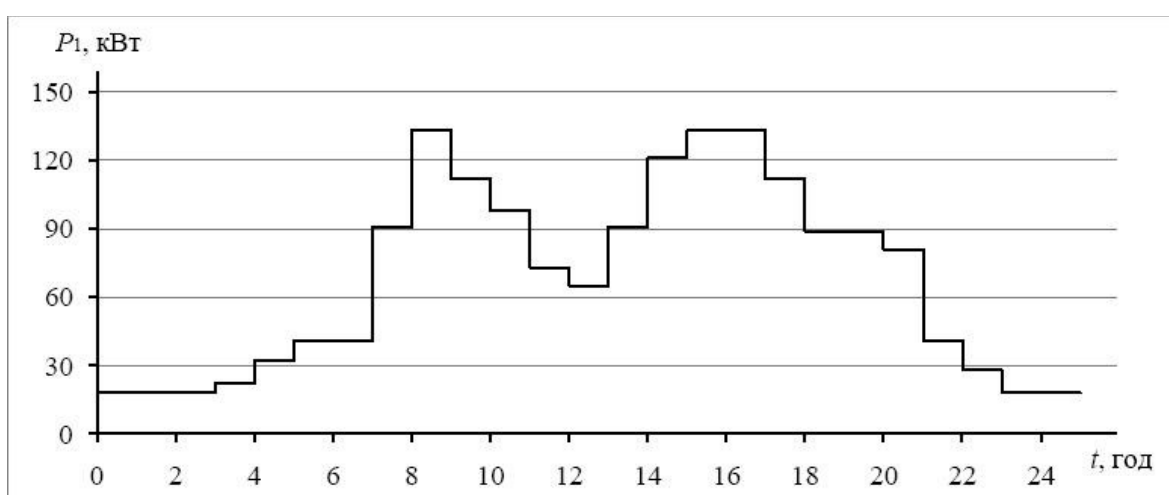
Робота АД завжди супроводжується його нагріванням, що зумовлено процесами, які відбуваються в ньому, і втратами потужності. Нормативний строк служби двигуна визначається температурою нагрівання його ізоляції. У сучасних двигунах застосовується кілька класів ізоляції, припустима температура нагрівання яких становить: для класу А - 105 °С, Е - 120 °С, В - 130 °С, Р - 155 °С, Н - 180 °С, С - понад 180°С. Перевищення припустимої температури призводить до передчасного руйнування ізоляції та істотного скороченню терміну роботи двигуна.

В експлуатації доводиться мати справу з режимами, не нормованими стандартами. Найбільш характерним є режим зі швидкозмінним навантаженням, коли двигун періодично входить у режим перевантаження, повертаючись потім до номінального, або входячи у режим роботи з навантаженням меншим номінального.

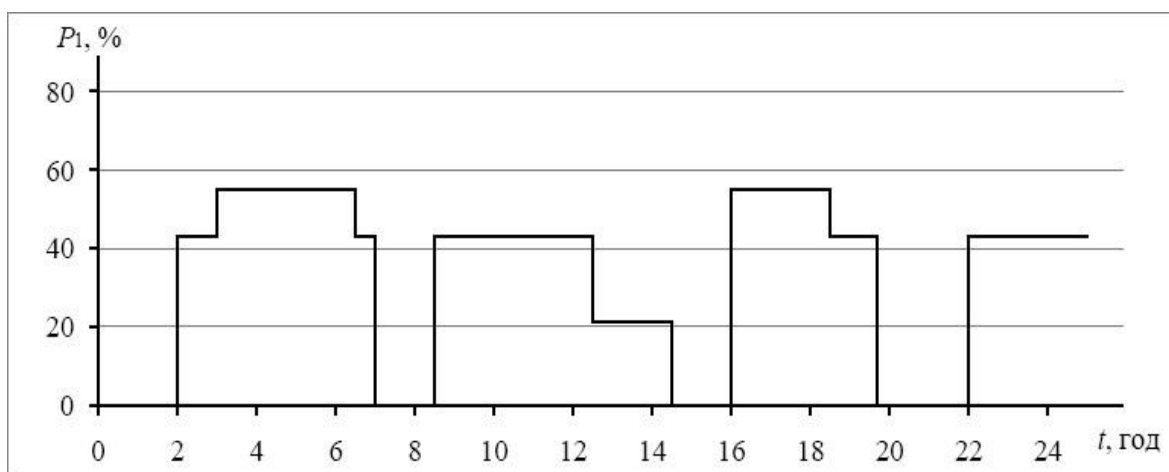
Характер навантаження двигуна залежить від механізму, який він приводить у рух. Двигуни вентиляторів і транспортних засобів зазвичай працюють зі сталим навантаженням. Двигуни млинів, дробарок і подрібнювачів мають різкозмінний характер роботи. Один і той само механізм залежно від технологічних умов роботи може працювати з різними графіками електричних навантажень (ГЕН) (рис. 2.3) [23]. Різний характер роботи обумовлює можливі різні (диференційовані) підходи до визначення технічного стану АЕП. Тому постає завдання класифікувати можливі режими роботи за ГЕН.



а



б



в

Рис. 2.3 ГЕН насосних установок: а - знятий експериментально під час проведення енергоаудиту молокозаводу м. Вишневе; б - типовий комунального підприємства водопостачання; в - шахтного водовідливу

Через недоліки проектування та експлуатації АЕП коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50% [2]. Наприклад, АЕП насосів комунального водопостачання завантажено на 20-30% від установленної потужності [7]. За даними [8], у вітчизняній практиці коефіцієнт завантаження в середньому дорівнює лише 0,3-0,4, в той час як у промислово розвинених країнах середнє завантаження АЕП перевищує 0,6.

Більшість АЕП сконструйовано для роботи з навантаженням 75-100% від номінальної потужності. Одною з причин цього є те, що оптимальне навантаження двигуна зазвичай складає 75% від номінального, а іншою, – що потужність двигуна вибирається за умовами пуску. Для цього діапазону потужностей ККД приблизно сталий і близький до номінального. Для коефіцієнту потужності теж існує такий діапазон, але він дещо вужчий і складає 80-100% номінальної потужності [31].

Оптимальне значення коефіцієнта завантаження асинхронного двигуна



- еквівалент реактивної потужності, кВт/квар; — — -
 втрати активної потужності на холостому ході, кВт; — — -
 втрати активної потужності для 100% завантаження, кВт; — -
 розрахунковий коефіцієнт, який залежить від конструкції двигуна.

Робота ЕМС з АД в недовантаженому режимі призводить до значних втрат, зниження ККД та коефіцієнта потужності. Встановлюється неефективний баланс складових потужності (зі збільшеним рівнем реактивної), що підвищує втрати активної складової потужності в живильних мережах. Для таких низьких, як у вітчизняній практиці, коефіцієнтів завантаження ККД електропривода зменшується на 5-7%, а $\cos\varphi$ - на 20-30%.

У значущості економії електроенергії, отриманої в результаті підвищення завантаження машин, можна переконатися з рис. 2.4. Тут k_W - коефіцієнт зростання питомої витрати електричної енергії

$$k_W = \frac{W_\phi}{W_{\text{пв}}},$$

де W_ϕ - фактичне значення питомої витрати електроенергії за фіксований проміжок часу, кВт год/(година, доба, тощо); $W_{\text{пв}}$ - питома витрата енергії за відсутності неробочого ходу і завантаженні $k_3 = 1$, кВт год/(година, доба тощо) [2].

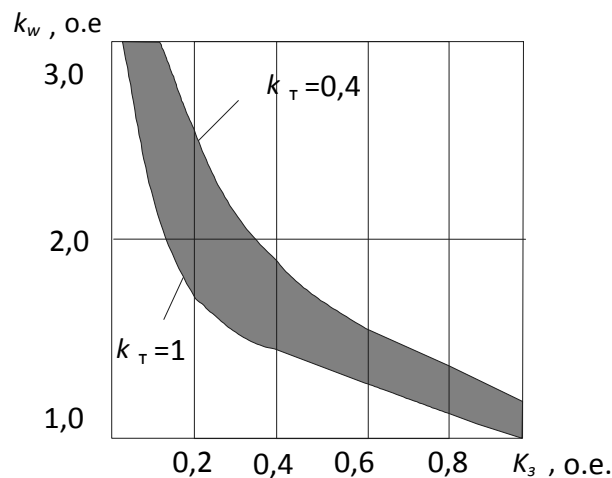


Рис. 2.4 Залежність коефіцієнту зростання питомої витрати електричної енергії від коефіцієнту завантаження

Коефіцієнт використання робочої машини

$$k_T = \frac{t_H}{t_H + t_{\text{вх}}},$$

де t_H - час роботи під навантаженням, год.; $t_{\text{вх}}$ - час вільного ходу, год.

На рис. 2.5 зображено усереднену залежність ККД від коефіцієнту завантаження, що показує, наскільки небажаною є робота привода з низьким

коефіцієнтом завантаження.

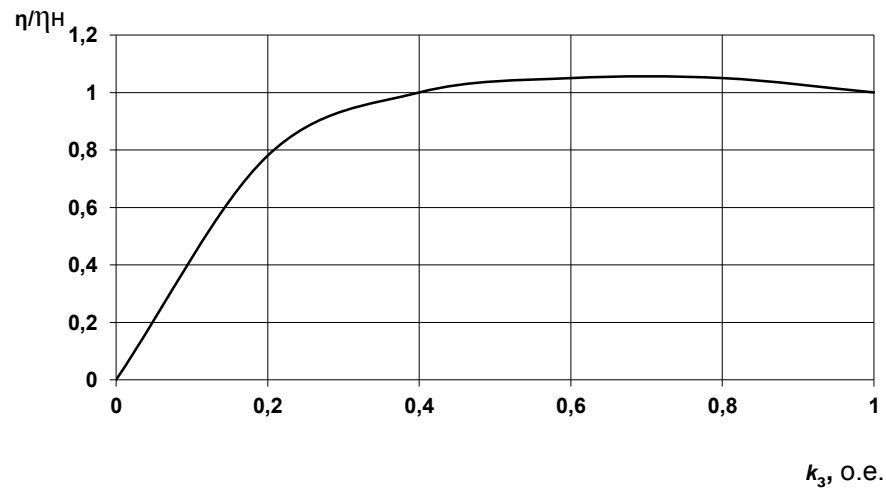


Рис. 2.5 Усереднена залежність ККД від коефіцієнту завантаження

У світі відбувається посилення вимог щодо рівня енергоспоживання та ККД АД. Американський конгрес у 1997 році прийняв “Акт енергетичної політики” [Energy Polise Act (ЕРАСТ)], яким встановив вимоги в тому числі й до енергоефективності двигунів. В ЄС рішенням СЕМЕР встановлено нові рівні показників енергоефективності, які діють з 2011р. Новий стандарт визначає наступні рівні ККД для низьковольтних трифазних АД номінальною потужністю 0,75 – 375 кВт: IE1 – стандартний (IE – international Efficiency); IE2 – високий; IE3 – найвищий (рис. 2.6) [37]. В РФ показники енергоефективності АД встановлюються ГОСТ Р 51677-2000.

Підвищення ККД АД навіть на 2-3% є досить актуальним, оскільки інвестиції у підвищення ККД швидко окуплюються за рахунок зниження експлуатаційних витрат через зменшення споживання електроенергії та підвищення надійності. В середньому вартість реалізації можливості енергозбереження стосовно підвищення ККД на 1% становить приблизно 10% вартості двигуна [37].

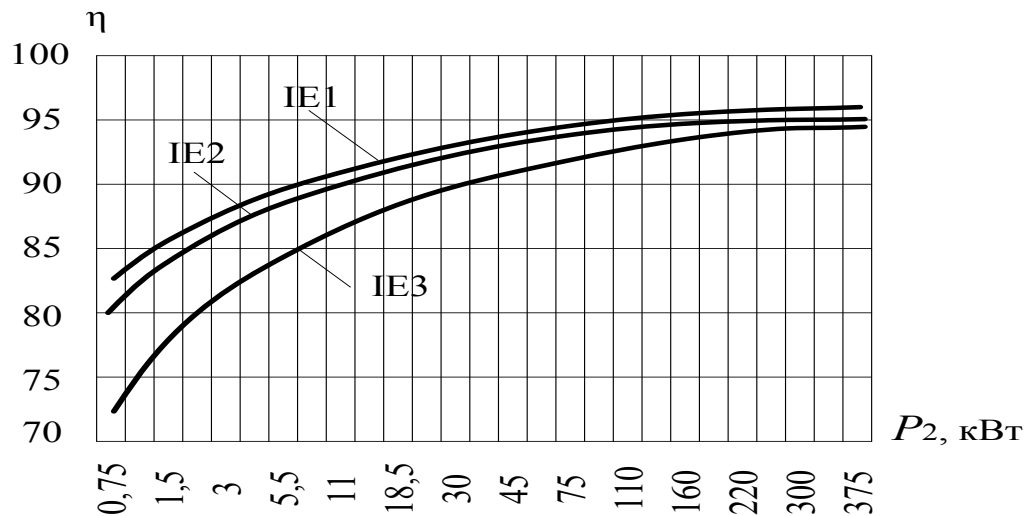


Рис. 2.6 Рівні ККД для нового стандарту енергоефективності
низьковольтних трифазних АД

Коефіцієнт потужності АД істотно залежить від його навантаження. Для неробочого ходу АД коефіцієнт має низькі значення, оскільки відносно велика частка реактивної потужності в порівнянні з активною. Зі збільшенням навантаження АД зростає і $\cos\varphi$, досягаючи свого максимального значення в області номінального навантаження (рис. 2.7).

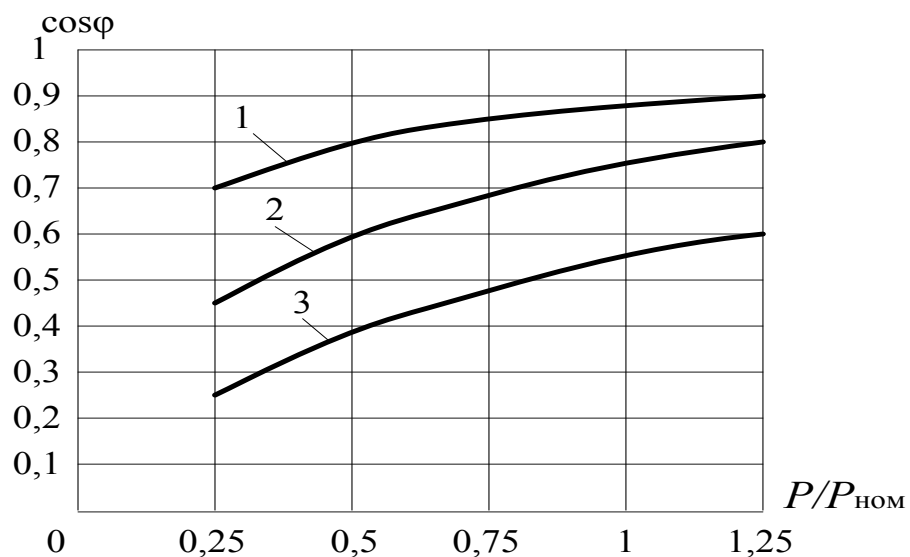


Рис. 2.7 Залежність $\cos\varphi$ від кратності механічного навантаження АД
серії 4А для різних рівнів номінальних значень коефіцієнту потужності
(1 – $\cos\varphi = 0.9$; 2 – $\cos\varphi = 0.8$; 3 – $\cos\varphi = 0.7$)

Енергоефективність і технічний стан АД також залежать від умов його експлуатації. Під умовами експлуатації розуміють сукупність зовнішніх факторів, що істотно впливають на працездатність електропривода. До них належать температура довкілля, вологість, тиск, вібрації, удари тощо. Механічний резонанс також призводить до руйнування конструкції. Як наслідок, у двигунів можливі руйнування окремих елементів і спаїв, порушення контактів, замикання проводів з ушкодженою ізоляцією, самовідгвинчування болтів, гайок тощо.

Аналіз робіт щодо надійності АЕП показав, що надійність двигуна визначається насамперед дефектами ізоляції, і вони містять такі складові

дефектність ізоляції в даному стані; приріст дефектності, обумовлений дією технологічних факторів під час виготовлення обмоток; приріст дефектності, обумовлений дією експлуатаційних чинників (H – швидкість дефектоутворення, яка залежить від величини основних експлуатаційних впливів, а саме – температури довкілля, частоти комутації, вібрації;

Підвищена зношуваність ізоляції, зумовлена порушенням режиму експлуатації АЕП, є поширеним явищем на підприємствах через відсутність у багатьох випадках засобів технічного контролю. В більшості випадків причиною відмов є пошкодження міжвиткової ізоляції. Пошкодження міжфазної та пазової ізоляції зазвичай виникають як наслідок міжвиткових замикань та являють собою розвиток останніх [39].

Вразливість міжвиткової ізоляції обумовлена входженням її в механічну систему, що складається з різнорідних елементів: міді провідників та полімерних ізоляційних матеріалів. Деформації від зміни температури, електродинамічних зусиль, вібрації обмотки призводять до розвитку внутрішніх напружень в ізоляції та, як наслідок, утворення дефектів. Вид

дефекту залежить від зовнішніх експлуатаційних факторів та внутрішніх особливостей ізоляції АЕП [38].

Негативним фактором старіння ізоляції є дія хімічно активних середовищ та вологості. Це хімічно активні речовини - луги та кислоти, що знаходяться в навколишньому середовищі. Ізоляцію двигуна руйнують також мастила та пари розчинників. Пил, що знаходиться в навколишньому повітрі, спричиняє на ізоляцію абразивну дію [40].

Під дією вологості відбувається гідролітичне руйнування ізоляційних матеріалів. Проникнення вологості і видалення її збільшують пористість ізоляції. Ці процеси розвиваються паралельно з іншими явищами старіння ізоляції та взаємно впливають один на одного. Зволоженню піддається ізоляція устаткування, яке мало використовується протягом доби або року, працює зі значним недовантаженням та знаходиться в сирих приміщеннях. Мінімальна тривалість неробочого періоду для двигуна, після якої починається зволоження, становить 2,7 - 5,4 год., в залежності від габариту [34]. Пил з повітря спричиняє на ізоляцію абразивну дію [40].

Для подовження терміну служби двигуна існує ряд методів та засобів, до яких належать: профілактичне просушування ізоляції, просочування її компаундами тощо. Вони мають частковий характер і не дають потрібного результату в досягненні нормативного ресурсу двигуна.

АД, що випускаються, можуть мати енергетичні й технічні характеристики, які в гіршу сторону відрізняються від паспортних даних внаслідок використання неякісних матеріалів та вибіркового контролю якості двигунів, значних допусків на їх технічні параметри.

Важливим фактором впливу на рівень енергоефективності АД є якість його обслуговування та ремонту. Метою технічного обслуговування та ремонту електромеханічного устаткування є підтримання та відновлення його працездатності. Проведення ремонтів після відмови двигуна, вимушена заміна його деталей та елементів є економічно невиправданими через значні витрати [41]. За технологічними показниками якість ремонту двигунів не відповідає

рівню технології їх виробництва, чим пояснюється низький рівень надійності устаткування навіть за однакових параметрів використаних матеріалів та ремонтного обладнання [42].

Значну частину парку електричних машин на підприємствах складають раніше ремонтвані агрегати. Характеристики відремонтованих АД істотно відрізняються від щойно випущених виробником через те, що в результаті експлуатації та ремонту змінюються характеристики конструкційних матеріалів. Відбувається насичення сталі та зростання струму намагнічування, який стає несинусоїдальним, оскільки містить крім першої також непарні гармоніки 5,7,11... порядків [43]. Зменшення під час ремонту АД кількості витків на 10% призводить до різкого підвищення густини магнітного потоку у сталі статора і збільшення струму холостого ходу до 25%, зниження ККД й коефіцієнту потужності [31].

Найпоширенішим способом вилучення обмотки з пазів є відпал, коли термічній обробці піддається не лише мідь, що відпалюється, а й електротехнічна сталь, що призводить до значної зміни її характеристик і цілісності [66]. Наслідок цього - збільшення втрат в сталі. Іноді замінюється ізоляція, поставлена заводом виробником, на гіршу, що є в наявності. Це призводить до зниження електричної міцності ізоляції, погіршення її теплопровідності та підвищеного нагрівання обмоток [66]. Крім цього, не завжди вдається знайти провідник таких само параметрів і марки, як було встановлено спочатку, а також здійснити в умовах електроремонтного підприємства просочення обмотки на тому рівні, який є на заводі виробнику [69]. Також в результаті порушення ізоляції між листами і механічних ушкоджень у сталі в результаті ремонту виникають локальні замкнуті контури, що призводить до збільшення додаткових втрат на вихрові струми.

Зазначені особливості капітального ремонту вносять зміни в параметри і характеристики АЕП і спричиняють необхідність післяремонтних випробувань двигунів [91]. Проведені дослідження дають підставу вважати, що з

капітального ремонту виходить машина з погіршеними характеристиками і зниженою навантажувальною здатністю [90].

2.2 вплив якості напруги живлення на електромеханічні системи з синхронними двигунами

Проблема електромагнітної сумісності промислових СД з мережею живлення загострилась у зв'язку з поширенням потужних вентильних перетворювачів, які при своїй економічності і технологічній ефективності спричиняють негативний вплив на якість електроенергії [70,113,133].

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними коефіцієнтами.

Коефіцієнтом несинусоїдності кривої напруги

$$\frac{\sum_{n=1}^N U_n}{U},$$

де U_n - діюче значення n -ої гармонічної складової напруги, В; n - порядок гармонічної складової напруги; N - порядок останньої з гармонічних складових напруги, стандартом встановлюється $N = 40$; U - діюче значення напруги, В.

Коефіцієнтом n -ої гармонічної складової напруги

$$\frac{U_n}{U}$$

Стандарт дозволяє не враховувати гармонічні складові порядків понад 40 або ті, значення яких менші за 0,3%.

Математична модель синхронного двигуна (СД) при несинусоїдальній напрузі живлення [48]

де Ψ – потокозчеплення обмотки статора; U – напруга, струм та
резистивні опори окремих фаз статора; p - кількість пар полюсів машини; J -
момент інерції; M - механічний момент; γ - кут повороту ротора.

The block diagram illustrates the architecture of the proposed adaptive fuzzy inference system. It features four primary input ports: 3 (labeled USA), 1 (labeled ISA), 2 (labeled ISB), and 4 (labeled USB). These inputs are distributed across the system to feed into various processing blocks. The system includes several constant blocks (Constant1 through Constant14), gain blocks (Gain, Gain1, Gain2), multiplication blocks (Product1 through Product10), addition and subtraction blocks (+, -), a square root block (Sqrt), and division blocks (Divide, Divide1). The inputs are processed through a series of operations, including multiplication, addition, subtraction, and division, leading to the final output 'w'. The diagram also shows a feedback loop involving a square root block and a division block, which feeds back into the system.

Рис. 2.8 Модель СД з урахуванням несинусоїдальності напруги в середовищі MATLAB

В наведеній моделі (2.1) параметри СД не залежать від частоти живильної напруги. Згідно з вимогами ГОСТ 13109-97 коефіцієнт $k_{\text{г}}$ гармонічної складової напруги не повинен перевищувати 5 %.

На рис. 2.9 зображено часові діаграми пускового струму та швидкості за результатами комп'ютерного моделювання.

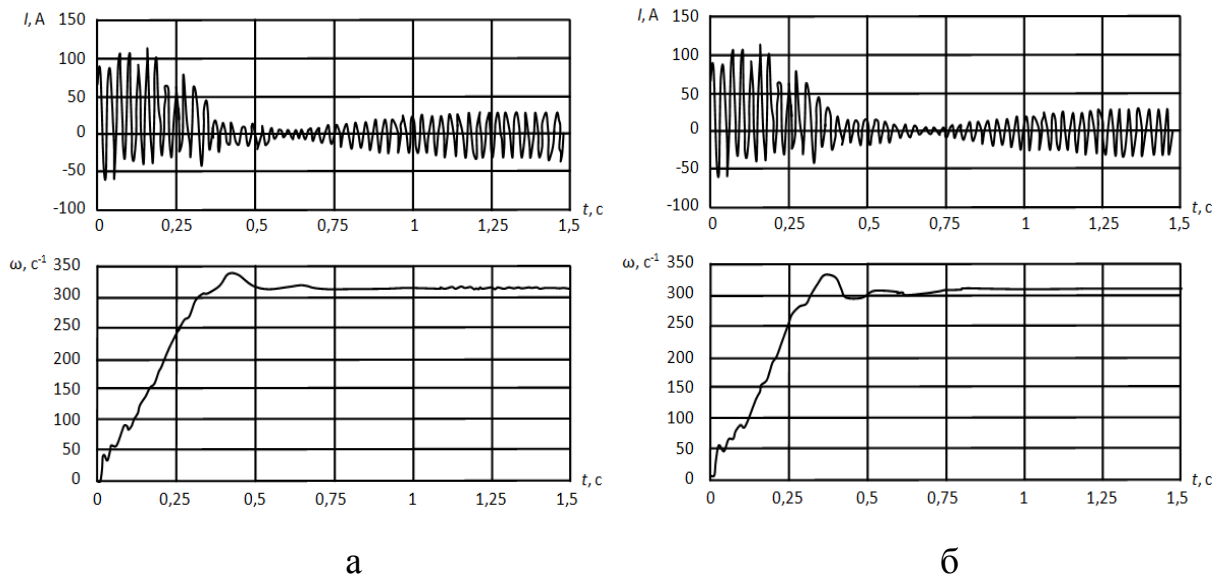


Рис. 2.9 Результати моделювання синхронного двигуна:

а – ; б -

Проведені розрахунки показують, що наявність вищих гармонік напруги призводить до виникнення коливань швидкості в усталеному режимі, а отже - до погіршення ефективності роботи електропривода.

Відхилення напруги – це різниця між дійсним і номінальним значеннями напруги

В умовах нормальної роботи на затискачах електродвигунів та апаратів для їх пуску та управління відхилення напруги від номінального значення допускаються в межах від -5 до +10%. У післяаварійних режимах допускається додаткове зниження напруги на 5%.

Збільшення напруги призводить до зростання струму намагнічування двигуна з боку статора і зниження індуктивного опору взаємної індукції по поздовжній осі двигуна в порівнянні з номінальним режимом

де k – коефіцієнт, для переходу від обмотки якоря до обмотки збудження; σ – магнітна індукція в зазорі; τ – число послідовно з'єднаних витків, яким при цьому магнітному потоці визначається значення ЕРС у фазі обмотки; k_1 – обмотковий коефіцієнт; U – відносне значення напруги.

Зі зменшенням значення α знижується і опір $R_{\text{вх}}$. Це в свою чергу, викликає [46,124] непропорційне зниження струму збудження

$$\text{---} \tag{2.2}$$

де $U_{\text{маг}}$ - магнітна напруга повітряного зазору для напруги, що дорівнює

Тоді при характерному завантаженні синхронних двигунів активною потужністю значення будуть змінюватися в межах 0,903 - 1,066, струми збудження, визначені за (2.2), необхідно підтримувати в межах 0,878 - 0,923 від номінального значення.

Значний вплив спричиняють відхилення напруги на термін служби синхронного двигуна (термін служби скорочується при зниженні напруги і великому завантаженні двигуна). У цьому випадку збільшується струм двигуна і відбувається більш інтенсивне старіння ізоляції. Так, при номінальному завантаженні двигуна та відхиленні напруги на затискачах на 10% термін його служби скорочується вдвічі.

Несиметрія напруг. При несиметрії напруг мережі в синхронних машинах поряд з виникненням додаткових втрат активної потужності і нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації внаслідок появи знакозмінних обертальних моментів і тангенціальних сил, пульсуючих з подвійною частотою мережі. При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, а особливо - за недостатньої міцності й наявності дефектів зварних з'єднань. За несиметрії струмів, що не перевищує 30%, небезпечні перенапруги в елементах конструкцій, зазвичай, не виникають. За несиметрії напруг в 2% терміни служби СД скорочуються на 16,2%.

Як міру несиметрії напруг використовують коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності k_{2U} , який дорівнює відношенню напруги зворотної послідовності $U_{\text{зв}}$ до напруги прямої послідовності $U_{\text{пр}}$

—

Несиметрія трифазної системи напруг виникає в результаті накладення на систему прямої послідовності напруг системи зворотної послідовності, що

призводить до зміни абсолютних значень фазних і міжфазних напруг (рис. 2.10,а). Крім несиметрії, що викликається напругою системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладання на систему прямої послідовності напруг системи нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симетричної системи міжфазних (рис. 2.10,б).

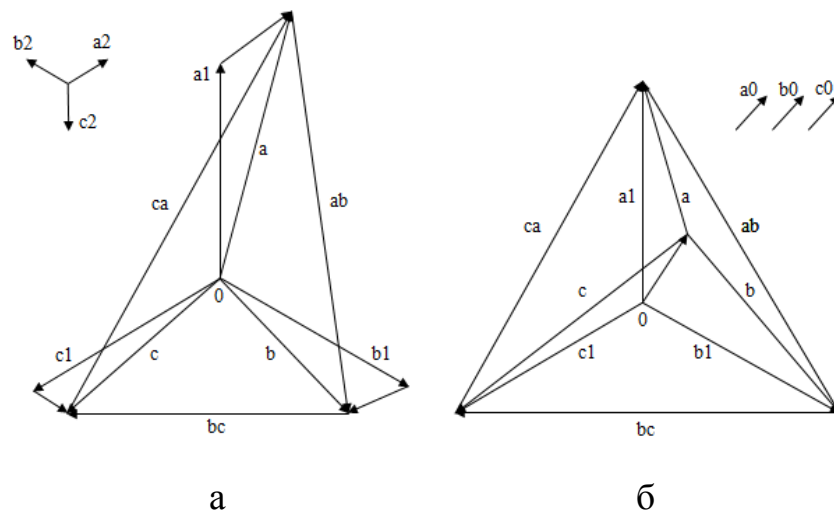


Рис. 2.10 Векторна діаграма напруг

а – пряма і зворотня послідовність; б – пряма і нульова послідовність

Струм основної частоти являє собою струм зворотної послідовності і визначається рівністю [8]

Відносне значення струму знижується при збільшенні тривалості ввімкнення. В результаті великі темпи зростання струмів в обмотках електродвигуна при несиметрії мережі спостерігаються при збільшенні тривалості ввімкнення (рис. 2.11).

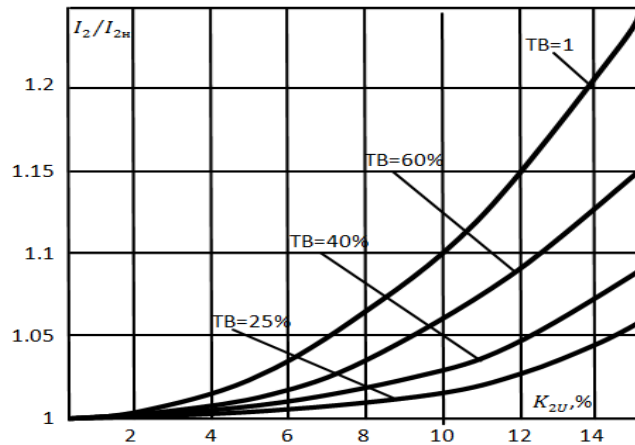


Рис. 2.11 Графіки залежності струму зворотної послідовності для різної тривалості ввімкнення.

Відхилення частоти. Під відхиленням частоти розуміють різницю між дійсним і номінальним значеннями основної частоти

_____ .

У нормальному режимі роботи енергосистеми допускають відхилення частоти, усереднені за 10 хв, в межах від -0,1 Гц до +0,1 Гц. Допускається тимчасова робота системи з відхиленням частоти, усередненим за 10 хв, в межах від -0,2 Гц до +0,2 Гц.

Розмах коливань частоти - різниця між найбільшим і найменшим значеннями частоти за певний проміжок часу

Під коливанням частоти розуміють її зміну, що відбувається зі швидкістю 0,2 Гц за секунду. Розмах коливань частоти не повинен перевищувати 0,2 Гц.

Намагнічувальний струм СД збільшується при зменшенні частоти і зменшенні x_{ad} зі зростанням насичення, обумовленим збільшенням магнітного потоку [120]

Струм статора і реактивна потужність. Зміна частоти викликає зміну активної та реактивної складових струму статора. Як видно з (2.3), при заданому навантаженні на валу активна складова змінюється обернено пропорційно напрузі мережі, реактивна - за більш складним законом, оскільки при зміні напруги змінюється . Визначимо зміну реактивної складової струму статора з урахуванням зміни насичення:

Після розв'язання (2.4) відносно знайдемо реактивну потужність в частках номінальної реактивної потужності

Рівняння (2.5) показує, що при зниженні частоти і незмінному струмі збудження реактивна потужність, що видається в мережу, зменшується (рис. 2.12). За наявності автоматичного регулятора збудження струм збудження буде збільшуватися, відповідно зросте і реактивна потужність, що видається в мережу [47].

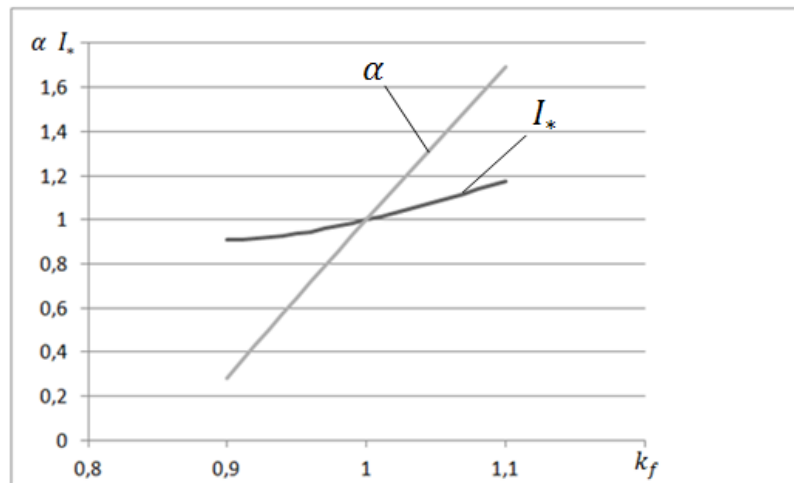


Рис. 2.12 Залежність реактивної потужності () і струму статора () СД від частоти і напруги

Виконані розрахунки наочно показали залежність реактивної потужності від частоти за відсутності автоматичного регулювання збудження: при зниженні частоти на 5% реактивна потужність, що віддається двигуном в мережу, зменшується на 30%.

2.3 Завдання моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем

Проблема енергоефективності та експлуатаційної надійності ЕМС є системною і не піддається вирішенню частковими заходами у вигляді застосування окремих технічних засобів. Необхідний комплексний підхід з використанням методів моніторингу і функціонального діагностування.

Енергоефективність ЕМС прямо пов'язана з її технічним станом. Несправність механізму, наприклад, насосної установки та порушення технологічного режиму (заклинювання підшипників, проривання напірного трубопроводу тощо) призводить до зміни навантаження. З іншого боку, двигун може знаходитися у стані прихованої відмови задовго до відпрацювання ним нормативного ресурсу. Наприклад, нерівномірність повітряного зазору АД призводить до виникнення гармонічних полів, внаслідок чого збільшуються

втрати в сталі та міді [31]. У цих випадках, а також у разі погіршення якості напруги живлення, знижуються ККД і коефіцієнт потужності двигуна. Таким чином, показники енергоефективності ККД та коефіцієнт потужності АД можуть слугувати критеріями енергетичного і технічного стану ЕМС в цілому.

Недоліком багатьох публікацій з даної тематики є ізольоване висвітлення питань енергоефективності та надійності, тобто, діагностування енергетичного й технічного стану АЕП. Відомо, що працездатний електропривод може бути несправним, тобто знаходитися у стані прихованої відмови. Такий стан може настати задовго до відпрацювання нормативного ресурсу і пов'язаний з деструктивними змінами в АЕП. Так, наприклад, нерівномірність повітряного зазору АЕП, який порушується внаслідок деформації сталі, вигину валу або зміщення підшипникових щитів, призводить до виникнення гармонічних полів, внаслідок чого збільшуються втрати в сталі та електричні втрати в міді АЕП, що знижує його ККД та $\cos$ [31].

Отже, за наявності деяких технічних пошкоджень, які не призводять до виходу двигуна з ладу, показники його енерговикористання та енергоспоживання можуть мати низькі значення. Тому показники енергоефективності ККД та $\cos$, можуть слугувати ще й критерієм технічного стану АЕП, адже двигун з технічними проблемами працює з низькими показниками енергоефективності. У свою чергу такий показник технічного стану, як відносна зношеність, може характеризувати ефективність перетворення енергії.

В результаті впливу багатьох чинників, зокрема таких, як робота АЕП з недовантаженням, недостатнє технічне обслуговування, нераціональне керування технологічним процесом, випадкових факторів, - реальне споживання енергії завжди відрізнятиметься від нормативного. Контролювання та оцінювання вказаних розходжень між ідеальним та фактичним споживанням енергії є головним завданням діагностування енергоефективності АЕП. Сам собою контроль не зекономить енергію, але з його допомогою можна

визначити, де і коли слід вжити заходів для усунення неефективного її використання.

На практиці фактичний строк безвідмовної роботи АЕП становить до 50% часу, встановленого виготовлювачем. Збільшення строку служби АЕП багато в чому залежить від того, наскільки ефективно буде розв'язано завдання діагностування. Планування ремонтів АЕП можливе лише на основі аналізу даних поточного стану.

Відповідно до ГОСТ 20911-89 задачами *технічного діагностування* є контроль технічного стану, пошук місця та визначення причини відмови, прогнозування технічного стану. Метою прогнозування технічного стану може бути визначення залишкового ресурсу устаткування. Прогнозування залишкового ресурсу можливе лише на основі аналізу стану устаткування. Також до завдань системи технічного діагностування можна віднести визначення шляхів та засобів подовження чи відновлення працездатності. *Головна мета діагностичного контролю* – на основі визначення стану устаткування максимальне використання ресурсу та попередження аварійних відмов [49].

Мета діагностування енергоефективності ЕМС – на основі контролювання у реальному часі технічного і енергетичного стану забезпечити найефективніше використання фактичного ресурсу з мінімальним споживанням електроенергії та запобігти аварійним режимам.

Головним (тактичним) завданням діагностування енергоефективності ЕМС (відповідно до ГОСТ 20911-89) є контролювання її технічного й енергетичного стану, пошук місця і визначення причини відмови, прогнозування працездатності, визначення шляхів і засобів її подовження або відновлення.

Головними методами досягнення поставленої мети є:

встановлення безперервного або достатньо частого контролю для потенційно ненадійного, дефектного обладнання, експлуатація якого можлива

невизначений час, з метою своєчасного його відключення по досягненні встановлених меж контрольованих параметрів;

своєчасне виведення обладнання з експлуатації для проведення попереджувального ремонту у відповідності не з планом, а з об'єктивними даними з метою повного або часткового відновлення ресурсу.

Завданнями моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності ЕМС є (рис. 2.13) [20]:

контролювання первинних діагностичних параметрів (миттєвих значень струму й напруги АД), режиму навантаження (ГЕН), якості напруги живлення (ПЯЕ), спектрального складу струму та напруги, умов експлуатації (температури довкілля);

моделювання ГЕН та вибір кроку дискретизації;

діагностування й оцінювання (порівняння фактичних і еталонних значень параметрів; виявлення величини, причини, місця і часу відхилення параметрів від номінальних або регламентованих значень) ПЯЕ, механічних, електромагнітних і теплових параметрів за математичними моделями, параметрів енергоефективності, розпізнавання технічного й енергетичного та теплового стану, прогнозування залишкового ресурсу й спожитої електроенергії та строку наступного тестування;

захист (струмовий, тепловий тощо) АД від аварійних ситуацій (у випадку виникнення аварії подальші дії недоцільні);

формування протоколів діагностування, створення історії стану й поведінки системи.

Збільшення строку служби АЕП залежить від того, наскільки ефективно буде розв'язано завдання моніторингу та функціонального діагностування. Тож варто зазначити, що планування ремонтів АЕП в сучасній економічній ситуації можливе лише на основі аналізу даних поточного стану.



Рис. 2.13 Завдання моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності ЕМС

Основним інструментом енергозбереження на підприємстві є енергоменеджмент [76]. Енергоменеджмент являє собою процес керування всіма аспектами діяльності в галузі енергозбереження підприємства. Його основною метою є досягнення високого рівня енергоефективності виробництва, а основним завданням - забезпечення найбільш ефективних режимів роботи та складу устаткування [14]. Вирішення вказаних завдань значною мірою залежить не лише від стану об'єкту, але й від принципів функціонування засобів моніторингу та діагностування енергоефективності.

Діагностування енергоефективності ЕМС поєднує завдання технічного діагностування з завданнями енергетичного менеджменту (безперервного аудиту електроенергії, що споживається), основною функцією яких є управління енергоспоживанням та технічним станом.

Засоби функціонального діагностування енергоефективності ЕМС фактично є інструментом енергоменеджера в його діяльності з ефективного і цілеспрямованого використання енергоресурсів. Такий підхід дозволяє оцінювати стан ЕМС на всіх етапах її життєвого циклу – від введення в експлуатацію до списання [19].

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

3.1 Аварійні режими асинхронного електропривода

Аварії АД поділяються на два основних типи: механічні й електричні [16]. Механічні аварії – це деформація або поломка ротора, ослаблення кріплення осердя статора до станини, ослаблення обпресування осердя ротора, пошкодження підшипників ковзання, руйнування сепаратора, кільця або кульок в підшипниках кочення, поломка крильчатки, відкладення пилу й бруду в рухомих елементах тощо.

Причиною більшості механічних аварій є радіальні вібрації через несиметрію мережі живлення, механічні перевантаження на валі двигуна, брак комплектуючих елементів або перевищення допусків при складанні. До 10% всіх аварій АД мають механічне походження. З них 8% припадає на частку аварій, пов'язаних з несиметрією фаз і лише 2% – на аварії, пов'язані з механічним перевантаженням. Частка аварій через брак незначна, тому її можна не брати до уваги. Оцінка ймовірності виникнення механічних аварій відсутня. Значна їх частина має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирання двигуна. Постійний контроль напруги мережі й навантаження на валу АД дозволяє звести кількість цих аварій до мінімуму.

Електричні аварії АД поділяються на три типи:

мережеві аварії (аварії за напругою), пов'язані з аваріями в електромережі;

струмові аварії, пов'язані з обривом провідників в обмотках статора, ротора або кабелю, витковими й фазними замиканнями обмоток, порушенням контактів і руйнуванням з'єднань, виконаних паянням або зварюванням, а також аварії, що призводять до пробію ізоляції в результаті нагрівання, викликаного протіканням струмів перевантаження або короткого замикання;

аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, руйнування або зволоження.

Аналіз ПЯЕ під час роботи АД показує, що у разі зменшення напруги в мережі зростає струм статора. Це призводить до інтенсивного нагрівання ізоляції АД й скорочення його строку служби внаслідок прискореного старіння ізоляції та її пробою. Підвищення напруги призводить до збільшення магнітного потоку статора, струму намагнічування, нагрівання осердя, а також споживаної з мережі реактивної потужності. Як наслідок – зниження коефіцієнта потужності.

Слід зазначити, що існують мережеві аварії, які стандартами не регламентуються і є проявами несиметричних режимів роботи АД. Це обриви однієї з фаз, порушення послідовності фаз, їх «злипання».

Обриви фаз, зазвичай, пов'язані з обривом жили живильного кабелю, згорілим запобіжником або відімкненням автомата в одній з ліній, чи обривом самої лінії. При з'єднанні обмоток двигуна зіркою напруга у двох фазах ділиться порівну й становить половину лінійної, а у третій відсутня. Такі режими призводять до підвищеного енергоспоживання з мережі, перегрівання обмоток статора. Поле з обертового перетворюється в пульсуюче, струм в обірваній фазі відсутній, у двох інших збільшиться на 50%. Ротор двигуна не обертається навіть на неробочому ході. У деяких двигунах, якщо обрив відбувся під час роботи, на обірваній фазі генерується напруга «рекуперації» близька за фазою та амплітудою до мережевої. Двигун переходить в гальмівний режим роботи, і, якщо його не вимкнути, згоряє протягом декількох хвилин.

Аварійний режим «злипання» фаз відбувається у випадку обриву однієї з живильних фаз і замиканні її з боку двигуна на іншу. При цьому одна й та сама фазна напруга подається на дві фази двигуна, на третій лишається в нормі. За незначної амплітудної несиметрії спостерігається фазна несиметрія, що призводить до появи значних напруг зворотної послідовності, які викликають перегрівання двигуна й вихід його з ладу.

Порушення послідовності фаз спричиняє реверсивний режим роботи, що неприпустимо, оскільки викликає обертання механізму в інший бік й може призвести, крім аварії самого двигуна, до ушкодження агрегату.

Постійний моніторинг наявності та якості напруги живлення, включаючи гармонічний аналіз, обчислення діючих або середніх значень напруги до вмикання двигуна, контроль за його станом під час роботи, у т. ч. за змінами параметрів фазних напруг, викликаних режимами роботи самого двигуна, дозволяє запобігти аварійним режимам, появі короткого замикання й струмового перевантаження.

Напруга на затискачах АД й фазні струми, що протікають в його обмотках, взаємозалежні, й будь-які зміни напруги мережі викликають відповідні зміни фазних струмів. Для ефективного захисту АД необхідно вимірювати фазні струми якомога частіше. Відповідно до досліджень, тривала робота двигуна зі струмовим перевантаженням лише на 5% від номінального скорочує строк його служби в 10 разів.

Значна несинусоїдальність кривої струму, особливо під час пусків, істотно впливає на величину діючого значення струму. Контролювання роботи АД не за обчисленими діючими значеннями струму, а за усередненими сигналами або за їх піковими значеннями призводить до помилкових висновків про наявність або відсутність струмового перевантаження.

Розрізняють два види струмового перевантаження АД: симетричний і несиметричний. Симетричне струмове перевантаження двигуна виникає через механічне. Більша частина струмових аварій АД зумовлена ушкодженнями всередині двигуна, що призводять до несиметричного струмового перевантаження.

У всіх випадках внутрішніх аварій двигуна спостерігається значна несиметрія фазних струмів, що перевищує в кілька разів несиметрію напруг. Постійний контроль струмів та співвідношення струмового перекосу з перекосом напруг, дозволяють робити достовірні висновки про наявність таких аварій і оперативно вимикати двигун.

Технічний стан АД визначається насамперед дефектами ізоляції [38,39]. У процесі експлуатації АД його ізоляція неминує «старіє». Основними причинами, що викликають ці процеси, є: нагрівання обмоток робочими й пусковими струмами, струмами короткого замикання й перевантаження, теплотою від сторонніх джерел; динамічні зусилля, що виникають при взаємодії провідників зі струмом; комутаційні перенапруги. На стан ізоляції великий вплив мають також умови довкілля - температура, вологість повітря, забруднення й пил.

Ступінь безпечної експлуатації електроустановок визначається станом ізоляції. Двигун допускається до експлуатації, якщо опір його ізоляції відносно корпусу перевищує 0,5 МОм. Ймовірність пробою ізоляції зростає на порядок, якщо опір ізоляції у два рази менший припустимого. При зниженні опору ізоляції існує висока ймовірність складної аварії АД - короткого замикання (КЗ) на корпус, небезпечної не тільки для самого двигуна, але й для обслуговуючого персоналу. У мережі починають протікати струми КЗ, які в 10–100 разів перевищують номінальні, а на корпусі двигуна може з'явитися висока напруга небезпечна для життя людини.

На рис. 3.1 наведено структурно-логічну схему дефектів ізоляції АД та методів їх діагностування. Окремим відгалудженням на схемі представлені конструктивні дефекти: проколи, розриви корпусної та міжфазної ізоляції, які можливі через невисоку культуру виробництва, а також після некваліфікованого капітального ремонту. Дефекти такого типу потребують діагностування під час вводу двигуна в експлуатацію.

Експлуатаційні дефекти міжвиткової ізоляції поділяються на теплові та втомні. До перших належать зміни (спікання, обвуглювання), які є наслідком неприпустимого перевищення температури обмотки. Вони можуть бути визначені методом 6 за спектральним складом струму або іншими аналогічними способами. У першу чергу цим змінам слід запобігати ефективними засобами функціональної діагностики та захисту АЕП.



Рис. 3.1 Структурно-логічна схема дефектів ізоляції АД та методів їх діагностування

Для двигунів з перевищеним відпрацьованим ресурсом основне значення має діагностування втомних пошкоджень міжвиткової ізоляції. Структурною ознакою фази критичного зношення і переходу АЕП в стан прихованої відмови є утворення наскрізних тріщин у міжвитковій ізоляційній композиції. Дефекти наскрізного характеру (відшарування, екструзія) практично не знижують напруги пробою ізоляції і не мають тенденції до швидкого розвитку. Двигун з такими пошкодженнями може безаварійно працювати тривалий час, тоді як діагностування методами 3–5 чутливими до будь-яких неоднорідностей ізоляції вкаже на негативний стан обмотки і необхідність проведення ремонту.

Таким чином, основною умовою достовірності діагностування слід вважати вибіркочну чутливість до наскрізних пошкоджень ізоляційного шару, відповідальних за електричний пробій. Цю умову задовольняють методи 1, 2, але 1 із зондувальними впливами в десятки кіловольт небезпечний для

зношеної ізоляції. Метод 2 використовує відносно безпечну область газового розряду - оборотні часткові розряди, але в класичному варіанті застосовується лише до високовольтних машин, оскільки робочих напруг низьковольтних недостатньо для утворення газового розряду в заповнених повітрям порожнинах ізоляції.

Важливим є безперервний контроль опору ізоляції обмоток статора під час роботи двигуна, оскільки діелектричні властивості ізоляції, виміряні до вмикання АД, можуть раптово змінитися під впливом електричної напруги й температури. У цьому разі використовується вимірювання струму витoku на «землю» за допомогою диференційного трансформатора струму, що реагує на появу диференційного (різницевого) струму вище деякої уставки, заданої користувачем.

Прилади захисту АД від аварійних режимів можна поділити на кілька видів: теплові захисні пристрої: теплові реле, розчеплювачі; струмозалежні захисні пристрої: плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі; термочутливі захисні пристрої: термістори, термостати; захист від аварій в електромережі: реле напруги й контролю фаз, монітори мережі; прилади максимального струмового захисту, електронні струмові реле; комбіновані пристрої захисту.

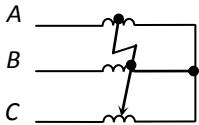
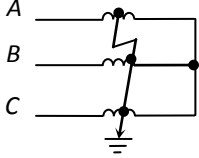
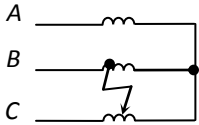
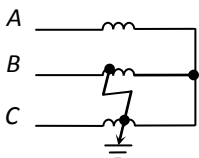
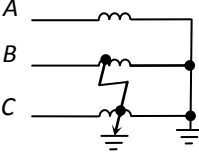
Прагнучи захистити двигуни від аварійних режимів, застосовують релейний захист: тепловий, струмовий, температурний, фільтровий та комбінований. Багаторічний досвід експлуатації АД показав, що більшість існуючих захистів не забезпечують безаварійну роботу АД. Наприклад, теплові реле розраховані на тривале перевантаження 25-30% від номінального. Але вони можуть спрацьовувати при обриві однієї фази з навантаженням 60% від номінального. При меншому навантаженні реле не спрацьовує, і АД продовжує працювати на двох фазах та виходить із ладу в результаті перегрівання обмоток. Правильний вибір захисного пристрою - важливий фактор у забезпеченні безаварійної експлуатації АД.

3.2 Методичні рекомендації щодо визначення аварійних режимів асинхронних двигунів

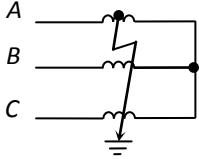
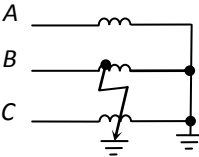
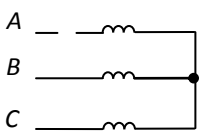
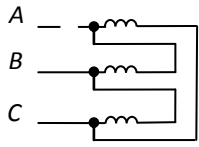
В табл. 3.1 наведено види струмових аварій асинхронного двигуна [143].

Таблиця 3.1

Види струмових аварій асинхронного двигуна

Пошкодження	Різновидності	Електродвигун
Трифазні КЗ	КЗ між трьома фазами	
	Трифазне КЗ на землю	
Двофазні КЗ	КЗ між двома фазами	
	Двофазне КЗ на землю	
	Двофазне КЗ на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
	Подвійне КЗ на землю	

Продовження табл. 3.1

Однофазні КЗ	Однофазне КЗ на землю	
	Однофазне КЗ на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
	Однофазне виткове КЗ	
Обрив фази	Сполучення Y	
	Сполучення Δ	

Трифазні симетричні КЗ. Найпростішим випадком трифазного КЗ є одночасне замикання трьох фаз в одній точці. За умови рівності перехідних опорів замикання буде симетричним, за нерівності - несиметричним. Векторні діаграми струмів і напруг є симетричними й урівноваженими, у них відсутні складові зворотних і нульових послідовностей (рис. 3.2).

На відміну від нормального режиму струми фаз різко зростають (струм КЗ може перевищувати пусковий струм двигуна), а фазні й лінійні напруги зменшуються. Крім того, залежно від співвідношення реактивного і активного опорів фази від джерела живлення до місця КЗ між струмами й відповідними ЕРС устанавлюється зсув

відмінний від зсуву в нормальному режимі [141]. У кабельних мережах менший, а в повітряних лініях - більший кута зсуву між струмом і напругою в нормальному режимі.

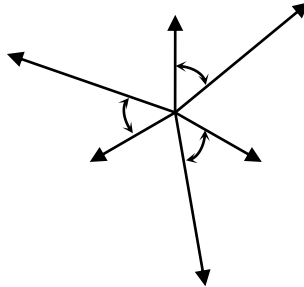


Рис. 3.2 Векторна діаграма ЕРС і струмів трифазного КЗ

Струм трифазного КЗ

—

де E_{ϕ} – ЕРС фази; $Z_{\phi.k}$ – повний опір однієї фази від джерела живлення до місця КЗ.

Максимальне значення струму КЗ (ударного) наступає через половину періоду (0,01с) після початку КЗ і визначається співвідношенням

— —

За наявності кількох двигунів, підімкнених безпосередньо до точки КЗ, сумарний ударний струм за спрощеною формулою

,

де — сума номінальних струмів усіх підімкнених двигунів [141].

Зі зниженням напруги також різко спадає обертальний момент двигуна ($M \equiv U^2$). За цими ознаками можливо визначити наявність внутрішнього симетричного трифазного КЗ.

Двофазні (міжфазні) КЗ. Міжфазні КЗ в обмотках статора є основним видом ушкоджень у АД. Вони супроводжуються значними струмами, які значно перевищують номінальний струм двигуна. Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна [100]. Найпростішим випадком двофазного КЗ є металічне замикання двох фаз в одній точці, а більш складним - замикання двох фаз через перехідні опори в одній або різних точках мережі.

Двофазні КЗ характеризуються двома особливостями [98]: вектори струмів і напруг утворюють несиметричну, але врівноважену систему, тобто мають складові прямої і зворотної послідовності й не мають складових нульової послідовності; фазні напруги в місці КЗ більші нуля. Одна міжфазна напруга знижується до нуля, а значення двох інших в 1,5 рази більше фазної. Якщо знехтувати струмами навантаження, то при замиканні фаз *B* і *C* струм у фазі *A* дорівнює нулю, а струми в ушкоджених фазах дорівнюють двофазному струму короткого замикання (рис. 3.3,а).

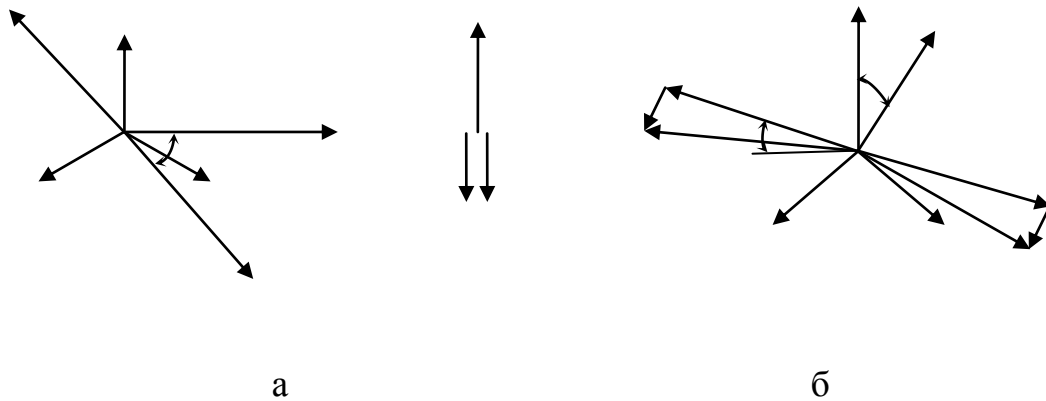


Рис. 3.3 Векторна діаграма ЕРС і струмів та діаграма напруг при двофазному КЗ без урахування навантаження (а), векторна діаграма ЕРС і струмів із урахуванням навантаження (б)

Вектор струму I_B (рис. 3.3,а) відстає від ЕРС $E_{BC} = E_B - E_C$ на кут φ , а I_C спрямований протилежно I_B . Фазні напруги ушкоджених фаз у місці КЗ дорівнюють за модулем і збігаються за фазою. Напруга ушкодженої фази

дорівнює половині напруги неушкодженої фази й протилежна їй за знаком. З векторної діаграми напруг у місці КЗ (рис. 3.3,а)

$$\vec{U}_B = -0,5 \vec{U}_A; \quad \vec{U}_C = -0,5 \vec{U}_A; \quad \vec{U}_0 = 0.$$

Якщо КЗ відбувається при навантаженні (рис. 3.3,б), то в неушкодженій фазі протікає тільки струм навантаження, а в ушкоджених фазах струм навантаження накладається на струми КЗ, збільшуючи повний струм однієї фази й зменшуючи іншої. Урахування впливу струму навантаження на струм КЗ здійснюється в тих випадках, коли максимальний струм навантаження й мінімальний струм КЗ одного порядку. Наприклад, коли КЗ відбувається при пуску двигуна, потужність якого сумірна з потужністю живильного трансформатора.

Ступінь і знак впливу струму навантаження на струм КЗ залежать від значень і кутів повних опорів навантаження й мережі. При позитивній різниці (рис. 3.3,б), тобто, при струм випереджальної фази зменшується, а відстаючої фази – збільшується (кути між ЕРС і струмом навантаження й короткого замикання). При , що є характерним для мереж з поздовжньою або поперечною ємнісною компенсацією, відбувається зворотне явище. У практичних умовах, для мереж без компенсації різниця фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55 - 60^\circ$.

При несиметричному КЗ фаз B і C маємо ; . Тоді фазні напруги та їх симетричні складові дорівнюють (рис. 3.4)

$$U_B = U_C = 0,5U_A; U_1 = U_2 = -0,5U_A; U_0 = 0.$$

Внаслідок виникнення струмів і напруг зворотної послідовності результуючий момент двигуна M при двофазному КЗ складається з різниці двох моментів: M_1 (обумовленого полем прямої послідовності) і M_2 (обумовленого полем зворотної послідовності), тобто $M = M_1 - M_2$.

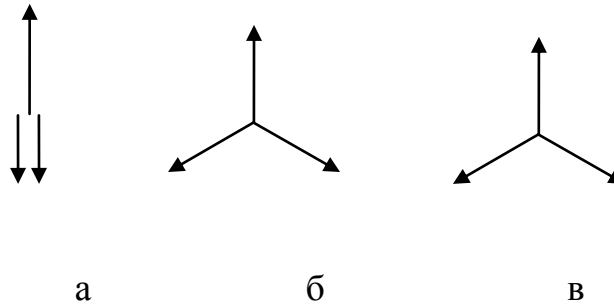


Рис. 3.4 Векторні діаграми напруг (а) у місці двофазного КЗ і їх симетричних складових (б, в)

Оскільки , а , то найбільш важкий режим роботи двигуна спостерігається під час металічного КЗ, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють $0,5$. При ковзанні $s=1$ обидва моменти дорівнюють $0,25M_{\text{п.н.}}$, внаслідок чого результуючий момент дорівнює нулю. У міру зростання швидкості момент M_1 збільшується, але результуючий момент двигуна залишається незначним, двигун може зупинитися й вийти з ладу через перегрівання.

Двофазне КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз є одним з найбільш імовірних видів міжфазних КЗ. Струми при такому ушкодженні визначаються методом симетричних складових. На рис. 3.5 зображена векторна діаграма двофазного КЗ із неоднаковим числом короткозамкнених витків [142].

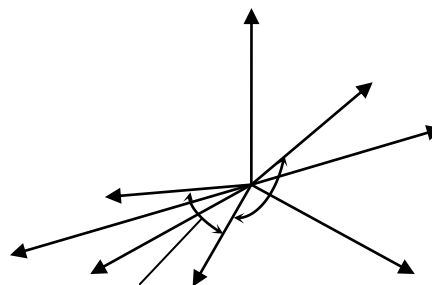


Рис. 3.5 Векторна діаграма двофазного КЗ із неоднаковим числом короткозамкнених витків

Різницю кутів між струмами фаз можна визначити як $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$, де $\varphi_{\max}$, $\varphi_{\min}$ максимальний і мінімальний кути зсуву між струмами фаз АД з боку живлення.

Різниця кутів $\Delta\varphi$ при двофазному КЗ перевищує 60° . Таким чином, цей параметр є надійним критерієм виявлення двофазного КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз.

Струми двофазних КЗ можна визначити, якщо вони перевищують пусковий струм двигуна, що спостерігається при живленні двигунів короткими лініями від шин великої потужності

—
——

Струм двофазного КЗ можна знайти за струмом трифазного — —

Двофазні КЗ на землю. КЗ на землю в мережі з ізольованою нейтраллю відрізняються від звичайного двофазного тим, що ушкоджені фази, наприклад B і C , у місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує стосовно землі зсув $0,5E_A$, а напруга неушкодженої фази A зростає до $1,5E_A$ [97].

Симетричні складові фазних напруг $U_1 = U_2 = U_0 = -U_A$.

Значення струмів ушкоджених фаз, міжфазних напруг залишаються такими само, як і при звичайному двофазному замиканні [97]. Струм нульової послідовності буде відсутній, оскільки при незаземленій нейтралі навантаження $Z_0 = \infty$. Оскільки , струм у неушкодженій фазі $I_A = I_1 + I_2 + I_0 = 0$, а струми в ушкоджених фазах ; .

У мережі із глухозаземленою нейтраллю двофазні КЗ супроводжуються сильним зниженням міжфазних і фазних напруг ушкоджених фаз (у місці КЗ до нуля) і появою складових нульової послідовності не лише у фазних напругах

(як у мережах з ізольованими нейтральми), але й у струмах. Співвідношення електричних величин найпростіше виявляються використанням методу симетричних складових [97].

Векторні діаграми напруг і струмів мають наступні особливості: струми й напруги несиметричні й невірноважені, що спричиняє появу складових прямих, зворотних і нульових послідовностей; через різке зниження напруги в місці КЗ(режиму властиве найменше значення напруги прямої послідовності) цей вид ушкоджень після трифазного КЗ є найбільш важким для стійкості енергосистеми й споживачів електроенергії.

У місці КЗ напруги ушкоджених фаз дорівнюють нулю $U_B = U_C = 0$. Напруга між ушкодженими фазами також дорівнює нулю $U_{BC} = 0$. Напруга неушкодженої фази U_A залишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими й неушкодженими фазами U_{AB} і U_{CA} знижуються до фазної напруги U_A .

Під дією ЕРС E_B і E_C в ушкоджених фазах B і C протікають струми I_B і I_C , що замикаються через землю $I_K = I_B + I_C$ [98].

Сума струмів трьох фаз не дорівнює нулю (у неушкодженій фазі струм відсутній $I_A = 0$) $I_A + I_B + I_C = I_K = 3I_0$.

Подвійні замикання на землю можливі лише в мережах з ізольованими нейтральми або з нейтральми, заземленими через дугогасильний реактор. Вони виникають на приєднаннях з ослабленою ізоляцією за перенапруг, які з'являються при однофазних замиканнях на землю. Правилами технічної експлуатації допускається працювати із заземленою фазою протягом двох годин. При цьому струм в обмотці статора буде приблизно такий само, як при двофазному КЗ [100]. Таким чином, зазначені параметри є надійним критерієм виявлення міжфазного КЗ.

Однофазні замикання на землю. Ушкодження ізоляції обмотки статора призводить до замикання фази на заземлений корпус АД. Існує декілька причин, що викликають замикання на землю. Перша пов'язана з поступовим

погіршенням ізоляції до пробоя під дією напруги. Друга - пробій у результаті комутаційних перенапруг.

Однофазні замикання на землю залежно від способу заземлення нульової точки мережі протікають по-різному й для їх виявлення доцільне використання методу симетричних складових.

Однофазні КЗ є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухозаземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Мережі із заземленою нейтраллю дозволяють, наприклад, при чотирипровідній системі, забезпечити живлення 380В для двигунів і 220В для освітлення. Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для АД і є однофазним КЗ, що характеризується протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ [100].

Векторні діаграми напруг і струмів мають наступні особливості: струми й напруги несиметричні й невірноважені, що спричиняє появу складових прямої, зворотної і нульової послідовностей; ушкоджена фаза в місці КЗ набуває потенціалу землі. На рис. 3.6 наведено векторні діаграми струмів і напруг при однофазному КЗ у мережах із глухозаземленою нейтраллю трансформатора [98].

Струм однофазних КЗ або замикань на корпус у мережах із заземленою нейтраллю можна визначити за спрощеною формулою

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{н}}}{Z_{\Sigma}}$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальна лінійна напруга мережі; Z_{Σ} – повний опір петлі фази й нульового проводу ($x_{\text{п}}$ приймається 0,6 Ом/км); $z_{\text{тр}}$ — повний опір силового трансформатора струму замикання на корпус.

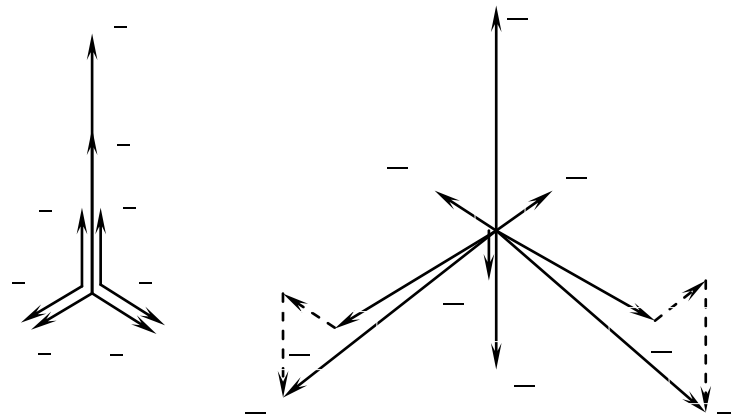


Рис. 3.6 Векторні діаграми струмів і напруг при однофазному КЗ у мережах із глухозаземленою нейтраллю трансформатора

Точне визначення струму можна зробити за методом симетричних складових. При однофазних КЗ ; . При цьому

;

—; .

При знаходженні повних струмів окремих фаз ураховується умова $R_{ПВ} = R_{ПС} = \infty$

; .

У мережах з ізолюваною нейтраллю однофазне замикання на землю безпосередньої небезпеки для АД й мережі не являють. Небезпека замикань полягає в тому, що вони можуть переходити в подвійні замикання на землю, а струми ушкодження можуть досягати значення струму двофазного КЗ [96].

Замикання на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю не викликає КЗ, оскільки ЕРС ушкодженої фази не шунтується з'єднанням, що з'явилося, із землею й для струму ушкодження відсутнє замкнуте коло від місця ушкодження до нейтралі трансформатора. У цих мережах при замиканні однієї фази на землю через місце ушкодження будуть проходити лише ємнісні струми,

обумовлені напругою мережі і ємністю її пошкоджених фаз. Виникаючий у місці ушкодження струм замикається через ємність проводів непошкоджених фаз мережі щодо землі й має невелике значення [98]. Напруга ушкодженої фази стосовно землі стане дорівнювати нулю, а напруги двох інших фаз збільшаться в $\sqrt{3}$ раз і стануть дорівнювати міжфазним напругам мережі, які лишаються незмінними [100]. Завдяки цьому однофазне замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю не порушує роботу споживачів, однак викликає перенапруги в мережі. Перенапруги, у свою чергу, викликають порушення ізоляції щодо землі двох неушкоджених фаз і перехід однофазного замикання на землю в міжфазне КЗ або подвійне замикання на землю.

На рис. 3.7 наведено векторні діаграми напруг і ємнісних струмів мереж із ізольованою нульовою точкою: а – у нормальному режимі; б – при однофазному КЗ на землю.

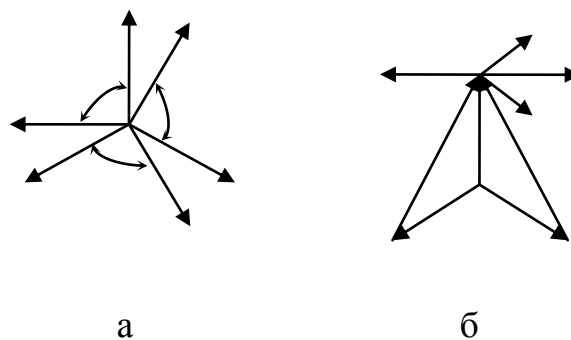


Рис. 3.7 Векторні діаграми напруг і ємнісних струмів мереж із ізольованою нульовою точкою: а – у нормальному режимі; б – при однофазному КЗ на землю

У мережах з ізольованою нейтраллю за умови симетричності опорів навантаження й лінії симетричними та однаковими будуть і фазні напруги U_A , U_B та U_C . Для ємнісних струмів фаз одержимо ; ;

Ці струми дорівнюють один одному за величиною і випереджають за фазою відповідні напруги на 90° . У нормальному режимі сума їх дорівнює

нулю (рис. 3.7,а), внаслідок чого нулю дорівнює й струм на землю. Напруга між нульовою точкою мережі й землею (напруга нейтралі)

$$U_0 = \frac{U_A}{3},$$

де U_A – ємнісні провідності окремих фаз у нормальному режимі.

Під час металічного замикання на землю в точці ушкодження аварійна фаза, наприклад A , одержує потенціал землі (рис. 3.7,б), внаслідок чого

напруга нейтралі дорівнює $-E_A$. Напруги двох неушкоджених фаз відносно землі збільшуються в $\sqrt{3}$ раз і відповідно до діаграми (рис. 3.7,б)

$$U_{B'} = \sqrt{3} U_{B0}, \quad U_{C'} = \sqrt{3} U_{C0}.$$

У $\sqrt{3}$ раз збільшуються і ємнісні струми цих фаз. Випереджаючи напруги $U_{B'}$ і $U_{C'}$ на 90° , ці струми, підсумовуючись у землі, повертаються через ушкоджену фазу, струм якої дорівнює струму замикання на землю

$$I_0,$$

де I_0 – струм нульової послідовності при замиканні на землю.

Струми $I_{B'}$ і $I_{C'}$ випереджають ЕРС E_A на 90° і визначаються ємностями фаз системи даної напруги й величиною E_A . Тому в розгалуджених мережах, що мають велику ємність, струм замикання на землю буде вищим. Для обмеження струму замикання на землю загальна довжина кабелів, приєднаних до одного або паралельно працюючих трансформаторів, не повинна перевищувати 3 км (ємність щодо землі не повинна перевищувати 10^{-6} Ф на фазу).

Струм замикання на землю можна підрахувати також за емпіричною формулою

$$I_0 = \frac{U_A}{Z_0},$$

де q – перетин кабелю, мм^2 ; U_n – номінальна лінійна напруга мережі, кВ; l – довжина ліній, км [141].

При однофазних замиканнях на землю лінійні напруги практично не змінюються, а струми ушкодження невеликі. небезпечним для АД є струм КЗ понад 5А. Тривале, понад 30 хв протікання в місці КЗ струмів 5А викликає значне місцеве перевищення температури й руйнування ізоляції, що може привести однофазне замикання на землю до виткового замикання [142].

Таким чином, визначення однофазного замикання на землю може бути здійснено за напругою нульової послідовності U_0 , струмом нульової послідовності I_0 і за напругою й струмом нульової послідовності одночасно. Використання останнього методу доцільніше, оскільки його можна застосовувати для електродвигунів, які живляться протяжним кабелем зі значним ємнісним струмом замикання на землю.

Виткові замикання обмоток статора АД є поширеним видом ушкоджень. Коротке замикання 3–5% витків однієї фази обмотки статора АД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.

Виткові замикання АД можуть бути одно-, дво- і трифазні; симетричні й несиметричні, металічні й неметалічні тощо. Основною причиною виникнення виткових замикань є зниження електричної міцності ізоляції обмоток у результаті підвищення температури, старіння, потрапляння вологи й мастила на ізоляцію тощо. У витках, що замкнули, під впливом наведених у них струмів, які значно перевищують номінальний, відбувається різке підвищення температури, що супроводжується нагріванням сталі сердечника й неушкодженої частини обмотки. Це ще більше руйнує її ізоляцію і, якщо вчасно не відключити АД, виткові замикання можуть призвести до більш важких видів аварій (наприклад, до повнофазних КЗ).

Виткові замикання є несиметричними ушкодженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг нормального режиму й супроводяться зниженням обертового моменту двигуна. Ступінь його зниження залежить

від співвідношення потужностей ушкодженого двигуна й живильної мережі, відносного числа витків, що замкнули, наявності в місці КЗ перехідних опорів.

Зниження обертального моменту двигуна тим менше, чим більше співвідношення опорів самого двигуна й мережі, тобто чим потужніша живильна мережа. Чим менший опір мережі - тим менша потужність зворотної послідовності двигуна. У граничному випадку, при нескінченно великій потужності мережі ($Z_{C2}=0$), струми двигуна будуть містити тільки складові прямої і нульової послідовності (як видно з векторних діаграм на рис. 3.8), і гальмівний момент, обумовлений струмом зворотної послідовності, буде відсутній (струми нульової послідовності крутного моменту не створюють).

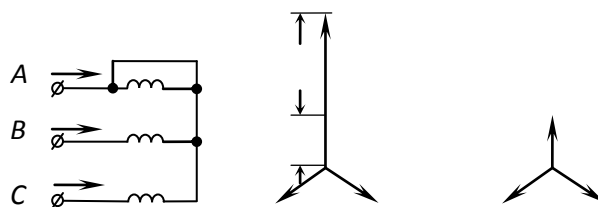


Рис. 3.8 Схема й векторні діаграми струмів при замиканні всіх витків фази А

Якщо потужності живильної мережі й споживачів сумірні, виткові замикання супроводжуються значним зниженням крутного моменту й призводять до перегрівання двигунів. Тому при виткових замиканнях двигуни підлягають негайному відключенню. Зниження крутного моменту двигунів при виткових замиканнях і спотворення лінійних струмів характеризуються коефіцієнтом асиметрії по струму .

Незважаючи на різке зростання струму прямої послідовності при замиканні витків, струм зворотної послідовності залишається без зміни. У результаті цього коефіцієнт асиметрії за струмом залежно від кількості витків, що замкнули, коливається в широких межах. При тій самій кількості

витків, що замкнули, у режимі холостого ходу коефіцієнт асиметрії по струму набагато більший ніж при нерухомому роторі (рис. 3.9) [141].

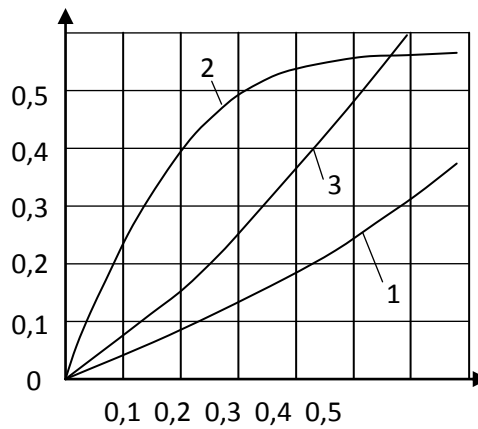


Рис. 3.9 Графіки залежності коефіцієнта асиметрії по струму від кількості витків, що замкнули : 1 - нерухомий ротор; 2 - холостий хід; 3 - узагальнена залежність

При практичних розрахунках можна користуватися узагальненою залежністю коефіцієнта від відносної кількості витків, що замкнули. Вона отримана ДонВУГІ експериментальним шляхом для великої кількості рудничних двигунів при різних способах сполучення обмотки статора, напругах живлення, ушкодженнях різних фаз і режимах роботи. Результати експериментів показують, що якщо коефіцієнт асиметрії віднести до пускового струму

$$\frac{K_a}{I_{sc}} = \frac{I_{sc}}{I_n} \cdot \frac{I_n}{I_{sc}} \cdot \frac{K_a}{I_{sc}}$$

де K_a – розрахунковий коефіцієнт асиметрії струму при виткових замиканнях, віднесений до пускового струму; I_{sc} – струм зворотної послідовності двигуна; I_n – фактичний пусковий струм двигуна; K_{sc} – кратність фактичного пускового струму даного двигуна; I_n – номінальний струм двигуна, то залежність $\frac{K_a}{I_{sc}}$ практично буде лінійною.

Пристрої захисту від виткових замикань засновані на контролі несиметрії фазних струмів:

- наявність виткових коротких замикань;
- відсутність виткових коротких замикань.

Обрив фази живильної мережі (робота трифазних двигунів у однофазному режимі). Причинами виникнення такого режиму можуть бути перегорання одного із запобіжників, обрив фазного проводу в мережі, порушення контакту у фазі, обрив фази в обмотці статора, порушення контакту у вивідній коробці тощо. Відомо, що пуск АД в такому режимі неможливий, і двигун відключається захистом від перевантаження.

Слід брати до уваги наступні фактори: схему сполучення обмоток двигуна; робочий стан двигуна в момент втрати фази (до або після ввімкнення двигуна, під час роботи під навантаженням, ступінь завантаження двигуна); число двигунів, які працюють зі втратою фази та їх взаємний вплив [95]. Якщо неповнофазний режим виник під час роботи АД, то захист може виявитися неефективним, оскільки при малому завантаженні двигуна струми в обмотках статора можуть виявитися нижчими, ніж уставка захисту від перевантаження.

У трифазному режимі кожна фаза обтікається струмом, зсунутим у часі на одну третину періоду. При однофазному режимі в обмотці статора проходить однофазний струм, що створює пульсуюче магнітне поле. Поле змінюється у часі, але не переміщується по колу статора. Його можна розкласти на два поля однакових за величиною й протилежних за напрямком обертання. Моменти M_1 і M_2 , обумовлені цими полями, при нерухомому роторі також дорівнюють один одному й протилежні, внаслідок чого результуючий пусковий момент двигуна буде дорівнювати нулю (рис. 3.10,а).

Якщо втрата фази відбулася до включення двигуна в мережу, то він не може запуститися навіть за відсутності навантаження на валу. Напрямок обертання однофазного двигуна визначається напрямком попереднього поштовху, й пуск його відбувається в тому випадку, якщо під дією цього поштовху двигун здобуває таку швидкість, при якій результуючий момент достатній для подолання статичного моменту [94].

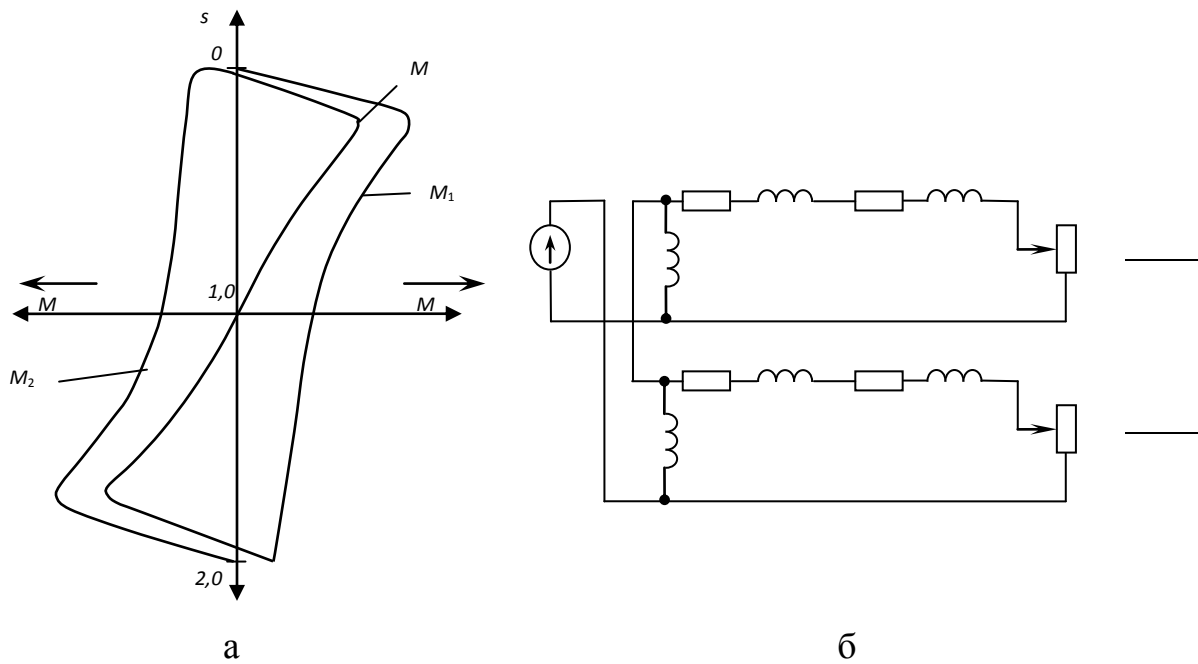


Рис. 3.10 Графіки моментів (а) і схема заміщення (б) трифазного АД в однофазному режимі

При переході двигуна із трифазного режиму роботи в однофазний на ходу утворюється обертальний момент. Якщо швидкість двигуна близька до номінальної, обертальний момент достатній для продовження роботи з невеликим зниженням швидкості. На відміну від трифазного симетричного режиму з'являється характерне гудіння. В іншому зовнішні прояви аварійного режиму не спостерігаються [95].

Схему заміщення трифазного АД при обриві фази наведено на рис.3.10, б. Верхня частина схеми відповідає прямій МРС (режиму трифазного двигуна), а нижня – зворотній (режиму електромагнітного гальма). У режимі спокою ($s=1$) напруга, підведена до двигуна, ділиться порівну між обома половинами схеми й дорівнює $U/2$. При зменшенні ковзання відбувається збільшення опору Z_1 і зниження Z_2 , внаслідок чого відбувається перерозподілення напруг: підвищення на затискачах кола, що відповідає прямій МРС, і зниження на затискачах кола, що відповідає зворотній МРС. Гранично перша з цих напруг прагне до повної напруги мережі, а друга – до нуля, аналогічно тому, що M_1 прагне до M_n , а M_2 – до нуля.

При сполученні обмоток статора в зірку й обриві лінійного проводу A дві послідовно з'єднані обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу (рис. 3.11, а). При загальмованому роторі напруга на фазах B й C дорівнює половині лінійної напруги U_{BC} , а напруга на фазі A дорівнює нулю. При швидкості обертання близькій до синхронної на обмотках відновлюється симетрична система трифазної напруги, а напруга нейтралі зірки дорівнює нулю.

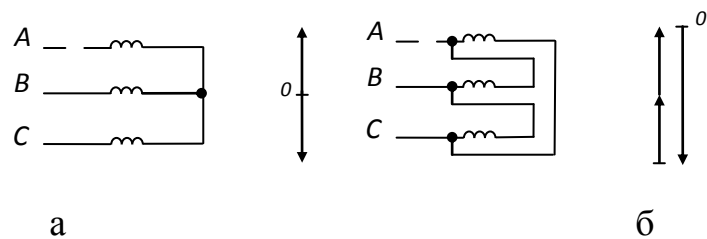


Рис. 3.11 Схеми й векторні діаграми струмів АД, з'єднаного відповідно в Y (а) і Δ (б) при обриві лінійного проводу

Для струмів I_A , I_B й I_C одержимо $I_A = 0$; $I_B = I_C = I_{\phi}$, де I_{ϕ} – струм статора двигуна в однофазному режимі.

Якщо втрата фази відбулася до вмикання двигуна, то пусковий струм становить 86% від пускового при трифазному живленні, тобто в понад 5 разів перевищує номінальний. За короткий час такий струм перегріє обмотки. У випадку втрати фази після включення двигуна в роботу величина струму збільшується на 75%, тобто майже у два рази [95].

При сполученні в трикутник й обриві лінійного проводу у фазі A , обмотка фази C виявляється ввімкненою на лінійну напругу U_{BC} , а обмотки фаз A і B увімкнені послідовно на ту само лінійну напругу (рис. 3.11, б). Напруги на виводах AB й CA будуть залежати від швидкості обертання ротора. При загальмованому роторі напруги на виводах AB й CA дорівнюють половині лінійної. При синхронній швидкості відновлюється симетрична система напруг, і напруги на виводах AB й CA дорівнюють лінійній напрузі [95].

Для лінійних струмів справедливі співвідношення ;
 , а для фазних струмів – ; – ; – ; .

У пусковому режимі при втраті фази пусковий струм в одній з фаз дорівнює пусковому струму при трифазному живленні, а лінійний струм зростає менш інтенсивно. У випадку втрати фази при роботі двигуна струм у найбільш завантаженій фазі зростає вдвічі, а лінійний – в 1,73 раза.

На рис. 3.12 наведено графіки залежності струмів статора й ротора АД в нормальному режимі (,) і при обриві лінійного проводу (,) від навантаження при кратності максимального моменту . Значення струмів і потужності дані в частках від своїх номінальних величин. Відповідно до графіка струми статора й ротора при номінальному навантаженні двигуна й обриві лінійного проводу збільшуються до 200% від їх первинних значень. При менших кратностях максимального моменту струми зростають ще більше. Як видно з рис. 3.12, перевантаження по струму при обриві лінійного проводу настає вже при , тому двигун у цьому режимі може працювати, не виходячи за межі припустимого нагрівання, лише при зниженні потужності на валу до 50-60% номінальної [93].

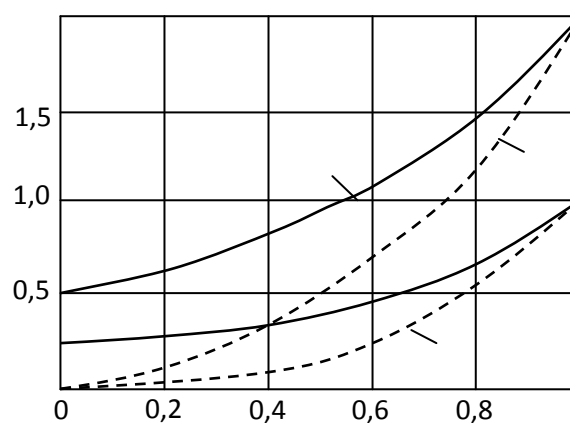


Рис. 3.12 Графіки залежності струмів статора й ротора АД від навантаження в нормальному режимі й при обриві лінійного проводу

Наслідки однофазного режиму залежно від ГЕН різні. Так, у двигунів установок з циклічним режимом роботи наслідки однофазного режиму менш небезпечні, ніж у двигунів установок із тривалим режимом роботи. При обриві лінійного проводу двигуни з циклічним режимом роботи можуть якийсь час працювати, не виходячи за межі припустимого нагрівання, після чого через характер навантаження вони будуть відімкнені. При повторному ввімкненні пуску не відбудеться. При тривалому режимі роботи двигунів ймовірність їх ушкодження через тривалу роботу під навантаженням значно більша. Отже, визначення даного аварійного режиму можливе за контролем струму.

Визначення заклинювання ротора здійснюється за допомогою контролю струмів фаз. Критерієм настання аварії є перевищення струмом максимально припустимого в статичному режимі значення протягом певного часу. Відмінність від режиму пуску, що не відбувся, полягає в протіканні по фазах двигуна припустимих струмів до моменту виникнення аварії.

Аварійні режими при пуску. Тривалий пуск визначається, якщо фазні струми перевищують задані значення, протягом часу відповідної нормальної тривалості пуску. Якщо пуск затягується на невизначений час, то це призводить до вигорання обмотки статора через тривале протікання пускового струму. Пуск, що не відбувся, визначається, якщо фазні струми перевищують задані значення, протягом часу відповідної критичної тривалості пуску.

Припустиме число пусків. Для двигунів, що працюють у повторно-короткочасних режимах, актуальним є контроль припустимого числа пусків у певному інтервалі часу. Припустима кількість вмикань визначається кількістю тепла, що віддається двигуном навколишньому середовищу і виділяється ним за цикл роботи. Точний розрахунок утруднений, оскільки обидва фактори є функцією багатьох параметрів. Доцільно визначати припустиме число запусків АД, контролюючи температуру двигуна. Допускається один пуск із нагрітого стану після роботи при номінальному навантаженні, тобто при номінальній температурі обмотки.

Ознаки аварійних режимів АД наведено в табл. 3.2

Таблиця 3.2

Ознаки аварійних режимів АД

Аварійний режим (пошкодження)	Ознаки аварійних режимів (зміна струмів і напруг)	Вплив на електропривод і мережу (характер змін у роботі двигуна й мережі)
Трифазні симетричні КЗ	Струми фаз різко зростають (струм КЗ може перевищувати пусковий струм двигуна), фазні й лінійні напруги зменшуються. Між струмами й відповідними напругами встановлюється зсув відмінний від зсуву в нормальному режимі. Вектори струмів і напруг є симетричними й урівноваженими, у них відсутні складові зворотних і нульових послідовностей.	При зниженні напруги різко зменшується обертальний момент двигуна ($M \equiv U^2$), фазні обмотки статора перегріваються й згорають. Ударні струми являють велику небезпеку – викликають значні зусилля між струмопровідними частинами устаткування, руйнуючи його й викликаючи нагрівання, що у багато разів перевищує термічну стійкість ізоляції.
Двофазні (міжфазні) КЗ в одній точці	Струми значно перевищують номінальний струм двигуна. Якщо КЗ відбувається при навантаженні, то в неушкодженій фазі протікає лише струм навантаження, а в ушкоджених фазах струм навантаження накладається на струми КЗ, збільшуючи повний струм однієї фази й зменшуючи іншої. Фазні напруги в місці КЗ вищі нуля, одна міжфазна напруга знижується до нуля, а значення двох інших в 1,5 рази більше фазної. Вектори струмів і напруг утворюють несиметричну, але врівноважену систему, мають складові прямої і зворотної послідовностей, але не мають складових нульової.	Результуючий момент двигуна визначається різницею моментів, обумовлених полями прямої і зворотної послідовностей. При ковзанні $s=1$ результуючий момент дорівнює нулю. У міру росту швидкості момент двигуна залишається незначним, двигун може зупинитися і перегрітися. Найбільш важкий режим роботи двигуна настає при металічному КЗ, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють $0,5 U_n$. Для мереж без компенсації різниця фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55^\circ - 60^\circ$.
Двофазні КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз	Струми при такому ушкодженні визначаються за методом симетричних складових. Різниця кутів між струмами фаз перевищує 60° .	Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.

Продовження табл. 3.2

Дво-фазні КЗ на землю	в мережі з ізольованою нейтраллю	Значення струмів ушкоджених фаз, міжфазних напруг залишаються такими само, як і при звичайному двофазному замиканні. Струм нульової послідовності відсутній. Ушкоджені фази в місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує відносно землі зсув 0,5 ЕРС, а напруга неушкодженої фази зростає до 1,5 ЕРС.	Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.
	в мережі з глухозаземленою нейтраллю	Сильне зниження міжфазних і фазних напруг ушкоджених фаз (у місці КЗ до нуля) і поява складових нульової послідовності не лише у фазних напругах, але й струмах. Напруга між ушкодженими фазами дорівнює нулю. Напруга неушкодженої фази залишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими фазами й неушкодженою знижуються до фазної напруги. Вектори струмів і напруг несиметричні й невірноважені, з'являються складові прямої послідовності, зворотної і нульової.	Через різке зниження напруги в місці КЗ (режим має найменше значення напруги прямої послідовності), цей вид ушкоджень після трифазного КЗ є най важчим з точки зору збереження стійкості енергосистеми й споживачів.
Одно-фазні КЗ на землю	в мережі з глухозаземленою нейтраллю	Характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ. Ушкоджена фаза в місці КЗ вимушено набуває потенціалу землі. Струми й напруги несиметричні і невірноважені, внаслідок чого з'являються складові прямих, зворотних і нульових послідовностей.	Однофазні КЗ є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухо заземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для двигуна й характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ.

Продовження табл. 3.2

	в мережі з ізолюваною нейтраллю	Не викликають КЗ, оскільки ЕРС ушкодженої фази не шунтується з'єднанням, що з'явилося з землею і для струму пошкодження відсутнє замкнуте коло від місця пошкодження до нейтралі трансформатора. Струм замикається через ємність проводів непошкоджених фаз мережі щодо землі й має невелике значення. Напруга пошкодженої фази стосовно землі дорівнюватиме нулю, а напруги двох інших фаз збільшаться в $\sqrt{3}$ раз і дорівнюватимуть міжфазним напругам мережі, які залишаються незмінними.	Однофазне замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю не порушує роботу споживачів, однак викликає перенапругу в мережі. Перенапруги, у свою чергу, викликають порушення ізоляції обмоток відносно землі двох неушкоджених фаз двигуна й переходу однофазного замикання на землю в міжфазне КЗ або подвійне замикання на землю.
Однофазні виткові замикання		Є несиметричними ушкодженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг. Різко зростає струм прямої послідовності, струм зворотної послідовності лишається практично без зміни. Коротке замикання всього 3-5% витків однієї фази обмотки статора АД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.	Знижується момент обертання двигуна, і він перегрівается. Ступінь зниження моменту залежить від співвідношення потужностей ушкодженого двигуна й живильної мережі, відносного числа витків, що замкнулися тощо. При виткових замиканнях двигун слід негайно вимкнути.
Обрив фази живильної мережі	Сполучення обмоток статора в зірку	Дві сполучені послідовно обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу. При загальмованому роторі напруга на неушкоджених фазах дорівнює половині лінійної напруги, а напруга на ушкодженій фазі – нулю. Якщо втрата фази відбулася до вмикання двигуна, то пусковий струм становить 86% від пускового при трифазному живленні, тобто в понад 5 раз перевищує номінальний. За короткий час такий струм перегріє обмотки. У випадку втрати фази після вмикання двигуна в роботу величина струму збільшується на 75%.	В однофазному режимі в обмотці статора проходить однофазний струм, що створює пульсуюче магнітне поле. Поле змінюється в часі, але не переміщується по колу статора. Якщо втрата фази відбулася до включення двигуна в мережу, то він не може запуститися навіть за відсутності навантаження на валу. При переході двигуна із трифазного режиму роботи в однофазний на ходу утвориться обертаючий момент. Якщо швидкість двигуна близька до номінальної, обертаючий момент достатній для продовження роботи з невеликим зниженням

Продовження табл. 3.2

Сполучення обмоток статора в трикутник	Обмотка однієї фази виявляється ввімкненою на лінійну напругу, а обмотки двох інших фаз - послідовно на ту саму напругу. Напруги між ушкодженою фазою й неушкодженими залежать від швидкості обертання ротора. При загальмованому роторі ці напруги дорівнюють половині лінійної, при синхронній швидкості вони дорівнюють лінійній напрузі. У пусковому режимі при втраті фази пусковий струм в одній з фаз дорівнює пусковому струму при трифазному живленні, а лінійний струм зростає менш інтенсивно. У випадку втрати фази після введення двигуна в роботу струм у найбільш навантаженій фазі збільшиться вдвічі, а лінійний – в 1,73 рази.	швидкості. При швидкості обертання близької до синхронного на обмотках відновлюється симетрична система трифазної напруги. На відміну від трифазного симетричного режиму з'являється характерне гудіння. В іншому зовнішні прояви аварійного режиму не спостерігаються. Перевантаження по струму при обриві лінійного проводу настає при , тому двигун у цьому режимі може працювати, не виходячи за межі допустимого нагрівання, тільки при зниженні потужності на валу до 50-60% номінальної.
--	---	--

3.3 Визначення технічного стану електромеханічних систем з асинхронними двигунами

Найпоширенішими аваріями в ЕМС з асинхронними двигунами є струмові [141,142]. Ознаки, за якими можна визначити аварійні режими та їх вплив на АД, наведено в табл.3.2.

Причиною більшості механічних аварій є радіальна вібрація через асиметрію напруги живлення, механічні перевантаження на валу АД, виробничий брак комплектуючих елементів або неакуратне складання.

Більшість аварій має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирання двигуна, однак постійний контроль мережевої напруги та струму ЕМС за допомогою засобів діагностування дозволяє у більшості випадків звести цю ймовірність до мінімуму.

Останнім часом отримали розвиток методи діагностування стану ЕМС, засновані на моніторингу споживаного струму з виконанням спеціального

спектрального аналізу отриманого сигналу [126-131,144], що дозволяє з високою достовірністю визначати технічний стан елементів ЕМС. Принцип методу полягає в тому, що будь-які збурення в роботі механічної та електричної частин АД і пов'язаного з ним механізму призводять до змін магнітного потоку в зазорі електричної машини, а отже – до слабкої модуляції споживаного струму. Поява у спектрі струму АД характерних частот свідчить про наявність пошкоджень електричної або механічної частин ЕМС [126,144].

Моніторинг струму ЕМС, на відміну від вібродіагностики, може бути виконаний безпосередньо на клемній коробці АД або в електрощиті живлення без будь-якого порушення режиму роботи [144].

Спектри струмів нового та спрацьованого АЕП наведено на рис. 3.13.

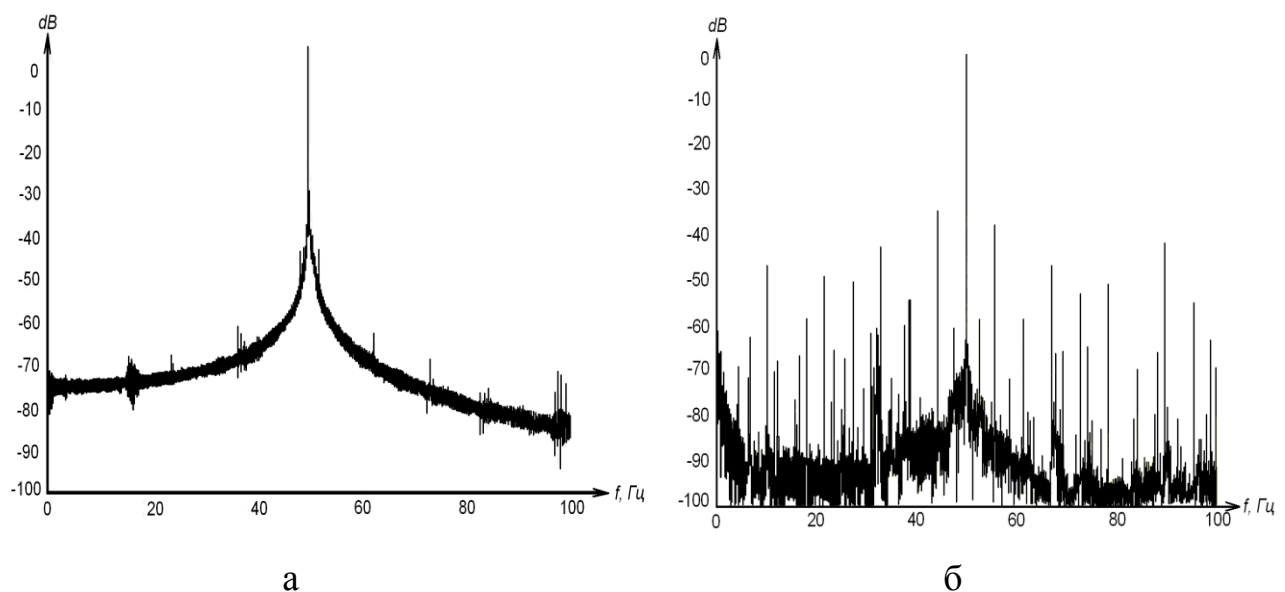


Рис. 3.13 Спектральна характеристика струму АЕП: а - нового;
б - спрацьованого

Оскільки форма напруги живлення АД на виробничих підприємствах відрізняється від синусоїдальної, в отриманих спектрах струму й напруги присутні їх гармоніки, але несправності двигуна і пов'язаного з ним механізму викликають відповідні гармоніки лише в спектрі струму.

Види пошкоджень ЕМС з АД та характерні частоти, за якими вони визначаються, наведено в табл. 4.3, а спектральні характеристики струму, отримані методом комп'ютерного моделювання, – на рис. 3.14.

Таблиця 3.3

Види пошкоджень ЕМС з АД і характерні частоти, на яких вони визначаються

Вид пошкодження	Характерні ознаки
Пошкодження ротора АД (обривання стрижнів, ослаблення їх кріплення до контактних кілець, приховані дефекти лиття)	Виявляються за наявністю двох симетричних відносно частоти живильної мережі піків у спектрі струму. Характерна частота пошкодження дорівнює sp
Неспівосність валів двигуна та механічного навантаження, пошкодження підшипників	Визначаються за частотами кратними частоті обертання ротора
Міжвиткові замикання в обмотках статора	Визначаються за частотою живильної мережі
Ослаблення кріплення до фундаменту, зачіплення ротора за статор двигуна	Визначаються на частоті кратній $\frac{1}{2}$ частоті обертання ротора
Дефекти ремінної передачі	Визначаються на частотах кратних частоті биття ремня, яка залежить від його довжини і діаметрів шківів
Ексцентриситет ротора	Численні бічні смуги на частоті непарних гармонік живильної мережі
Пошкодження турбомеханізмів з АД (насоси, вентилятори, компресори)	Визначаються на лопатевій частоті

Порівняння гармонік напруги й струму дає можливість розрізнити гармонічні складові струму характерні для непрацюючого устаткування. В результаті створення та регулярного поповнення бази даних вимірювань та їх аналізу в процесі експлуатації ЕМС можна простежити динаміку фактичного розвитку окремих пошкоджень АД та механізму і прогнозувати подальший розвиток несправностей [144].

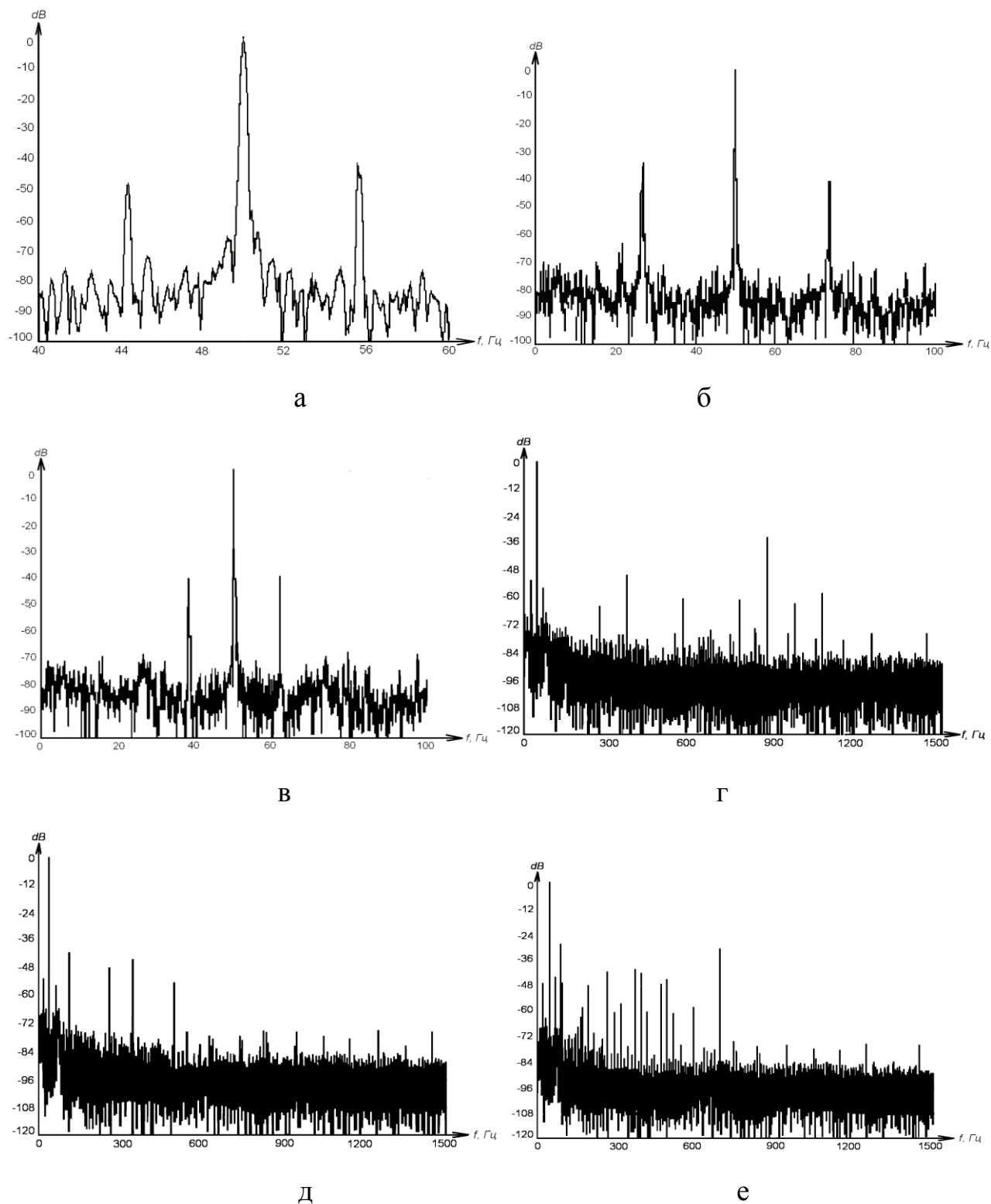


Рис. 3.14 Спектральні характеристики струму ЕМС з АД: а - дефект ротора;
 б - неспівосність валів; в - ослаблене кріплення до фундаменту;
 г - міжвиткові замикання; д - несправність підшипників;
 е - динамічний ексцентриситет

Різниця в амплітуді між основною частотою і характерною для конкретної несправності є показником критичності дефекту. Дослідження показали, що різниця понад 54 дБ вказує на справний стан ротора, менш ніж 45 дБ – на погіршення його стану (наявні високоомні сполучення, тріщини або обрив стрижнів) [121,126].

На сьогодні не існує загального критерію визначення технічного стану ЕМС з АД придатного для кількісної оцінки. Авторами пропонується визначати технічний стан ЕМС з АД за допомогою показника відносної зношеності ізоляції та аналізу складових втрат, за якими діагностується ушкодження у відповідному вузлі.

Зношеність ізоляції для роботи ЕМС з ГЕН із постійним навантаженням

$$- ,$$

де t - строк придатності ізоляції; c і b – сталі коефіцієнти для даного виду ізоляції.

Відносна зношеність ізоляції

$$- .$$

Середнє значення відносної зношеності ізоляції АД за період часу T

$$- .$$

Якщо ЕМС з АД працює зі зниженим навантаженням, то відносна зношеність ізоляції, як правило, нижча від номінального значення. Коли робоча температура вища припустимої, відносна зношеність перевищує одиницю. Таким чином, головна умова справного технічного стану - відносна зношеність ізоляції за певний період часу (цикл роботи, зміну тощо) не повинна перевищувати одиницю.

Виконано моделювання роботи АД потужністю 40кВт відповідно до типового ГЕН насосної установки в умовах неякісної напруги живлення і зміни навантаження. На рис. 3.15 наведено змодельовані параметри АД ЕМС в умовах поступового збільшення завантаження в 1,5 рази, а потім його зменшення до початкового значення.

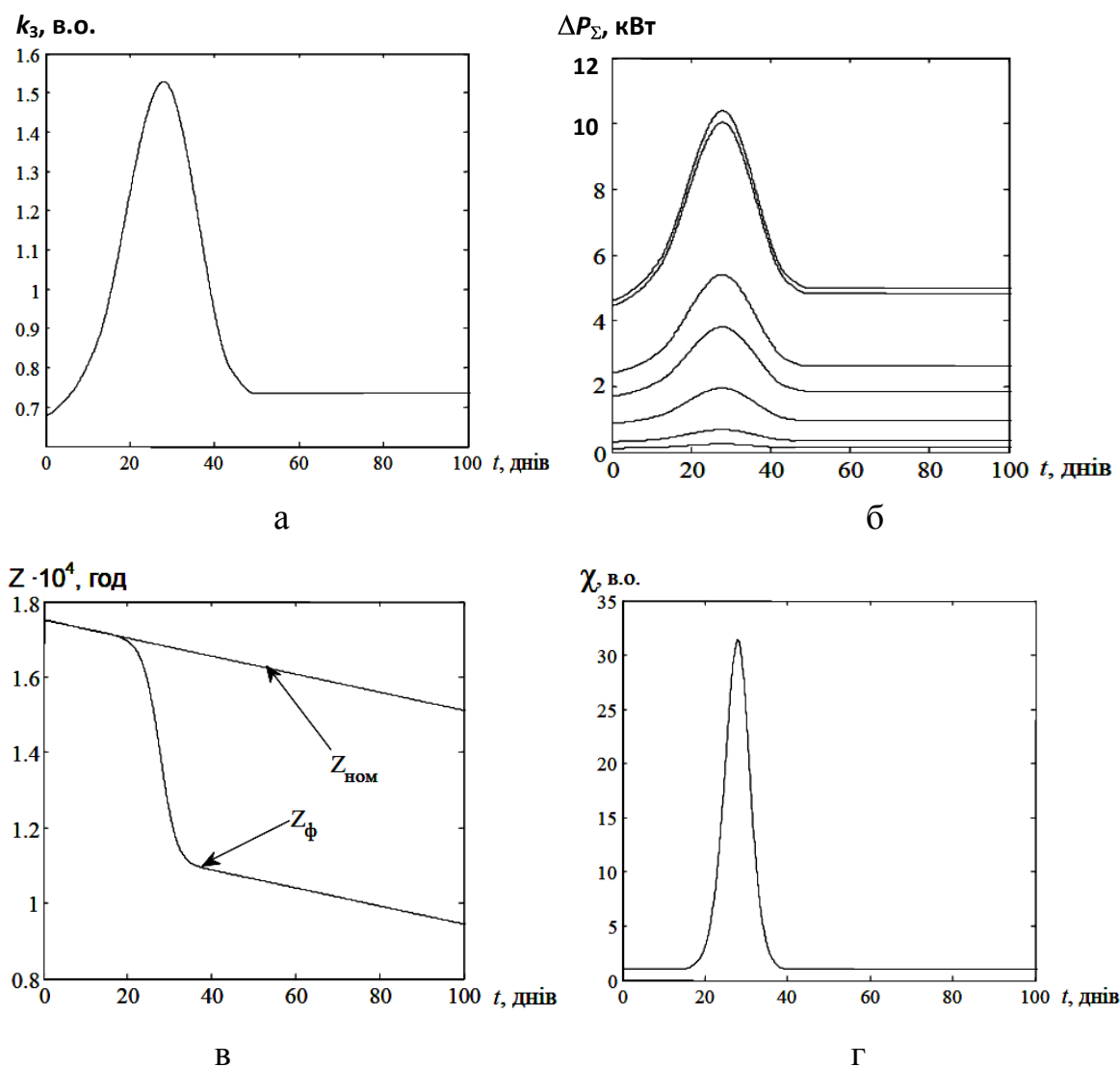


Рис. 3.15 Результати моделювання характеристик АД насосної установки в умовах збільшення навантаження: а – коефіцієнт завантаження; б - повні втрати за годинами добового ГЕН; в - залишковий ресурс; г - відносне зношування

Як видно з рис. 3.15, під час роботи в такому режимі зношеність суттєво зростає. В момент досягнення навантаженням максимуму відносна зношеність

сягає значення понад 30 відн.од., а залишковий ресурс зменшується з 730 днів до 24.

На рис. 3.16 наведено змодельовані параметри АД ЕМС в умовах неякісної напруги живлення, що виражається у відхиленні напруги від номінальної.

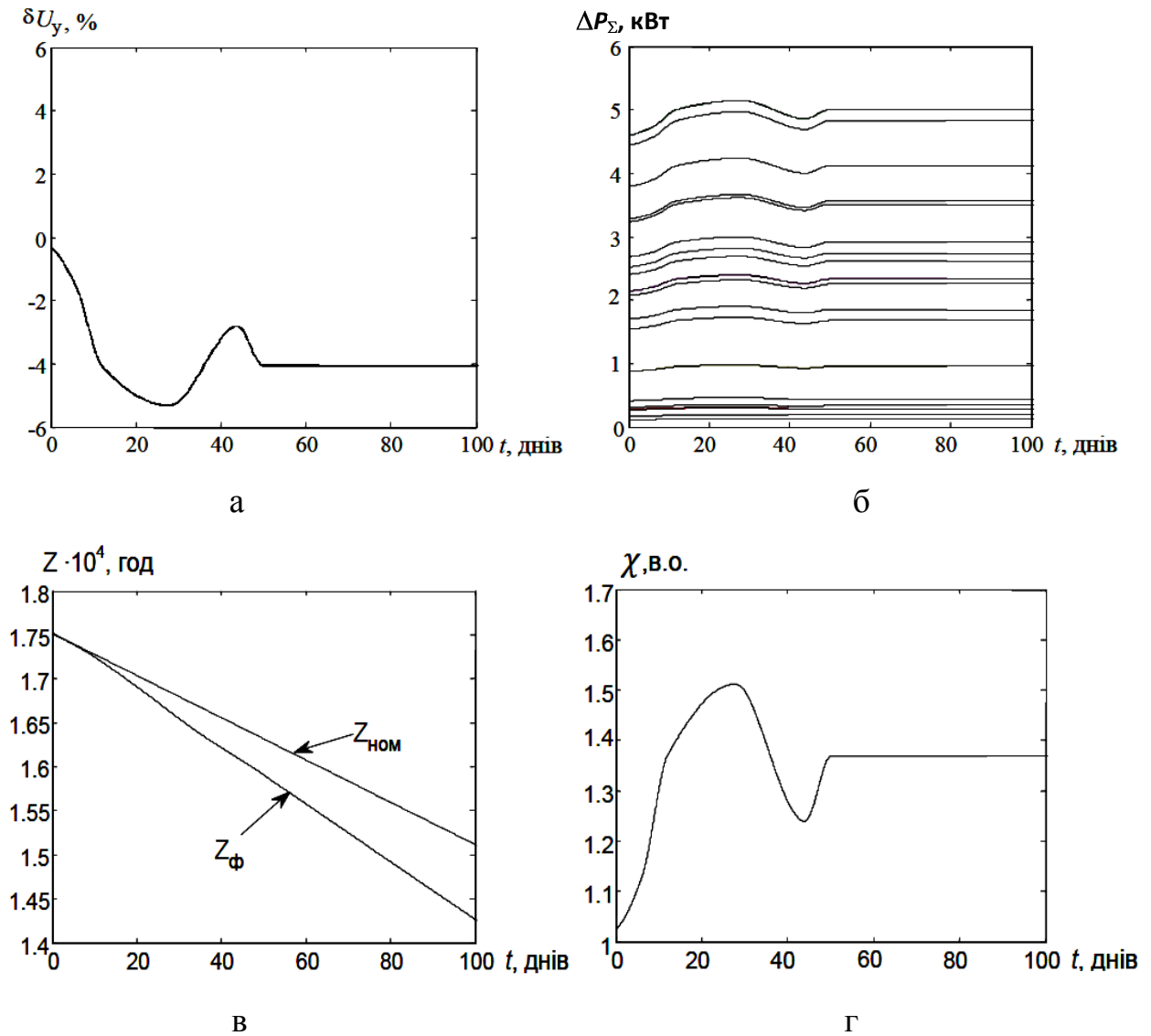


Рис. 3.16 Результати моделювання характеристик АД насосної установки в умовах відхилення напруги живлення від номінальної: а - усталене відхилення напруги; б - повні втрати за годинами добового ГЕН; в - залишковий ресурс; г - відносне зношування

З рис. 3.16 видно, що робота в режимі відхилення напруги призводить до зростання зношеності ізоляції АД у 1,5 рази. Таким чином, залишковий ресурс у момент найбільшого значення відхилення напруги зменшується з 730 днів до 485.

На рис. 3.17 наведено змодельовані параметри АД насосної установки в умовах живлення неякісною напругою, що виражається у її несиметрії.

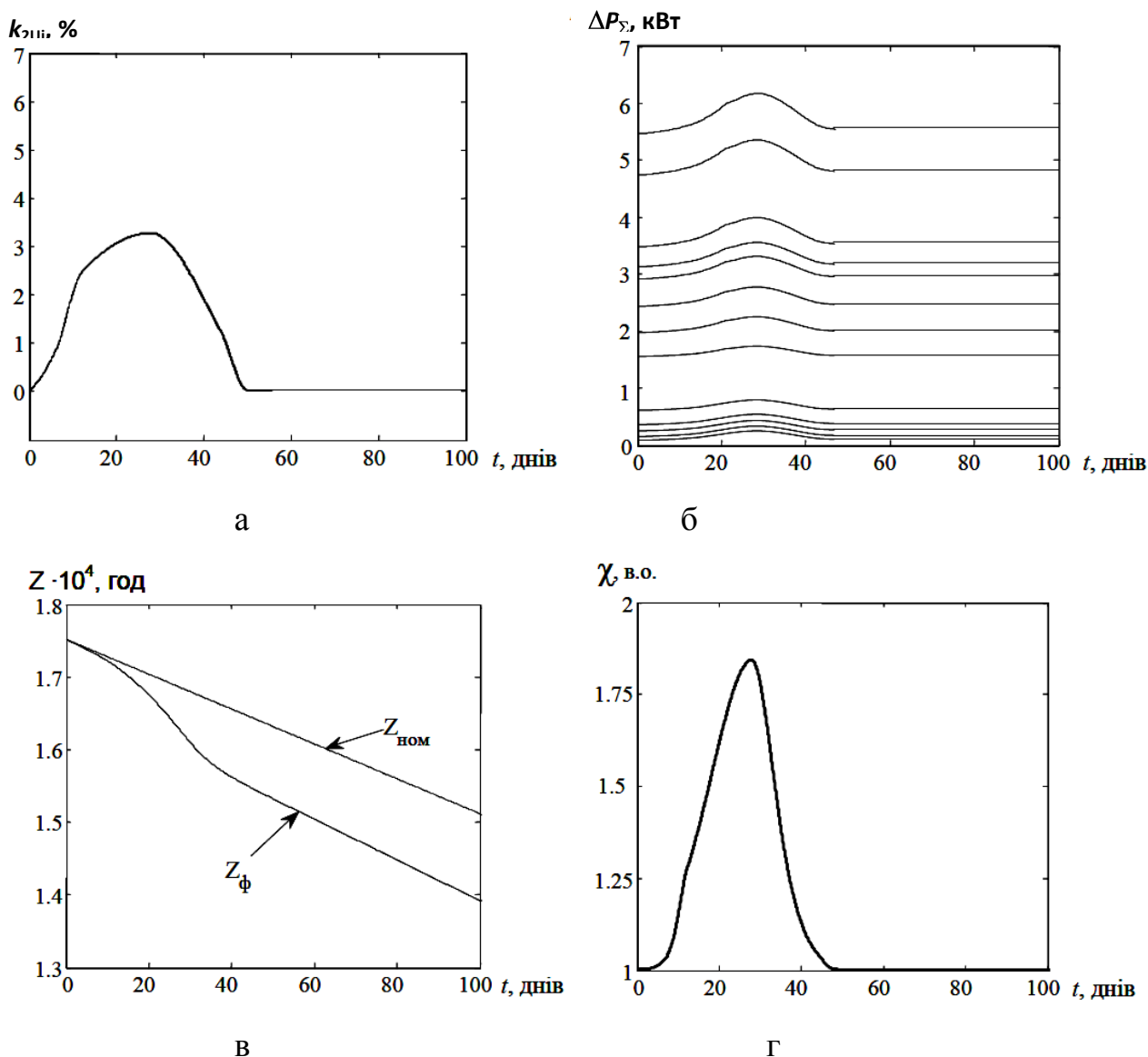


Рис. 3.17 Результати моделювання характеристик АД насосної установки в умовах несиметрії напруги живлення: а - коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності; б - повні втрати за годинами добового ГЕН; в - залишковий ресурс; г - відносне зношування

Як видно з рис. 3.17, робота в такому режимі збільшує відносне зношення у 1,8 раза, а залишковий ресурс у момент найбільшої несиметрії зменшується з 730 днів до 405.

Таким чином, математичне моделювання роботи АД насосної установки в умовах неякісної напруги живлення і зміни навантаження підтвердило, що відносне зношення може розглядатись як діагностична ознака, а його значення понад одиницю свідчить про перехід двигуна до неномінального, передаварійного режиму.

Як другий критерій технічного стану АД пропонується застосовувати величину втрат у його вузлах. Аналіз цих значень здійснюється шляхом порівняння поточних значень складових втрат з їх еталонними значеннями. Якщо, двигун ЕМС знаходиться у незадовільному технічному стані. Таким чином, за складовими втрат діагностується несправність у відповідному вузлі ЕМС з АД.

Результати моделювання АД 40 кВт для роботи його відповідно до типового ГЕН насосної установки, в припущенні несправності в обмотці статора, вираженої в суттєвому зниженні її опору внаслідок міжвиткових замикань, наведено на рис. 3.18.

Як видно з рис. 3.18, суттєво більшими порівняно з еталонними є значення змінних втрат. А саме, зросли на 50% втрати в обмотці статора внаслідок збільшення струму, що споживається. Це свідчить про несправність в обмотці статора. Змінні втрати в роторі лишились практично сталими. Постійні втрати зменшились на 1% внаслідок спадання напруги в обмотці ротора через збільшення струму АД, що споживається. Механічні втрати збільшились на 3% через виникнення гальмівних моментів під час роботи несправного двигуна. Загальні втрати зросли на 18%. Крім того, ККД знизився на 2%. Таким чином, за методом складових втрат можна зробити висновок про пошкодження в обмотці статора.

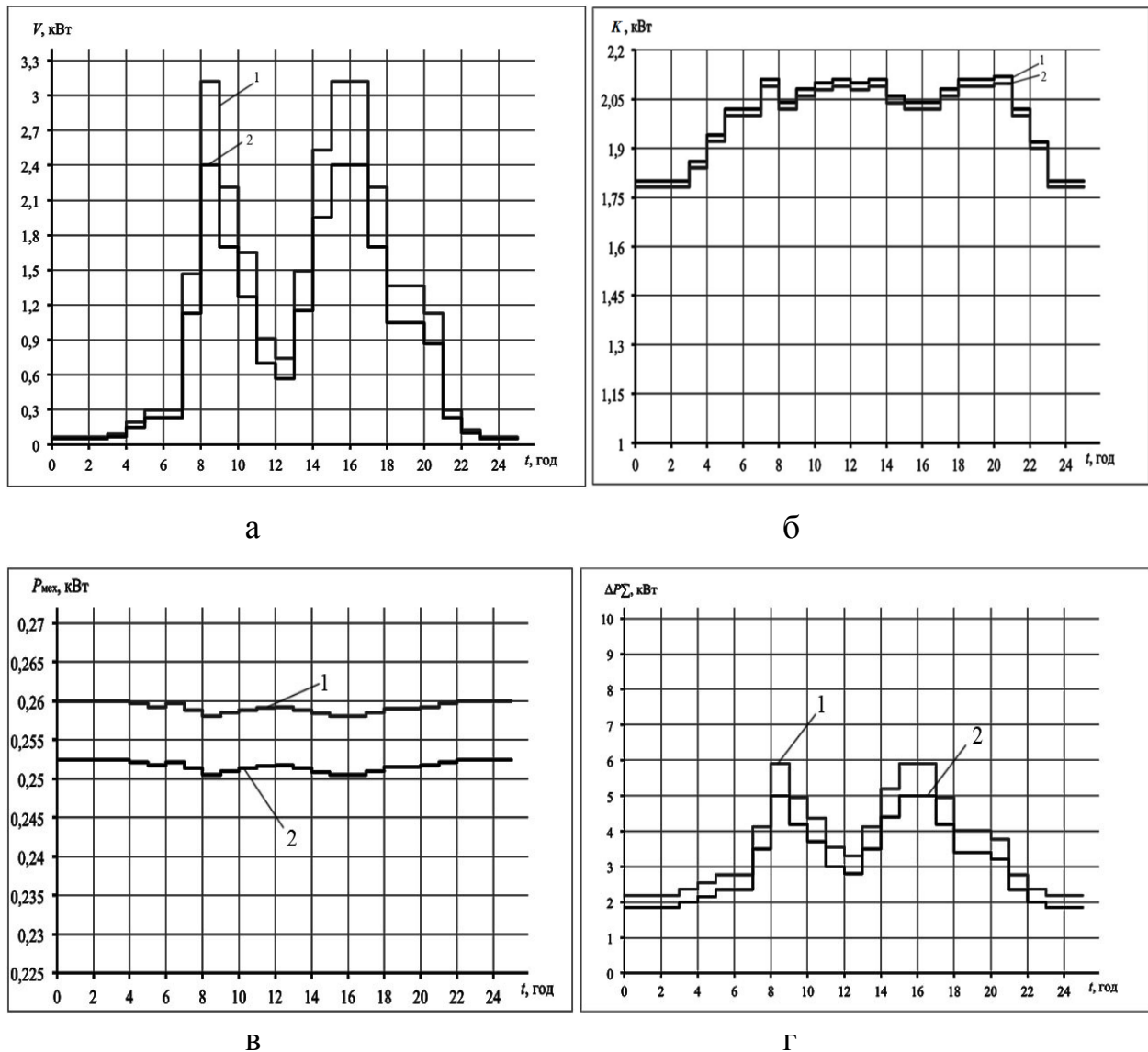


Рис. 3.18 Результати моделювання складових втрат АД насосної установки з несправностями обмотки статора (1 – несправний двигун, 2 - справний):

а - змінні втрати; б - постійні втрати; в - механічні втрати; г - повні втрати

3.4 Теплова модель асинхронних двигунів з урахуванням впливу якості напруги живлення

Строк служби АД значною мірою визначається якістю ізоляції його обмоток [40]. Головним чинником, який впливає на термін служби ізоляції, є її робоча температура.

Одним з методів дослідження теплових процесів АД є метод еквівалентних теплових схем заміщення [134]. Теплові процеси в двигуні описуються системою диференціальних рівнянь

$$\dot{\mathbf{T}} = -\mathbf{K}(\mathbf{T} - \mathbf{T}_\infty) + \mathbf{Q} \quad (3.1)$$

де $\mathbf{C}$ – вектор-стовпець теплоємностей вузлів двигунів, $\mathbf{T}$ – вектор-стовпець перевищення температури відповідних вузлів над температурою довкілля, $\mathbf{K}$ – матриця теплопровідностей вузлів, $\mathbf{Q}$ – вектор втрат потужності у вузлах АД.

Спрощено рівняння (3.1)

$$\dot{\mathbf{T}} = -\mathbf{K}(\mathbf{T} - \mathbf{T}_\infty) + \mathbf{Q} \quad (3.2)$$

де $\mathbf{T}_m$ – перевищення температури міді й сталі над температурою довкілля; $\mathbf{Q}_m$ – втрати потужності в міді; C_m – теплоємність міді й сталі; $K_{m\infty}$ – тепловіддача міді й сталі в довкілля; K_{mm} – теплопередача між міддю і сталлю [135].

Для розрахунків за наведеною системою рівнянь необхідно визначити початкові параметри моделі – теплоємність і коефіцієнти тепловіддачі, що не завжди можливо. Для цього потрібні такі параметри міді як середня довжина витків, їх кількість, діаметр дроту, а також геометричні розміри сталі.

Найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення моделі двигуна диференціальним рівнянням теплового стану

$$\dot{\mathbf{T}} = -\mathbf{K}(\mathbf{T} - \mathbf{T}_\infty) + \mathbf{Q} \quad (3.3)$$

де $\Delta T_{\text{ад}}$ - перевищення температури АД над температурою довкілля у разі синусоїдальної напруги живлення; $Q_{\text{втр}} = \alpha F (T_{\text{ад}} - T_{\text{довк}})$ – «гріючі» втрати потужності в двигуні, C – теплоємність та тепловіддача відповідно.

У моделі (3.3) прийнято стандартні припущення: двигун розглядається як однорідне тіло з нескінченно великою теплопровідністю і однаковою температурою в усіх своїх точках; тепловіддача в зовнішнє середовище пропорційна різниці температур двигуна й довкілля; навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто у процесі нагрівання двигуна температура середовища не змінюється; теплоємність і тепловіддача двигуна не залежать від його температури.

Криві нагрівання за моделями (3.2) і (3.3) зображено на рис. 3.19.

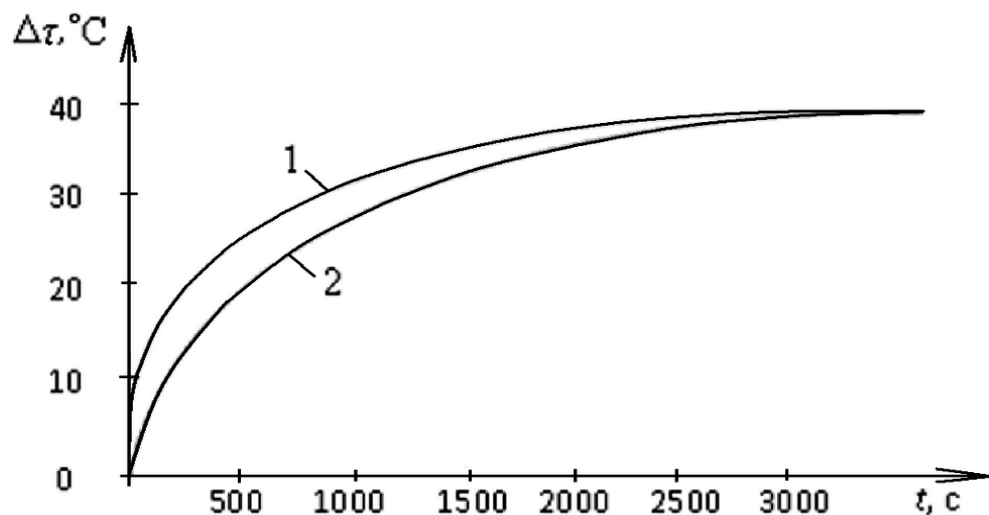


Рис. 3.19 Криві нагрівання АД за моделями: 1 - (3.2); 2 - (3.3)

Існує кілька підходів до визначення усталеного перевищення температури обмотки статора [120,136]. Їх недоліком є неврахування параметрів конкретного АД, використання специфічних величин (діаметри розточування і зовнішній діаметр сердечника статора), коефіцієнта номінальних втрат в двигуні, тоді як він не завжди працює в номінальному режимі. Найдоцільнішим для функціонального діагностування енергоефективності АД є підхід, у якому

розрахунок поточної температури здійснюється за фактичними втратами в двигуні.

У придатній для реалізації в цифровому пристрої різницевій формі рівняння (3.3) має вигляд [135]

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta_k \quad (3.4)$$

де θ_k - перевищення температури в k -й момент часу; θ_{k-1} - перевищення температури в $(k-1)$ -й – момент часу; $\Delta\theta_k$ - крок розрахунку.

Розрахунок тепловіддачі здійснюється для усталеного номінального режиму роботи двигуна, де $\theta_{\text{уст}}$ - усталене значення перевищення температури двигуна в номінальному режимі роботи [135].

Згідно [10], сталі нагрівання обмоток статора і ротора відповідно

$$\theta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{ст}}}{\alpha_{\text{ст}}}, \quad \theta_{\text{рот}} = \frac{P_{\text{рот}}}{\alpha_{\text{рот}}},$$

де J - густина струму в обмотці статора за номінального навантаження.

У формулі (4.4) $\theta_{\text{уст}}$. Таким чином, ураховуються всі втрати, у т. ч. від несиметрії та несинусоїдальності напруги.

Рівняння (3.4) можна переписати, як

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \frac{P_{\text{ст}}}{\alpha_{\text{ст}}} - \frac{P_{\text{рот}}}{\alpha_{\text{рот}}} \quad (3.5)$$

На рис. 3.20 наведено результати моделювання кривих нагрівання і охолодження за рівнянням (3.5), а також експериментальна крива з [136].

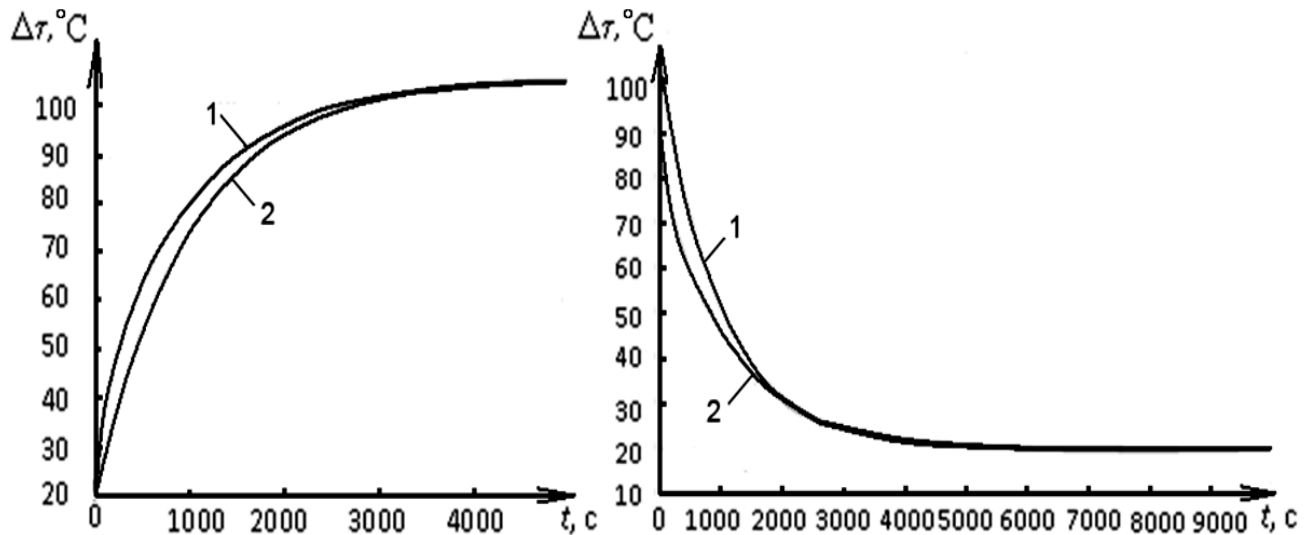


Рис. 3.20 Експериментальні та розрахункові криві нагрівання (а) й охолодження (б) АД: 1 – експериментальні; 2 – розрахункові

3.5 Прогнозування залишкового ресурсу асинхронних двигунів

Практичне застосування для засобів функціонального діагностування наведених у [7] моделей експлуатаційної надійності двигунів викликає суттєві труднощі, пов'язані з визначенням параметрів моделей, для яких потрібні додаткові дані або експерименти.

Якщо АД працює з незмінною температурою ізоляції, оцінити швидкість процесу її старіння або залишковий ресурс машини порівняно нескладно. Відомі залежності, які пов'язують термін придатності ізоляції даного класу з певним сталим рівнем температури протягом строку служби АД. Для ізоляції класу А є правило «восьми градусів» (правило Монтзігера) [40,125].

Строк придатності ізоляції АД, який працює зі сталим навантаженням (рис. 3.21)

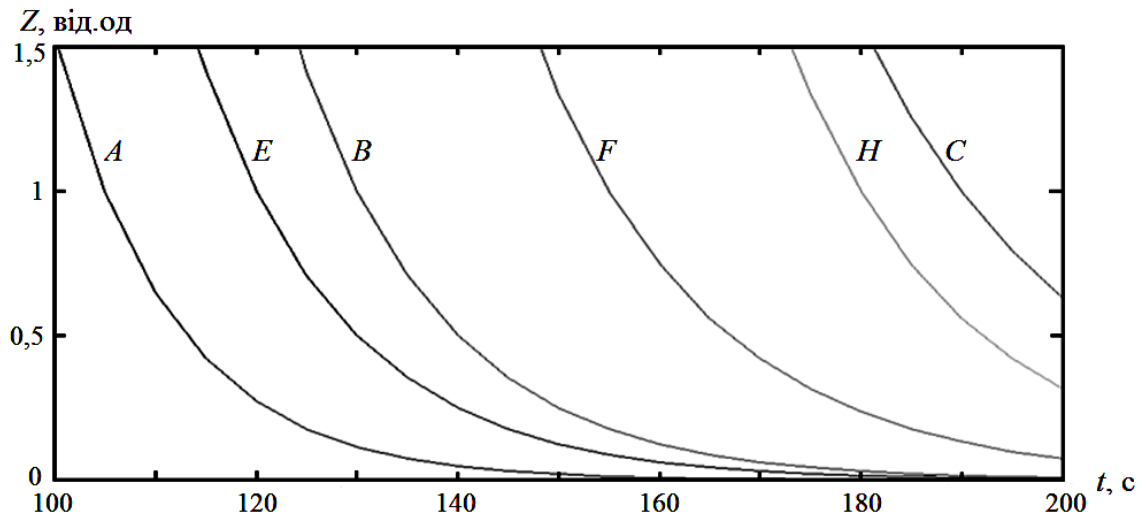


Рис. 3.21 Залежність відносного значення строку придатності ізоляції від її температури для різних типів ізоляції

Залишковий ресурс АД

де Z_0 - початковий ресурс ізоляції.

Така модель ураховує лише теплове старіння, а під час роботи ЕМС ізоляція зазнає ще й електричного і механічного впливу. Можна припустити, що насправді її руйнування внаслідок пробою відбудеться значно раніше.

Істотний вплив на строк служби АД спричиняє якість напруги живлення, що регламентується ГОСТ 13109-97.

За несиметрії напруги відбувається зростання температури всіх вузлів АД, проте найбільших теплових навантажень зазнає лобова частина найбільш завантаженої фази статора. За несиметрії напруги 4%, так само як і в разі зменшення напруги на 10%, термін служби АД скорочується вдвічі [125]. Струми зворотної послідовності викликають додаткове нагрівання, що також призводить до зниження строку служби АД.

У [125] наведено вираз для розрахунку температури обмоток АД у функції несиметрії напруги

З виразу видно, що при температурі обмоток АД підвищується на 25% (рис. 3.22).

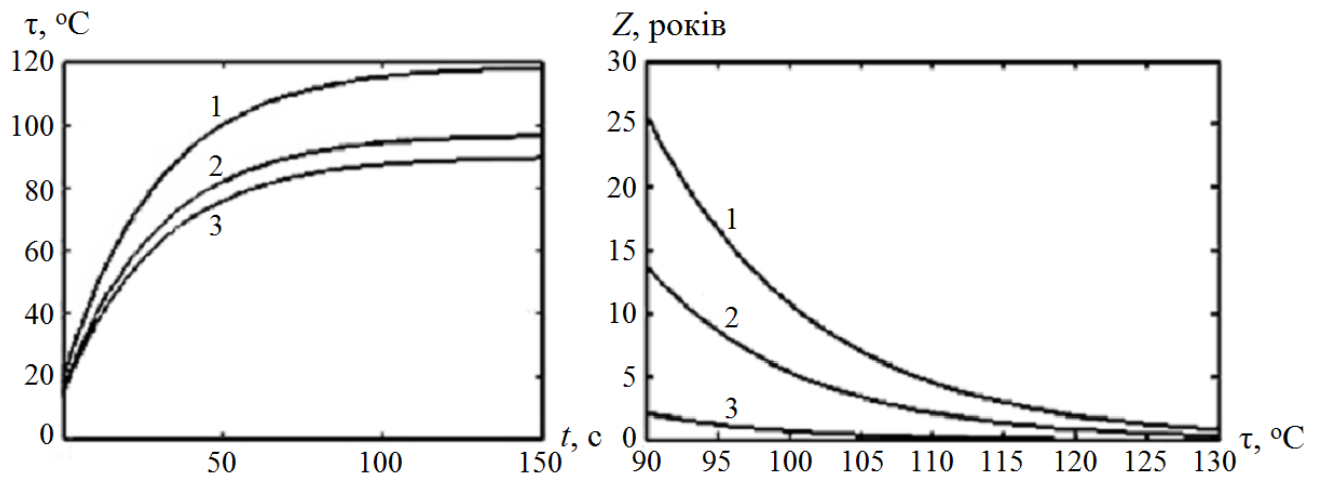


Рис. 3.22 Криві нагрівання АД (а) та залежності строку служби ізоляції класу А від коефіцієнта несиметрії напруги і температури ізоляції (б): 1 – симетрична напруга; 2 – несиметрія 2%, нормально допустима згідно ГОСТ 13109-97; 3 – несиметрія 4%, граничне допустиме значення

Згідно [138] додаткове перегрівання обмотки статора внаслідок несинусоїдальності напруги визначається за формулою

$$\Delta \tau = \frac{P_{\text{втр}}}{S_{\text{об}}}$$

Також додаткове перегрівання можна визначити з формули

$$\Delta \tau = \frac{P_{\text{втр}}}{S_{\text{об}}}$$

де $P_{\text{втр}}$ - втрати в міді, зумовлені вищими гармоніками напруги [138].

У [125] наведено спрощену формулу визначення перегрівання обмоток внаслідок несинусоїдальності й несиметрії напруги живлення

$$\Delta T = \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{н}}} \cdot \Delta T_{\text{н}} ,$$

де

Відносно значення строку служби з урахуванням перегрівання внаслідок несинусоїдальності й несиметрії напруги живлення

$$T_{\text{с}} = \frac{T_{\text{н}}}{\Delta T} .$$

Якщо АД тривалий час працює на пониженій напрузі, то через прискорене зношування ізоляції строк служби його зменшується. Строк служби ізоляції Z можна визначити за формулою де - строк служби ізоляції двигуна для номінальних напруги і навантаження, R - коефіцієнт, який залежить від величини і знаку відхилення напруги, а також від коефіцієнта завантаження двигуна [139]

$$\text{при } -0,2 < \Delta U < 0; \quad \text{при } 0,2 < \Delta U < 0.$$

З погляду нагрівання АД небезпечнішими є негативні відхилення напруги. На рис. 3.23 зображено залежності строку служби ізоляції обмоток АД для різних коефіцієнтів завантаження й різних значень негативного відхилення напруги.

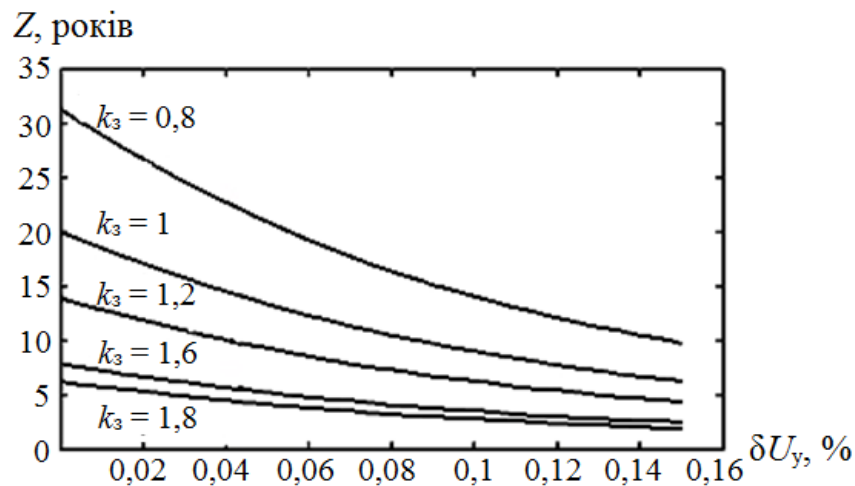


Рис. 3.23 Графіки залежності строку служби ізоляції від коефіцієнта завантаження та негативного відхилення напруги

Якщо температура τ змінюється у часі t , тобто ГЕН змінний, строк служби ізоляції [137,140]

Для прогнозування залишкового ресурсу застосовано метод екстраполяції. Правильність визначення початкових умов моделювання визначає якість прогнозу.

Математичний опис процесу зміни температури τ та ресурсу Z ізоляції:

$$\begin{aligned}\tau [(k+1) h] &\approx \tau(k h) + h \Delta \tau(k h), \\ Z[(k+1) h] &\approx Z(k h) - h \Delta Z e^{-b \Delta \tau} (k h),\end{aligned}$$

де $k = 0, 1, 2, \dots, n$.

Оцінка температури та залишкового ресурсу визначається:

$$\begin{aligned}[(k+1) h] &\approx (k h) + h \Delta (k h) + K_1[\tau(k h) - (k h)], \\ [(k+1) h] &\approx (k h) - h \Delta e^{-b \Delta \tau}(k h) + K_2[\tau(k h) - (k h)],\end{aligned}$$

де $K_1[\tau(k h) - (k h)]$, $K_2[\tau(k h) - (k h)]$ – вирази, які коригують якість оцінки.

Загальний час T , за який визначається залишковий ресурс, розбивається на певну кількість інтервалів відповідно до кроку дискретизації таким чином, щоб втрати на кожному інтервалі могли вважатися сталими. Далі визначаються температура обмоток на кожному інтервалі та залишковий ресурс за час T [29].

Приймаючи згідно [7] експонентний закон розподілу часу безвідмовної роботи АД, можна визначити ймовірність безвідмовної роботи ЕМС (рис. 3.24).

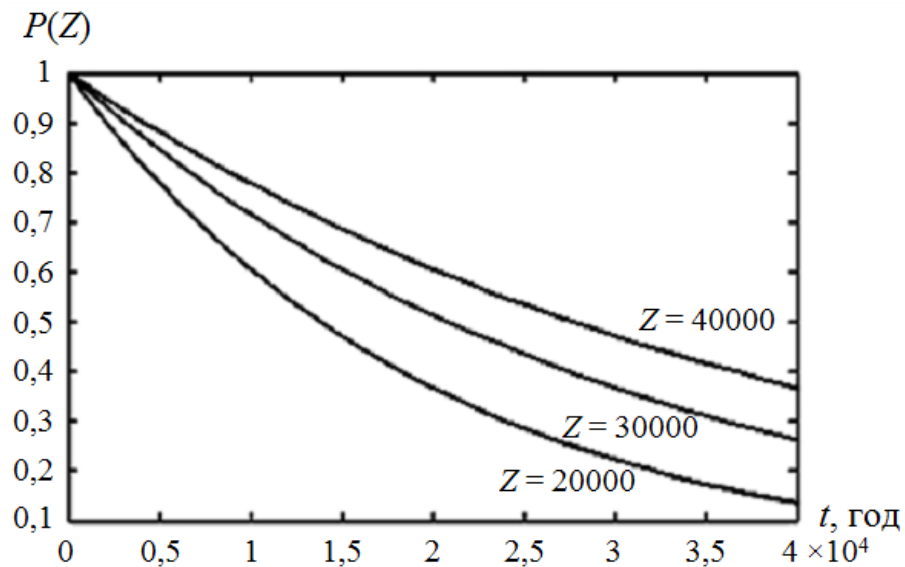


Рис. 3.24 Графік ймовірності безвідмовної роботи АД

3.6 Визначення енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами

Для оцінювання енергоефективності ЕМС з АД застосовуються енергетичні критерії – енергія, яка споживається з мережі за цикл роботи, питомі витрати енергії на одиницю продукції, сумарні втрати енергії. В деяких випадках застосовується безпосередньо критерій максимального ККД, оптимального імпедансу тощо. Однак не існує загальноприйнятого критерію енергоефективної роботи ЕМС [112].

Оцінювання енергоефективності ЕМС з АД є комплексним завданням з великою кількістю характеристик і чинників, які на нього впливають (ГЕН, якість живлячої напруги, технічний стан тощо). Основним показником ефективності роботи в енергетичному аспекті вважається ККД системи в цілому. Однак для комплексної оцінки енергоефективності важливі також коефіцієнт потужності, електроенергія, яка споживається протягом життєвого циклу і значення складових втрат.

Ефективність перетворення енергії ЕМС з АД визначається двома основними складниками: енергоспоживання та енерговикористання [43].

Авторами пропонується використовувати показники енергоефективності (ККД та коефіцієнт потужності АД) для визначення енергетичного і технічного стану ЕМС з урахуванням режиму навантаження та погіршення якості напруги живлення [36]. Визначення стану ЕМС з АД здійснюється порівнянням фактичних параметрів з їх еталонними значеннями. (рис. 3.25).

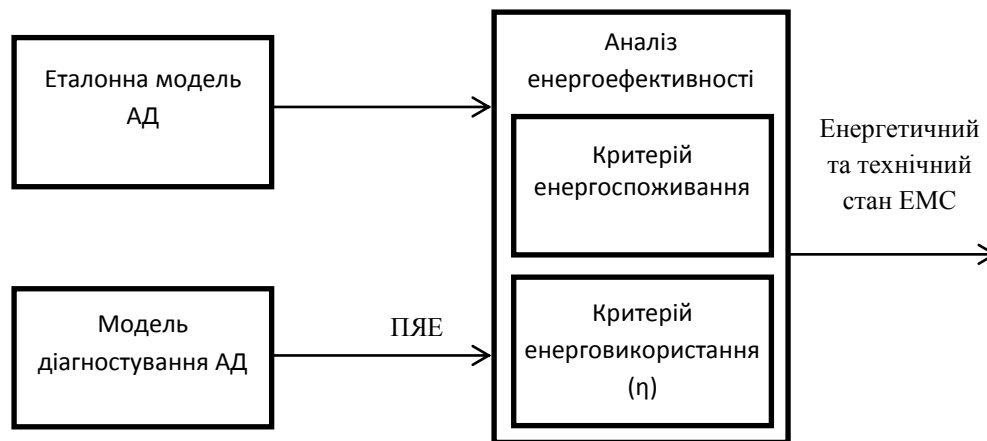


Рис. 3.25 Визначення енергоефективності ЕМС з АД

Однією з причин зниження рівня енергоефективності ЕМС є низька якість напруги живлення. Виникають додаткові втрати потужності від несиметрії і несинусоїдальності напруги, і в цьому випадку ККД знижується

де $\eta_{\text{н}}$ - ККД за умови неякісної напруги живлення.

Зниження ККД за рахунок неякісної напруги живлення і незадовільного технічного стану ЕМС з АД відповідно

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{нн}}}$$

Важливим є врахування впливу несиметрії напруги на потужність АД. Коефіцієнт завантаження β , який враховує зниження рівня номінальної потужності двигуна від несиметрії напруги живлення,

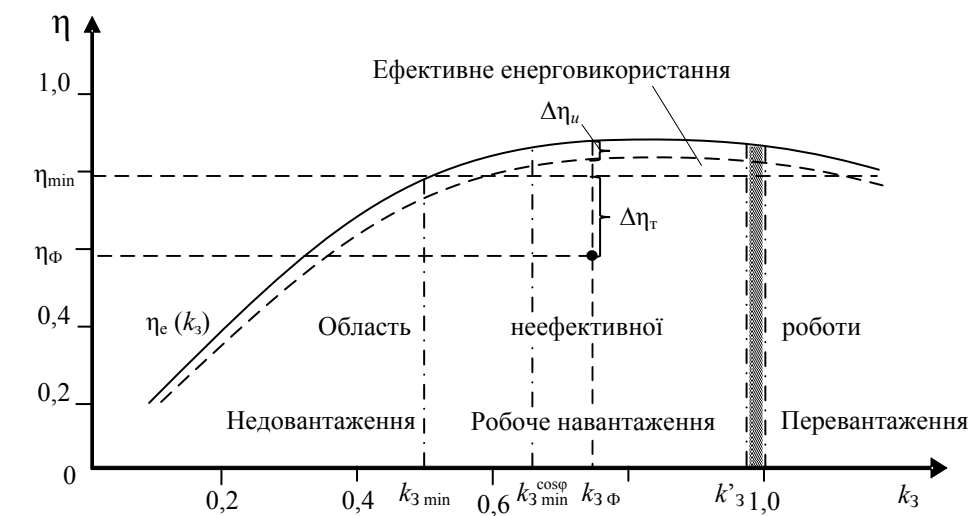
$$\beta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{нн}}}$$

Умови енергоефективної роботи ЕМС з АД відповідно до вимог державних стандартів (дод. А, табл. А.1-А.4)

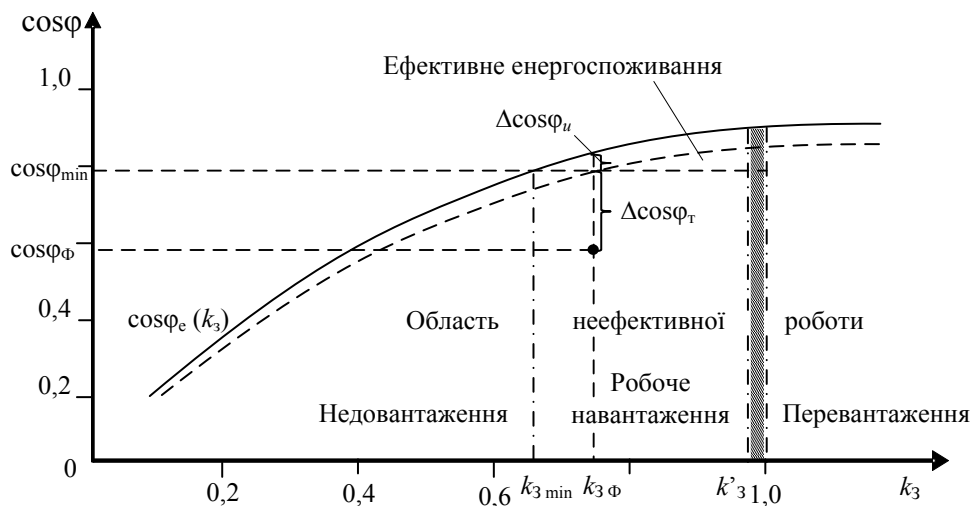
$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{нн}}}$$

де $\eta_{\text{нн}}$, $\beta_{\text{нн}}$ – еталонні (паспортні) характеристики ККД та коефіцієнту потужності; $\eta_{\text{н}}$, $\beta_{\text{н}}$ – фактичні (визначені) значення ККД та коефіцієнту потужності; $\eta_{\text{нм}}$, $\beta_{\text{нм}}$ – найменші значення ККД та коефіцієнту завантаження для області енергоефективної роботи.

Еталонні характеристики представлені залежностями $\eta_e(k_3)$ і $\cos\varphi_e(k_3)$, а фактичним значенням ККД і коефіцієнту потужності відповідають точки з координатами $k_{3\min}$ та $k_{3\Phi}$ відповідно (рис. 3.26). В залежності від того, в яку область потрапляє точка з координатами k_3 та η , робиться висновок про рівень енергоефективності ЕМС з АД. Можливі рівні енергоефективної роботи ЕМС з АД наведено в табл. 3.4. Використовуючи залежність $\eta_e(k_3)$, можна отримати подібну таблицю також для процесу енергоспоживання.



а



б

Рис. 3.26 Области ефективного енерговикористання (а) і енергоспоживання (б) ЕМС з АД

Таблиця 3.4

Рівні енергоефективної роботи ЕМС з АД

Рівень енергоефективності		Області роботи		Висновки
Високий				Ефективне енерговикористання
Низький	Недовантаження			Низька якість електроенергії
				Незадовільний технічний стан ЕМС
	Робоче навантаження			Незадовільний технічний стан АД
	Перевантаження			Низька якість електроенергії
				Незадовільний технічний стан ЕМС

3.7 Техніко-економічний ефект від впровадження функціонального діагностування електромеханічних систем

Визначення техніко-економічного ефекту впровадження функціонального діагностування для ЕМС з АД пов'язане з аналізом енергетичних, технологічних, надійнісних аспектів ефективності і в загальному випадку може бути означено як економія протягом життєвого циклу

,

де — економія внаслідок зменшення споживання електричної енергії; — економія від зменшення перетоків реактивної потужності; — економія від переходу до системи технічного обслуговування за фактичним станом; — економія від зменшення економічних збитків через відмови ЕМС з АД; , , , — сталі коефіцієнти; — спожита електроенергія; — спожита реактивна

обслуговування за фактичним станом відповідно; , – зменшення витрат підприємства на технічне обслуговування та ремонти після переходу до технічного обслуговування за фактичним станом.

Витрати на технічне обслуговування протягом життєвого циклу

(3.7)

де – вартість технічного обслуговування 1 кВт потужності ЕМС з АД.

Витрати на ремонт ЕМС з АД протягом життєвого циклу

— (3.8)

де – коефіцієнт відмови, приведений до року експлуатації; – витрати на ремонт; – середній наробіток на відмову в місяцях; – кількість місяців роботи; – вартість ремонту 1 кВт потужності.

Статистичні та експериментальні дані показують, що з урахуванням збільшення сумарних втрат в ЕМС з АД після кожного ремонту й зростання вартості ремонтів подальша експлуатація такої ЕМС стає економічно не-вигідною [112].

Згідно [31] застосування методів обслуговування за фактичним станом дозволить знизити річну кількість ремонтів приблизно вдвічі.

Тоді в загальному вигляді

(3.9)

де – коефіцієнт відмови ЕМС з АД, приведений до року експлуатації з планово-попереджувальним обслуговуванням та за фактичним станом.

Економічні збитки через відмови устаткування внаслідок незадовільного технічного стану складаються:

з технологічних збитків, які включають витрати від недовипуску продукції та додаткові витрати, обумовлені простоюванням устаткування і працівників;

зі збитків через витрати на заміну устаткування, що вийшло з ладу, .

Згідно [34]

$$, \quad (3.10)$$

де – питомі витрати на одиницю продукції; – фактична тривалість простою (); – припустима тривалість простою; – частина втрат за одну годину простою; – середньодобовий випуск продукції.

Отже, витрати протягом залишкового ресурсу

$$(3.11)$$

Дослідження [111] показали, що витрати на планово-попереджувальне обслуговування становлять в середньому 200 грн на 1кВт установленної потужності ЕМС з АД на рік, а за фактичним станом – 120 грн.

Розрахунки за формулами (3.6) – (3.11) доводять, що обслуговування за фактичним станом устаткування дозволить зекономити до 50% витрат на сервіс і ремонт.

За експлуатаційний строк роботи (життєвий цикл) насосної установки з АД 10 років основні складові розподіляються таким чином: вартість електроенергії - 84%, обслуговування – 10%, первинні інвестиції – 5%, монтаж – 1%.

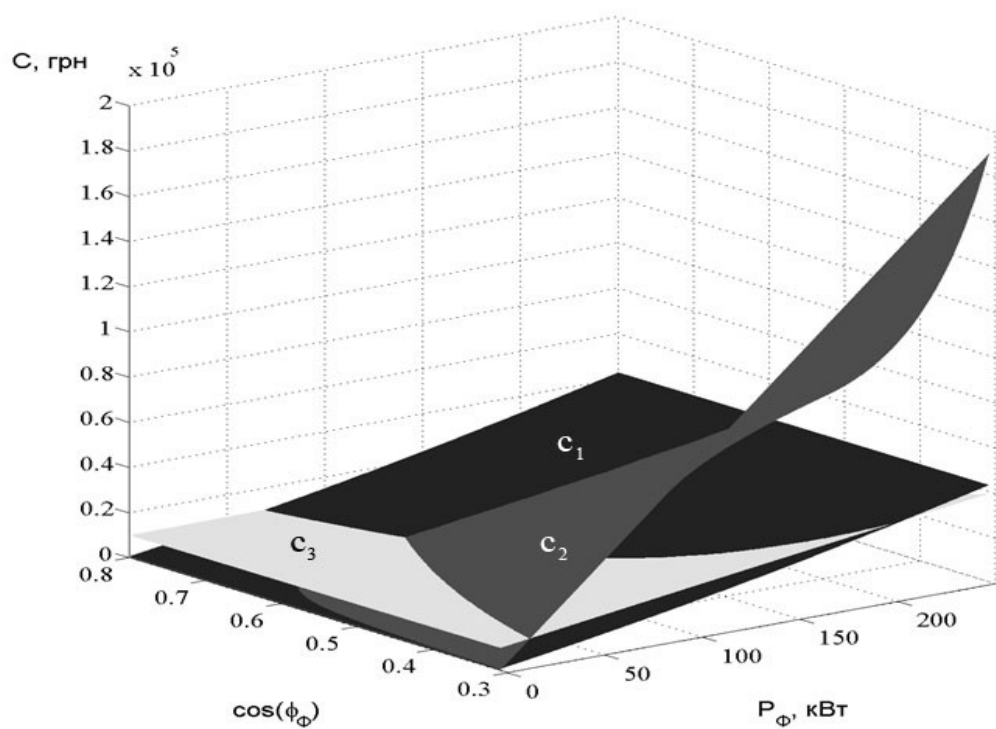
На основі результатів діагностування енергоефективності ЕМС з АД плануються енергозберігаючі заходи. Наприклад, авторами розроблено

методику та програмне забезпечення «Методика визначення енергетичної ефективності застосування регульованого електропривода в насосних установках» [23,109,110]. Програмне забезпечення визначає доцільність використання основних видів регульованого ЕП, а саме, частотно-регульованого привода, вентильного двигуна, муфти ковзання, асинхронно-вентильного каскаду в залежності від параметрів насосної установки (потужності, ККД, глибини регулювання, відносного протитиску в системі, ККД перетворювача, ККД привода, кількості насосів, періоду роботи насосної установки, вартості регульованого ЕП, тарифів на електроенергію, коефіцієнту амортизації, ставки дисконтування, очікуваного строку життя проекту).

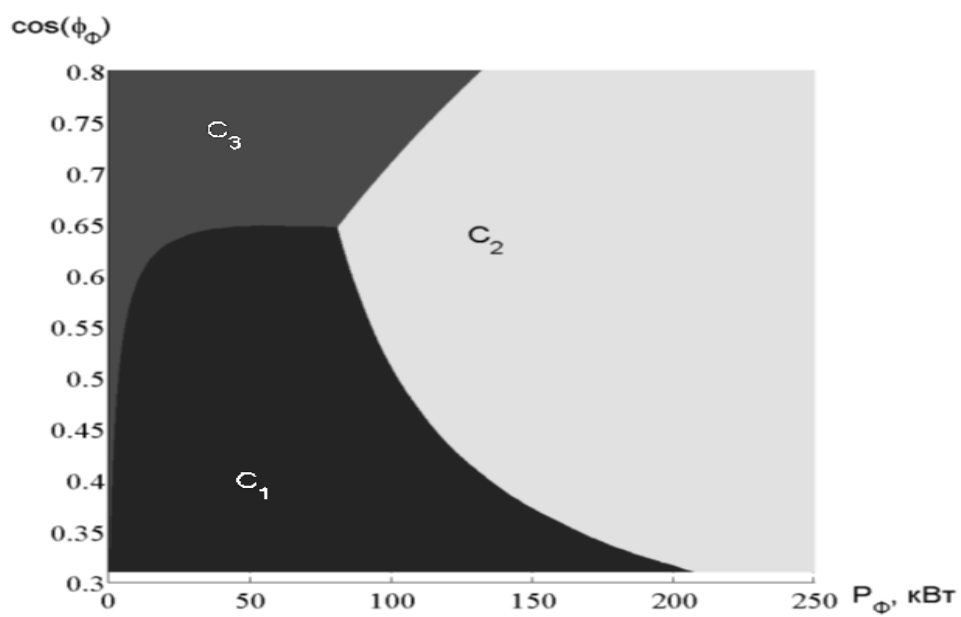
Програмне забезпечення також дає змогу отримати графіки залежності фінансових показників (чистої приведеної вартості, внутрішньої норми рентабельності, терміну окупності, дисконтованого строку окупності) від параметрів (потужності, глибини регулювання, відносного протитиску, кількості насосів, тарифу на електроенергію, ставки дисконту, строку життя проекту, періоду опалення і коефіцієнту амортизації) для наведених типів ЕП.

Доцільність впровадження енергозберігаючих заходів оцінюється за допомогою тривимірних графіків (рис. 3.27). У випадку низького коефіцієнту потужності можливі варіанти придбання нового ЕП з високим коефіцієнтом потужності або встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності [112]. Доцільність застосування заходу може бути оцінено за допомогою вартості життєвого циклу.

На рис. 3.27 зображено зміну вартості життєвого циклу від запровадження енергозберігаючих заходів: – вартість життєвого циклу у разі придбання нового двигуна (залежить від потужності P); – вартість життєвого циклу в разі придбання установки компенсації реактивної потужності – визначається потужністю пристрою компенсації Q_c і є функцією Q_c ; – вартість життєвого циклу в разі відмови від запровадження енергозберігаючих заходів, Q_{c0} .



а



б

Рис. 3.27 Зміна вартості життєвого циклу від запровадження енергозберігаючих заходів: а – тривимірні області для трьох варіантів; б – області мінімальних значень вартості

Рішення про вибір одного з варіантів для конкретних умов () відповідатиме найменшому значенню вартості життєвого циклу серед трьох варіантів, тобто точці з найменшою координатою на осі *C*.

У разі застосування функціонального діагностування енергоефективності ЕМС з АД економиться до 10% спожитої електроенергії, що приблизно в 2 рази перевищує вартість устаткування.

3.8 Вартість життєвого циклу електромеханічних систем

Для проведення техніко-економічного обґрунтування або оцінювання терміну окупності використовують вартість обладнання, не беручи до уваги того, що ця вартість складає лише 5-10% від усієї суми витрат за життєвий цикл (з моменту придбання до моменту утилізації устаткування).

На сьогодні розроблено ефективні методи оцінювання і контролювання експлуатаційної вартості обладнання, які враховують всі витрати, що виникають в процесі його використання (витрати на монтування, споживання електроенергії, технічне обслуговування тощо).

Одним з методів зниження витрат на експлуатацію обладнання, який допомагає зменшити збитки й збільшити рівень енергоефективності ЕМС, є аналізування вартості її життєвого циклу за складовими витрат (LCC analysis – Life Cycle Costs analysis) та факторів які на нього впливають. Детальне дослідження кожного з них дозволяє врахувати їх вплив на подальше зменшення витрат шляхом реалізації відповідних рішень [115-117].

Вартість життєвого циклу – це сума всіх витрат на придбання, встановлення, експлуатацію, електроенергію, обслуговування, втрати під час простоїв, утилізацію. Основні статті витрат: придбання, обслуговування, електроенергія. Наприклад, для насосних установок з АЕП основні складові в середньому розподіляються наступним чином: первісні інвестиції – 5%; вартість обслуговування – 10%; вартість монтажу – 1%; вартість електроенергії – 84% [115-117]. Через високу вартість утилізації значна увага в розрахунку *LCC* приділяється ресурсу устаткування.

Аналізування вартості життєвого циклу є інструментом енергетичного менеджменту і дозволяє підвищити рівень енергоефективності ЕМС з АД, зменшити величину витрат, знайти найефективніше рішення [119].

Згідно [115,119], вартість життєвого циклу

$$LCC = C_{KB} + C_{ВП} + C_{ВЕ} + C_{ВО} + C_{СТ} + C_{ПП} + C_{ОД} + C_{ВУ},$$

де C_{KB} - початкова або капітальна вартість обладнання (інвестиційні витрати); $C_{ВП}$ - вартість встановлення й пусконаладжувальних робіт, в тому числі – транспортування; $C_{ВЕ}$ - витрати на електроенергію; $C_{ВО}$ - операційні витрати (з/п обслуговуючого персоналу тощо); $C_{СТ}$ - витрати на сервіс і техобслуговування (поточний і плановий ремонт); $C_{ПП}$ - витрати з причини простою або втрат продуктивності; $C_{ОД}$ - витрати на охорону довкілля; $C_{ВУ}$ - витрати на утилізацію (включаючи демонтаж устаткування та вивезення додаткового устаткування).

У свою чергу початкові капіталовкладення містять такі складові: ціна за купованого устаткування як базова; розроблення конструкторської і технологічної документації; процес комерційної пропозиції; випробовування та інспекторський нагляд; інвентаризація запчастин; навчання обслуговуючого персоналу; допоміжне устаткування.

Витрати на монтаж і пусконаладжувальні роботи містять: розроблення фундаменту конструкції, підготовку, бетонування та армування і т.ін.; встановлення устаткування на фундамент; транспортування устаткування і матеріалів; підключення електроустаткування та кабелю; підключення допоміжних, додаткових систем; вимірювання характеристик під час запуску.

Для розрахунку витрат на електроенергію необхідні дані про режими роботи устаткування з АЕП.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу залежить від обсягу робіт і ступеня автоматизації технологічного процесу. Наприклад, насос, який перекачує небезпечні речовини, потребує щоденної перевірки на витік. З іншого боку, повністю автоматизована система може потребувати обмеженої уваги операторів.

Витрати на ремонт і сервісне обслуговування залежать від рекомендацій виробника щодо їх частоти і обсягу, плюс витрати на запасні частини й витратні матеріали. Кількість регламентних робіт визначає сумарні витрати на планове техобслуговування. Передбачувані елементи обліку – ущільнення, підшипники, частини які зношуються, клапани, муфти, деталі двигуна.

Витрати з причини простою та/або втрати продуктивності є дуже важливим елементом підрахунку сумарного *LCC* і можуть конкурувати із витратами на електроенергію та заміну частин. Для зниження величини таких витрат встановлюють резервне устаткування. У цьому випадку позапланове техобслуговування міститиме лише витрати на ремонт.

Витрати на боротьбу з забрудненням довкілля, включаючи утилізацію деталей і забруднення від викидів, в основному залежать від середовища, яке перекачується. Штрафи за збитки від проривів трубопроводів і пожеж з причини прориву (перекачування вогнебезпечних речовин). Належать до утилізації: відпрацьовані мастила, охолоджувальні рідини, спрацьовані запчастини й деталі.

Витрати на демонтування й утилізацію – забезпечують відновлення робочої площадки. За дорогої утилізації в розрахунку *LCC* велика увага приділяється ресурсу обладнання.

4 ЗАСОБИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

4.1 Схемно-технічні рішення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем

Для створення засобів діагностування енергоефективності ЕМС застосовано методологію бенчмаркінгу енергоефективності з наступними основними принципами.

Принцип достатності та інформаційної повноти регламентує вибір мінімальної кількості діагностичних параметрів процесів, якими супроводжується робота ШСУ.

Принцип корекції неідеальності вимірювальних каналів обчислювальними методами.

Принцип самодіагностування забезпечує високу метрологічну і функціональну надійність засобів, їх виживання і пристосованість до реальних умов, що постійно змінюються.

Принцип дружності інтерфейсу за максимальної інформаційної ємності забезпечує достовірне сприйняття оператором стану технологічної установки з одного погляду на монітор.

Принцип інваріантності регламентує вибір діагностичних ознак, інваріантних до типу технологічної установки і форми зв'язку з параметрами її енергетичного й технічного стану.

Принцип структурної гнучкості забезпечує реалізацію паралельно-послідовної структури системи діагностування, виходячи з критеріїв необхідної швидкодії за мінімальної вартості.

Принцип багаторівневої організації забезпечує можливість роботи з засобами діагностування фахівцям різного рівня кваліфікації та відповідальності. Завдяки наявності мережевої підтримки локальні пристрої діагностування енергоефективності ШСУ поєднуються в загальну діагностичну мережу, до якої підімкнені комп'ютери технагляду, головних механіків, інженерів і підприємства в цілому. Такий багаторівневий контроль забезпечує

оптимізацію електроспоживання ШСУ та їх безпечну експлуатацію. Головне завдання діагностичної мережі - організація автоматизованої системи діагностування енергоефективності, енергетичного менеджменту і аудиту всього гірничовидобувного підприємства, коли в оперативній службі автоматично накопичуються дані про енергоефективність та стан обладнання, що забезпечує постійний розвиток і вдосконалення подібних систем.

Для реалізації на апаратному рівні поставлених завдань розроблено схемно-технічні рішення функціонального діагностування енергоефективності ЕМС [36,44,88,99]. Аналіз принципів функціонування діагностичних систем дозволяє окреслити структурні елементи схеми (рис. 4.1).

Пристрій вимірювання діагностичних параметрів містить три вимірювальних вузли з лінійними амплітудно-частотними характеристиками: трансформатори напруги або подільники для вимірювання напруги; різні струмові датчики; датчик температури довкілля. Вузли можуть встановлюватися безпосередньо на клемній коробці двигуна, який діагностується (без будь-якого порушення режиму його роботи) або на електрощитку, від якого він живиться.

Часові аналогові сигнали трифазних напруг і струмів, отримані від датчиків, містять завади, а також надлишкову інформацію, яка характеризує роботу окремих вузлів діагностованого двигуна та їх взаємодію. Пристрій попереднього оброблення і перетворення даних виділяє корисний сигнал за допомогою детектування й фільтрації. Пристрої вимірювання, попереднього оброблення і перетворення даних формують сигнали діагностичних параметрів для моделей - діагностування, спектрально-струмового аналізу і визначення ПЯЕ (рис. 4.2).

Для діагностичного аналізу потрібні середньоквадратичні значення (СКЗ) напруги і струму фаз. Кут зсуву φ в кожній фазі двигуна і частота мережі f визначаються програмно. Алгоритм вимірювань та вибір кроку дискретизації визначаються за моделлю ГЕН і коригуються прогностичною моделлю.

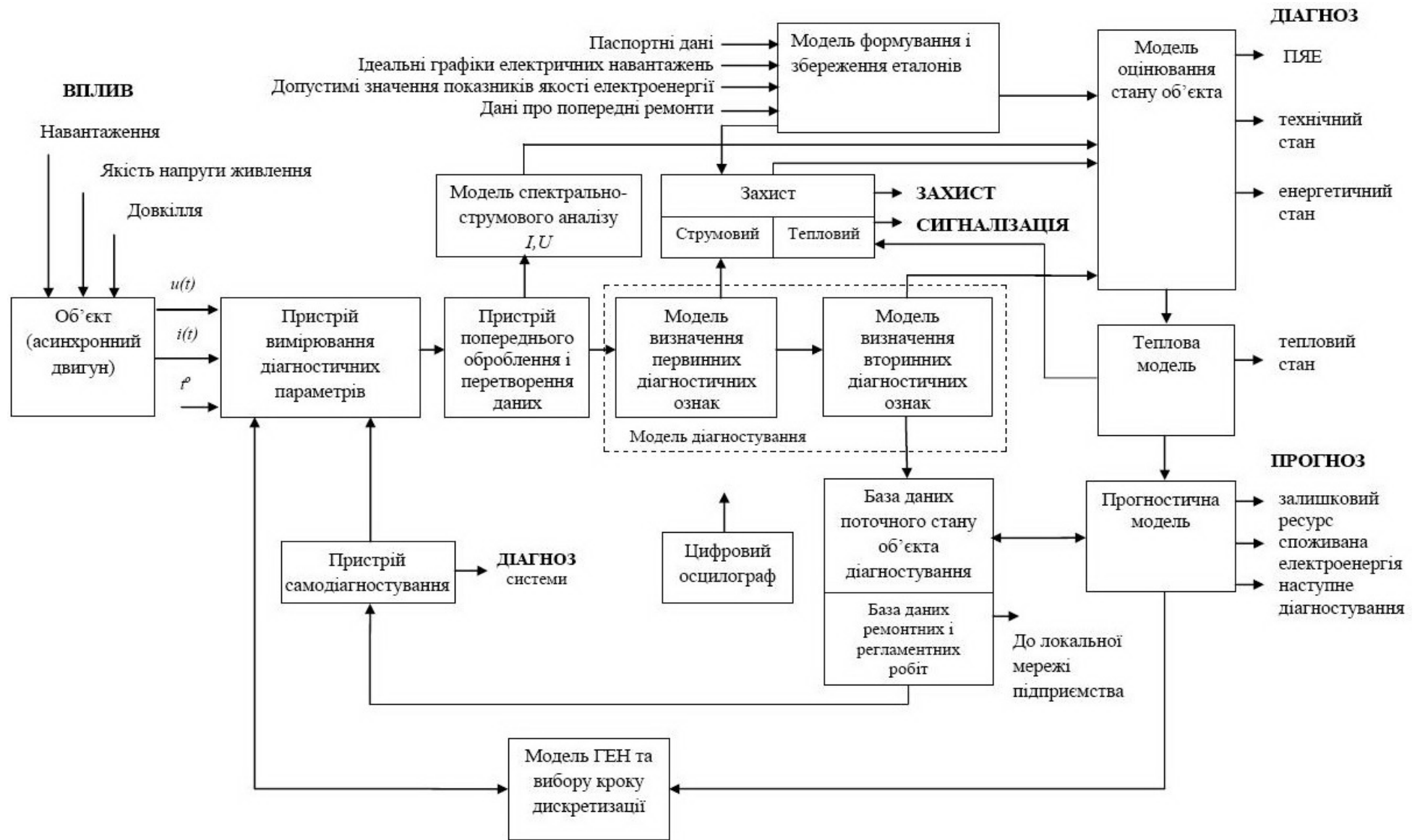


Рис. 4.1 Структурна схема функціонального діагностування енергоефективності ЕМС



Рис. 4.2 Структурна схема пристроїв вимірювання, попереднього оброблення і перетворення діагностичних параметрів для однієї фази двигуна

Для спектрально-струмового аналізу реєстрація струму і напруги виконується протягом часу кратного періоду основної частоти, необхідного для виконання спектрального аналізу, на частотах до 10 кГц [144]. Вимірювання виконується декілька раз на частотах 0,01-0,1 Гц. Сигнали пропускаються крізь фільтр нижніх частот з частотою зрізу вищою від найбільшої частоти корисного сигналу, що необхідно для недопущення завад. Це зумовлено тим, що результати вимірювань не є неперервною функцією, а являють собою вибірку значень з певним кроком аргументу в часі.

Аналоговий сигнал подається на АЦП, у якому він перетворюється на цифровий, і далі – на ЕОМ. За допомогою моделі спектрально-струмового аналізу формуються спектри векторів Парка струму і напруги. В результаті аналізування модулів векторів Парка струму і напруги виявляються лінії відсутні в спектрі напруги, але наявні в спектрі струму. Невідповідність вказаних спектрів свідчить про наявність ушкоджень в діагностованому двигуні.

Алгоритми вимірювання ПЯЕ визначено ГОСТ 13109—97. Фазні й міжфазні відхилення напруги, а також коефіцієнти несиметрії розраховуються за напругою основної частоти. Вхідна оцифрована напруга виражається за допомогою розкладення Фур'є у вигляді спектру гармонік кратних основній частоті. За виділеною таким чином напругою основної частоти методом симетричних складових у трифазній мережі розраховуються напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей. Відхилення напруги та її несиметрію в трифазній мережі розраховують відносно напруги основної частоти й прямої послідовності.

АЦП перетворює аналогові сигнали напруги і струму в цифрову форму, причому найвища частота дискретизації сигналів потрібна для визначення ПЯЕ. За один період (0,02с) основної частоти виконується 256 вимірювань, що дозволяє з достатньою точністю визначити діюче значення гармонічної складової вхідної напруги 40-го порядку, частота якої 2 кГц. З отриманих на кожному періоді діючих значень гармонічних складових від 1-ї (50 Гц) до 40-ї

гармоніки розраховується середнє на i -му інтервалі. Тривалість цього інтервалу вибирається такою, що дорівнює 8-16 періодам основної частоти (0,16-0,32 с), і визначає тривалість «вікна вимірювання». Значення того або іншого параметра обчислюється як СКЗ за кількома вимірами.

Модель визначення первинних діагностичних параметрів АД у відповідності до алгоритмів перетворювання інформації формує компоненти вектора первинних діагностичних ознак (U, I, P, φ, f). Однак цієї інформації недостатньо для висновку про стан двигуна, і первинні діагностичні параметри не можуть бути використані для визначення дефектів на стадії їх зародження. Необхідні додаткові обчислення виконуються моделями визначення вторинних діагностичних ознак (ПЯЕ, параметрів процесу енергоспоживання, параметрів схеми заміщення, робочих параметрів, параметрів процесу енерговикористання), які є інформативними параметрами діагностичної моделі, що характеризують поточний стан двигуна.

Модель формування і збереження еталонів на основі паспортних даних АД, ідеальних ГЕН, допустимих і граничних значень ПЯЕ, даних про попередні ремонти формує еталонні значення інформативних параметрів [28,118,123]. На основі поточних значень параметрів діагностичної моделі і еталонних в моделі оцінювання стану двигуна виконується процедура прийняття рішення про приналежність до заздалегідь визначеного класу станів.

Першим етапом розпізнавання стану є порівняння поточних параметрів діагностичної моделі з їх допустимими і граничними значеннями для визначення неприпустимого або аварійного стану АД. У випадку перевищення струмом двигуна порогового значення, а також при перевищенні температури спрацьовує захист, сигналізація, і сформується сигнал на відключення.

Другий етап - визначення технічного й енергетичного стану АД [132]. На цьому етапі в ознаковому просторі формуються області відповідні особливим станам двигуна – гранично припустимому значенню параметра технічного стану, передаварійній ситуації або припиненню нормального функціонування.

Аналіз трендових характеристик параметрів діагностичної моделі дає можливість оцінювати тенденції зміни стану АД, тобто прогнозування його остаточного ресурсу, споживаної електроенергії протягом життєвого циклу і строку наступного діагностування. Для цього застосовуються теплова й прогностична моделі, а також бази даних поточного стану двигуна та ремонтних і регламентних робіт.

Вимірювання струмів і напруг та їх аналіз виконуються з деякою періодичністю відповідно до режиму роботи АД, його ГЕН і коригуються прогностичною моделлю в залежності від його технічного стану. Результати вимірювань і аналізу заносяться в базу даних, за якою контролюється розвиток ушкоджень у часі, і визначається остаточний ресурс двигуна.

В результаті створення і регулярного поповнення бази даних вимірювань і результатів їх аналізу, в процесі експлуатації устаткування можливо простежити динаміку фактичного розвитку окремих ушкоджень і прогнозувати їх подальший розвиток. Моніторинг напруги дозволяє уточнювати прогноз розвитку ушкоджень, зумовлених якістю напруги живлення.

Запропоновано два шляхи побудови технічних засобів функціонального діагностування енергетичної ефективності ЕМС.

Перший шлях полягає в створенні автономного промислового мікропроцесорного пристрою, оснащеного датчиками струму, напруги й температури, АЦП, пам'яттю, дисплеєм, клавіатурою, пультом керування тощо (рис. 4.3). Мікропроцесорна система виконує вимірювання, оброблення їх результатів, відображення даних на дисплеї і виведення на друк. Передавати результати обчислень на ПЕОМ для подальшого оброблення можливо через інтерфейси RS232 або знімний носій інформації.

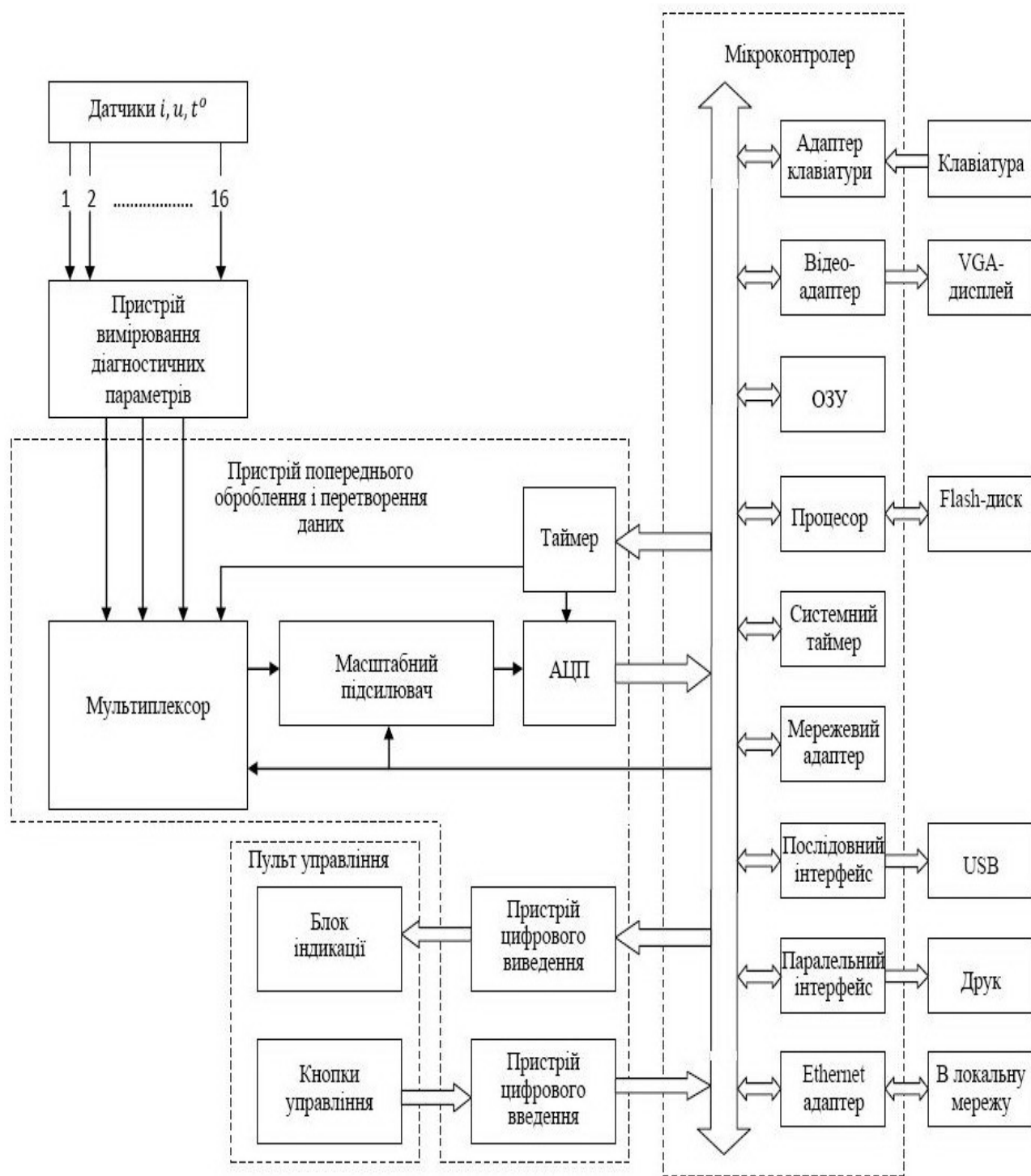


Рис. 4.3 Структурна схема діагностування на основі промислового автономного мікропроцесорного пристрою

Пристрій попереднього оброблення і перетворення даних, наприклад, Analog Devices містить мультиплексор на 16 каналів, 16-розрядний АЦП з частотою вибірки до 200 кГц і програмований таймер. Перетворювач має вбудовані кола захисту від перенапруг, фільтр захисту від накладання спектрів, АЦП послідовного наближення, програмований цифровий фільтр, паралельний та послідовний інтерфейси. Обмін даними з мікроконтролером, наприклад, фірми NPX Semiconductors на базі ядра ARM7 архітектури Cortex, можливий програмним шляхом, з перериванням і в режимі прямого доступу до пам'яті (використовується для оброблення сигналів у реальному часі). Мікроконтролер має стандартні порти (RS232/422/485, PS/2, паралельний), інтерфейси (VGA, EIDE, Ethernet IEEE, магнітних накопичувачів) тощо.

Вказані характеристики дозволяють використовувати пристрій для проведення тривалого безперервного діагностування ЕМС в умовах промислових приміщень без участі оператора. Використання промислових засобів автоматизації, які легко спрягаються один з одним, робить систему апаратно гнучкою і відкритою для модернізації [67].

У другому випадку програмно-апаратний комплекс містить ПЕОМ, на яку покладаються всі функції програмної частини діагностувальних засобів. Сполучення ПЕОМ з вимірювальними датчиками виконується за допомогою комутаційного пристрою з АЦП, який перетворює аналогові сигнали на цифрові.

Такий принцип побудови має істотні переваги: можливість прискореного розроблення пристрою – апаратна частина зведена до мінімуму; застосування потужних процесорів для оброблення сигналів у реальному часі; програмне забезпечення мовами високого рівня; можливість застосування стандартних засобів введення-виведення і накопичувачів інформації; дрібносерійний характер виробництва робить економічно виправданою структурну надлишковість і відносно високу вартість компонентів.

4.2 Алгоритм функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами

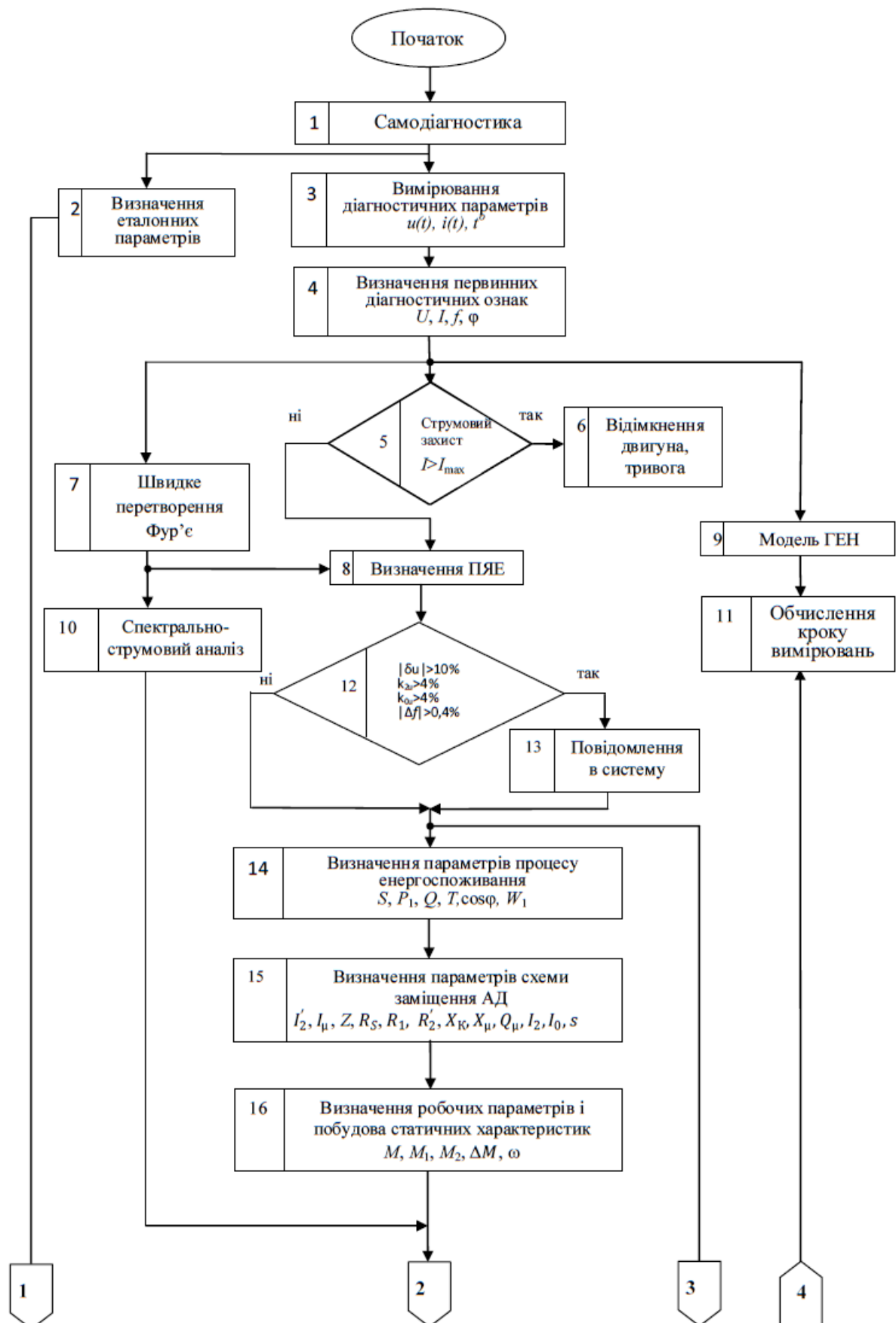
Функціональне діагностування енергоефективності являє собою процес контролювання поточних експлуатаційних параметрів ЕМС для визначення їх енергетичного і технічного стану, який змінюється під час експлуатації та в будь-який момент часу має показники та характеристики, встановлені нормативно-технічною документацією (ДСТУ, ГОСТ, ТУ тощо) [36,108]. Результатом діагностування є висновок про енергетичний і технічний стан ЕМС з АД з ідентифікацією виду відхилення (пошкодження), прогнозування залишкового ресурсу, визначення наступного строку діагностування.

Послідовність виконання етапів діагностування, а також аналізування його результатів являють собою алгоритм діагностування [107]. Алгоритм діагностування параметрів АД є основним алгоритмом роботи системи. У відповідності до нього формується висновок щодо фактичного стану і прогноз його технічного стану на майбутнє.

Для побудови алгоритму діагностування використовується інформаційний метод [106], заснований на виборі параметрів з максимальною інформацією про енергетичний стан об'єкту діагностування.

Послідовність дій діагностування ЕМС з АД (рис. 4.4) є такою: вимірювання діагностичних параметрів; визначення первинних діагностичних ознак; струмовий захист; визначення ПЯЕ; спектрально – струмовий аналіз; визначення параметрів процесу енергоспоживання і робочих параметрів; діагностика технічного стану; визначення параметрів процесу енерговикористання; діагностика енергетичного стану; визначення параметрів теплової моделі й тепловий захист, залишкового ресурсу, споживаної енергії та її втрат; встановлення наступного строку діагностування.

Така послідовність дій зумовлена наступним.



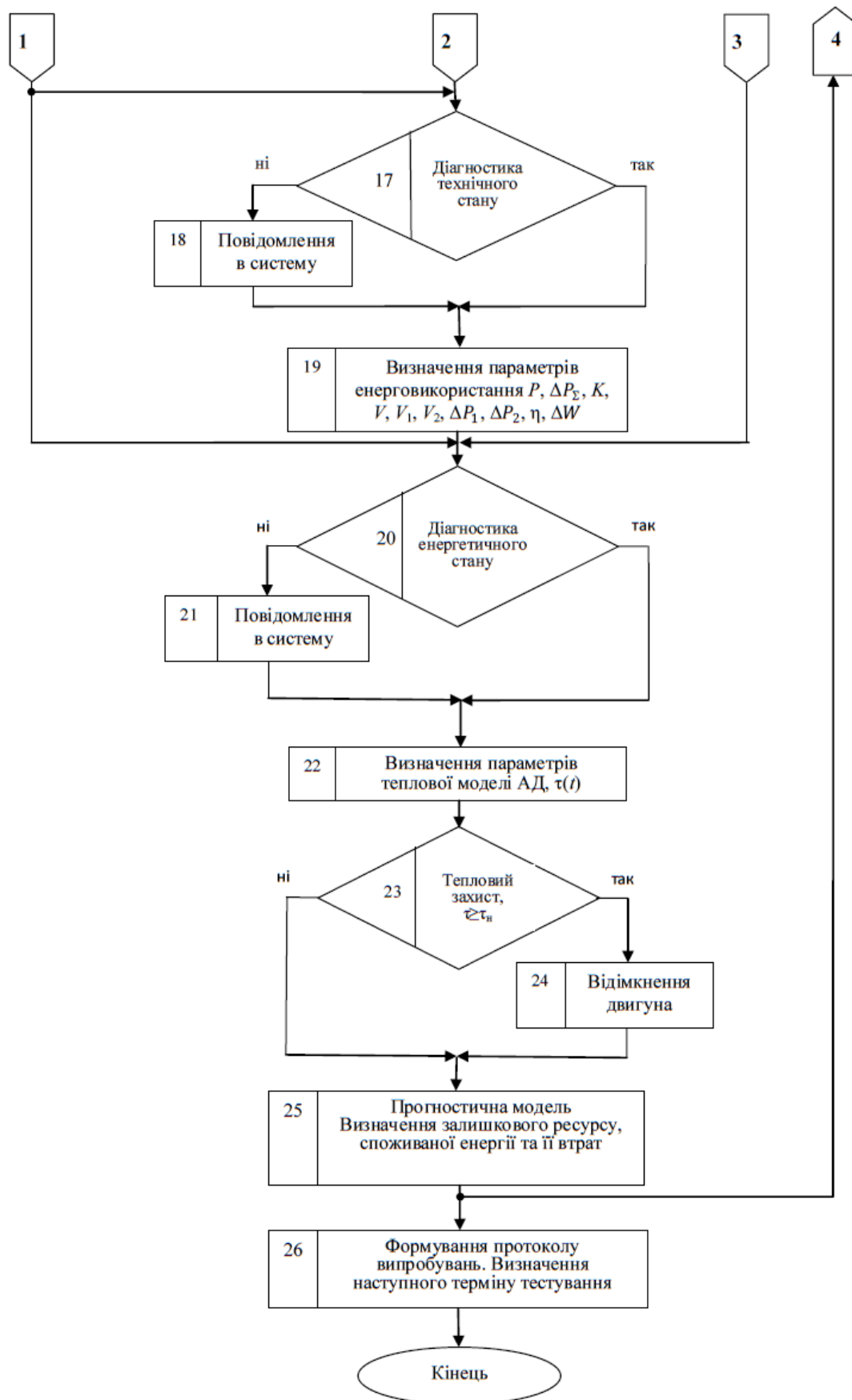


Рис. 4.4 Алгоритм функціонального діагностування енергоефективності
ЕМС з АД

Розрахунок вторинних діагностичних ознак здійснюється за діагностичними параметрами, а визначення аварійних режимів, діагностування енергетичного і технічного стану, прогнозування залишкового ресурсу - шляхом аналізування первинних і вторинних діагностичних ознак. Визначенню енергетичного стану і прогнозуванню передують визначення аварійних режимів (у випадку аварії подальші дії недоцільні).

Аналіз факторів впливу на енергоефективність і технічний стан ЕМС з АД, а також методів діагностування свідчить про доцільність використання як інформативних діагностичних саме їх електричних параметрів (миттєві значення напруги і струмів фаз) та врахування температури довкілля для корекції прогнозу залишкового ресурсу. Для визначення технічного й енергетичного стану АД необхідним є використання додаткових параметрів – первинних діагностичних ознак. Вони являють собою не миттєві значення сигналів, а їх зміну протягом деякого інтервалу часу.

Спочатку аналізується діагностичний параметр, від зміни величини якого залежить решта параметрів, та інформація про який не потребує уточнень за допомогою інших перевірок. Для АД доцільно спочатку аналізувати зміну напруги на обмотках статора, а потім – струм. Контроль напруги фазних обмоток за ПЯЕ дозволяє виявляти можливі несиметричні й аварійні режими роботи двигуна. Зміна параметрів живильної мережі призводить до зміни струму статора. Навпаки, якщо досліджувати спочатку струм, то без додаткових перевірок параметрів, які впливають на нього (величини навантаження, відхилення ПЯЕ від припустимих тощо) неможливо однозначно встановити причину його зміни.

Перевищення СКЗ номінального струму в усталеному режимі є діагностичною ознакою теплового процесу, оскільки визначає нагрівуючі втрати в обмотках, а миттєвого значення - для струмового захисту. Крім цього, застосувавши метод спектрально-струмового аналізу, можна виявити механічні дефекти, що розвиваються, заздалегідь, до виникнення аварії.

Вторинні діагностичні параметри (ПЯЕ, параметри процесу енергоспоживання, робочі, процесу енерговикористання) розраховуються за енергетичними моделями АД. Процедура діагностування містить операцію порівняння поточних значень діагностичних параметрів з їх еталонними значеннями, отриманими під час попереднього дослідження об'єкта.

Алгоритм самодіагностування виконується після ввімкнення системи і через визначені інтервали часу в процесі роботи, алгоритми струмового і теплового захисту – безперервно.

4.3 Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами

Для реалізації функціонального діагностування енергоефективності ЕМС з АД на ПЕОМ розроблено програмне забезпечення з трьох програм: “Еталонна модель АД”, “Діагностування параметрів АД”, “Визначення залишкового ресурсу АД” [29,71,75,123,132].

На основі моделі формування і збереження еталонів та методики розрахунків робочих параметрів АД за паспортними даними в середовищі DELPHI-2009 розроблено програму розрахунків параметрів еталонної моделі “Еталонна модель АД” [123]. На рис. 4.5 наведено фрагменти цієї програми - головний інтерфейс користувача з результатами розрахунку робочих і енергетичних параметрів для номінального режиму (), параметрів схеми заміщення (), а також вікна програми із залежностями енергетичних показників від завантаження ($\cos\varphi$ (), (), ()), графіками механічної та електромеханічних характеристик () АД типу 5AM280S10e з паспортними даними: $n_H = 590 \text{ об/хв}$,

Еталонна модель асинхронного двигуна

Файл Інструменти Допомога

Модель двигуна
5AM280M10e

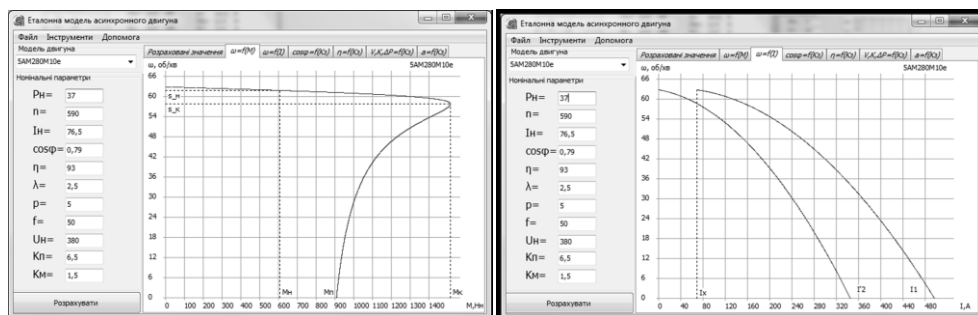
Розраховані значення $\omega=f(M)$ $\omega=f(I)$ $\cos\varphi=f(K_3)$ $\eta=f(K_3)$ $V_s, K_r, \Delta P=f(K_3)$ $a=f(K_3)$

Номинальні параметри

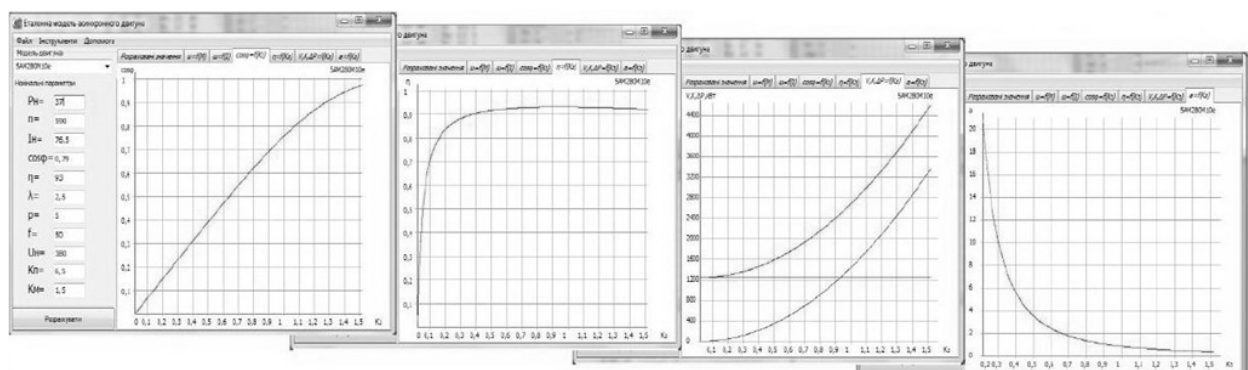
$P_n = 37$ кВт	$I_n = 497,25$ А
$n = 590$	$I'^2_n = 61,74$ А
$I_n = 76,5$	$I_\mu = 34,29$ А
$\cos\varphi = 0,79$	$X_\mu = 6,4$ Ом
$\eta = 93$	$R'^2 = 0,05$ Ом
$\lambda = 2,5$	$X_k = 0,73$ Ом
$p = 5$	$R_1 = 0,04$ Ом
$f = 50$	$\Delta P_n = 2,78$ кВт
$U_n = 380$	$V_n = 1,34$ кВт
$K_p = 6,5$	$\Delta P_{1n} = 0,18$ кВт
$K_M = 1,5$	$K = 1,26$ кВт
	$a = 0,83$ в.о.

Розрахувати

а



б



в

Рис. 4.5 Інтерфейс програми “Еталонна модель АД”:

а – головний інтерфейс користувача; б – вікна з графіками механічної та електромеханічних характеристик; в – вікна з залежностями енергетичних показників від завантаження

Вхідними даними для програми “Діагностування параметрів АД” є масиви миттєвих значень трифазних струмів і напруг, а також параметри двигуна для номінального режиму з моделі формування та збереження еталонів [132]. Результатом роботи програми є формування протоколу у вигляді текстового файлу з визначеними відповідно до діагностичної моделі параметрами двигуна (дод. Б1). Роботу програми можна представити як послідовність виконання чотирьох етапів (рис. 4.6).

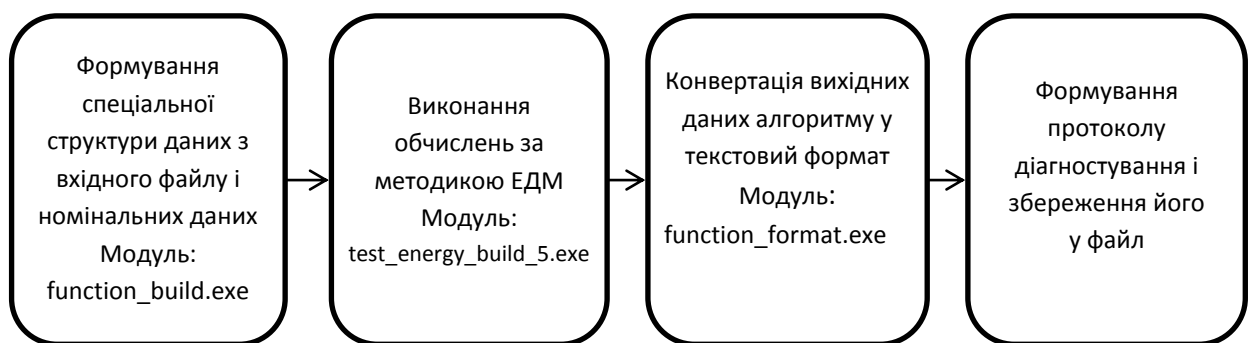


Рис. 4.6 Етапи роботи програми “Діагностування параметрів АД”

На рис. 4.7 зображено головний інтерфейс користувача програми “Діагностування параметрів АД” після виконання обчислень. Вхідний файл для програми зберігається у стандартному mat-форматі програмного середовища MATLAB і містить послідовності значень фазних струмів і напруг для трьох фаз за деякий період часу. Програма написана в середовищі Visual Studio 2010 мовою програмування Visual Basic Net. Додаткові модулі згенеровані за допомогою середовища MATLAB Simulink мовою програмування С.

На рис. 4.8, 4.9 наведено результати аналітичних досліджень процесу перетворення енергії ЕМС з насосною установкою системи водопостачання і АД типу 6А315LA4 потужністю 160 кВт. Робота установки моделювалася за допомогою розробленої програми функціонального діагностування відповідно до експериментально знятого під час енергоаудиту ГЕН в умовах неякісної напруги живлення.

Діагностування параметрів АД

Номинальні дані		Назва агрегату	Асинхронний двигун
P_n	160000	Файл даних	F:\Release_x64\AD_file.mat
n_n	1487	Вихідний файл	F:\Release_x64\AD_file.rtf
I_n	263,81		
$\cos(\varphi)$	0,9		
η	96,2		
λ	4,5		
p	2		
f_n	50		
U_n	400		
K_n	7,5		

Розрахувати

ПРОТОКОЛ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Дата проведення вимірювань: 24.05.2010 16:16:06

Назва агрегату: Асинхронний двигун

АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН

номінальна потужність на валу	160000 Вт
номінальна частота обертання ротора	1487 об/хв

Рис. 4.7 Інтерфейс користувача програми “Діагностування параметрів АД”

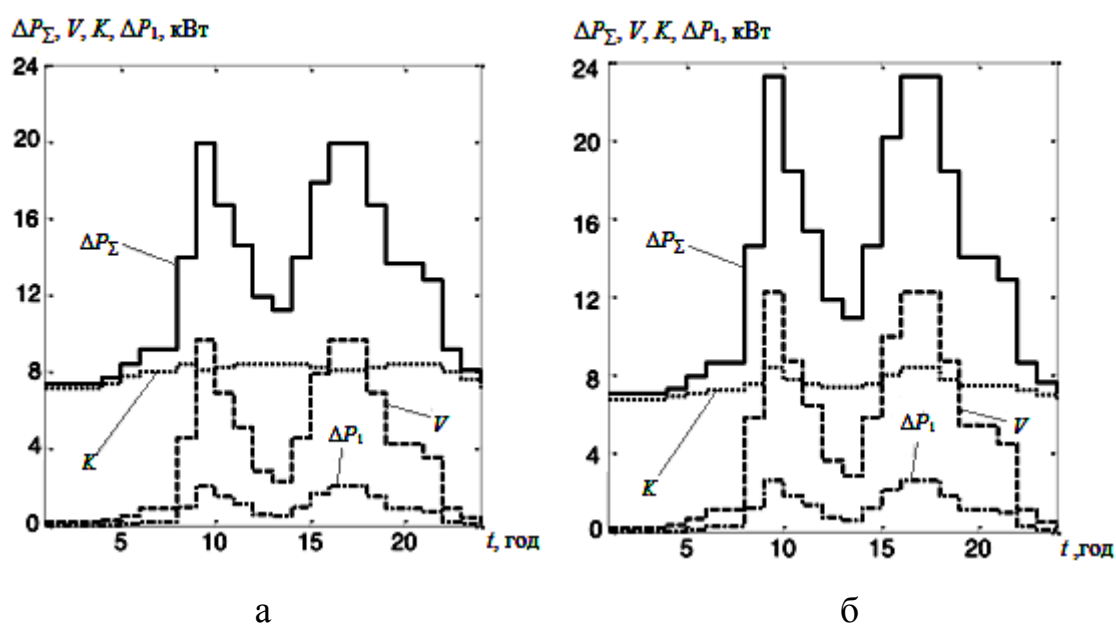
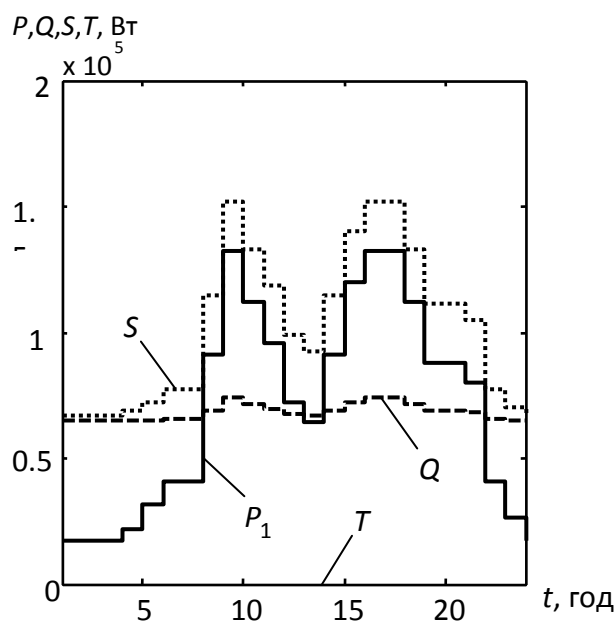
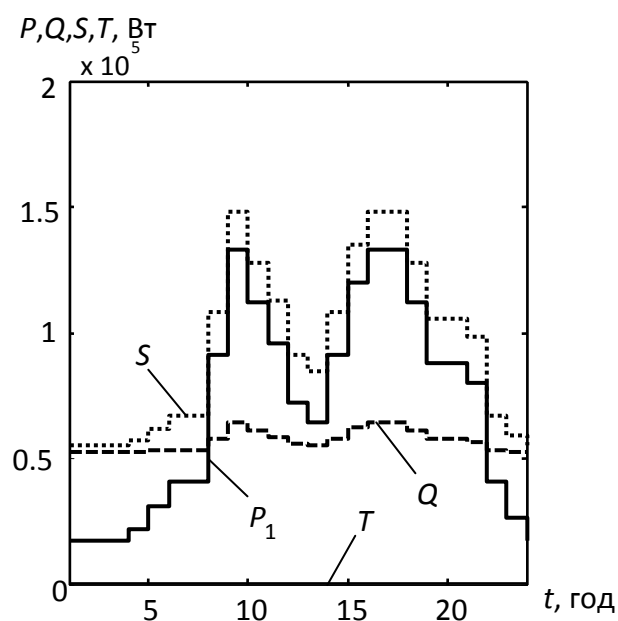


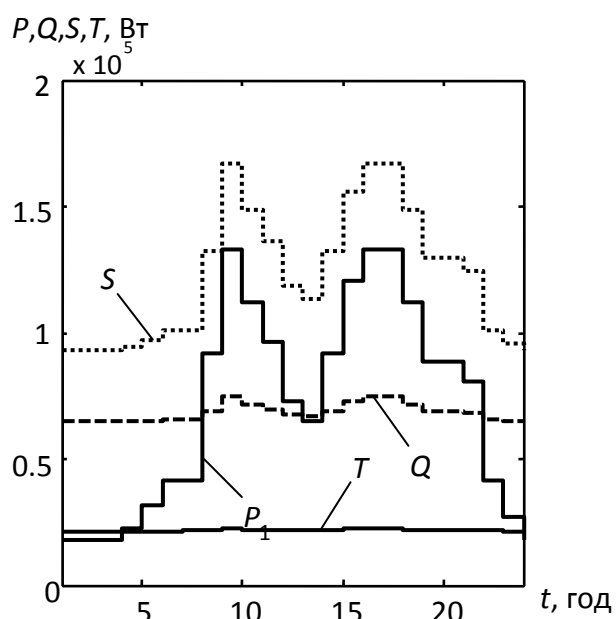
Рис. 4.8 Добові графіки втрат АД (повні, змінні, постійні та додані) в умовах зміни навантаження у випадку: а – відсутності відхилень ПЯЕ; б – впливу граничних значень ПЯЕ (відхилення, несиметрії та несинусоїдальності напруги)



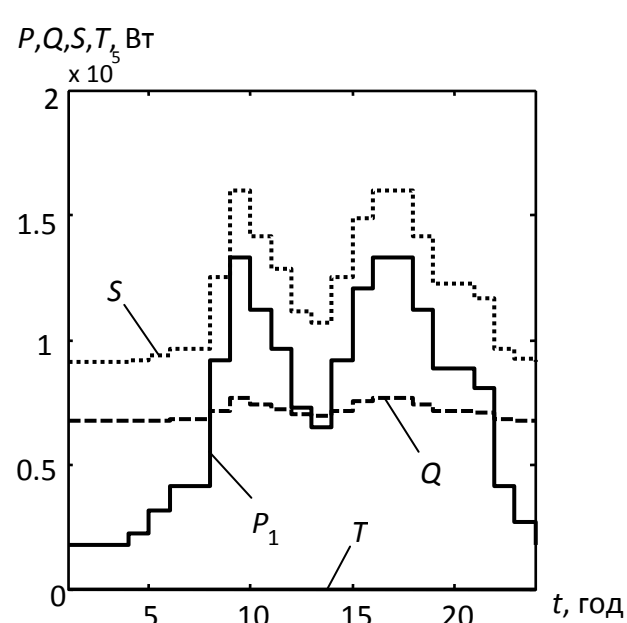
а



б



в



г

Рис. 4.9 Добові графіки споживаних з мережі потужностей (активної, реактивної, повної та потужності спотворення) при зміні навантаження у випадку: а - відсутності відхилень ПЯЕ; б - відхилення напруги від номінальної на 10%; в - впливу граничних показників несинусоїдальності; г - впливу граничних показників несиметрії

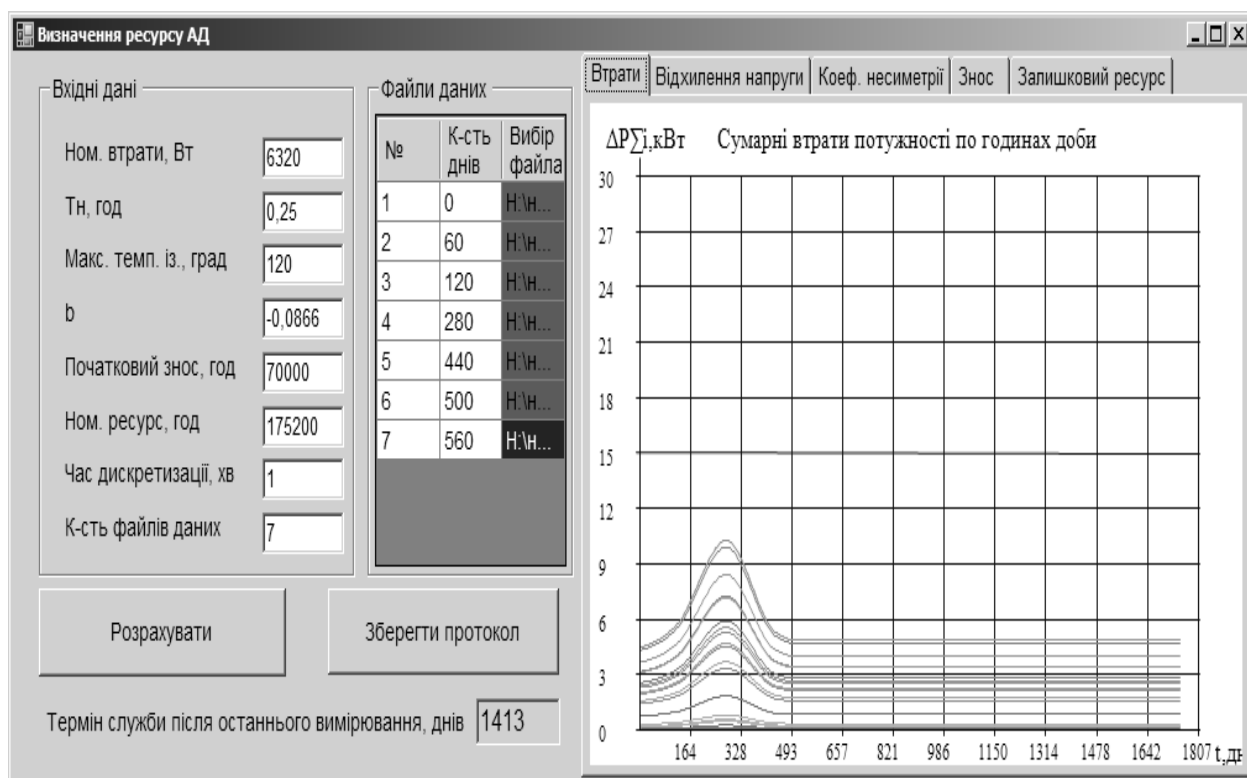
Вхідними даними програми “Визначення залишкового ресурсу АД” є значення повних втрат у двигуні, які отримуються з програми “Діагностування АД”, номінальних втрат – з програми “Еталонна модель АД”, сталої нагрівання двигуна, параметрів ізоляції (припустимої температури, коефіцієнта b), попередньої зношеності ізоляції за час експлуатації, номінального терміну служби.

Попередня зношеність ізоляції визначається за допомогою методу опору. Якщо відомий режим роботи, в якому працював АД до початку діагностування, то за допомогою програми можна визначити попередню зношеність ізоляції за час експлуатації.

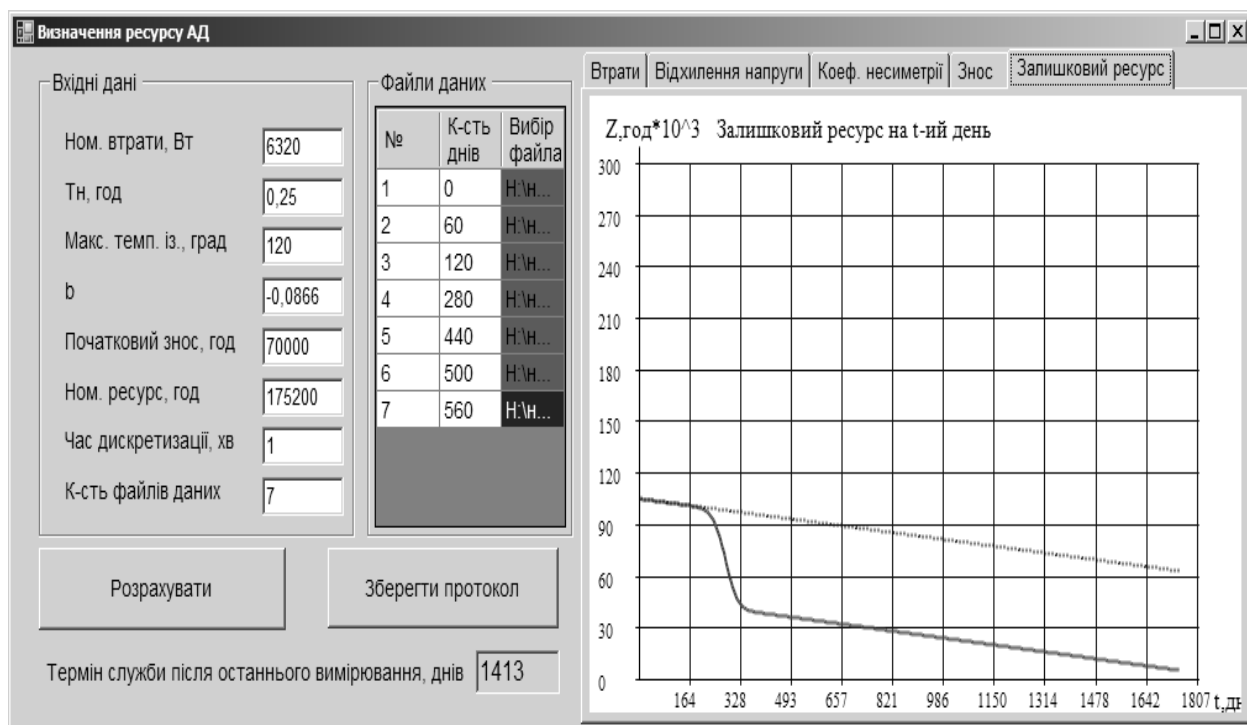
Програмне забезпечення “Визначення залишкового ресурсу АД” розраховує його залишковий ресурс у залежності від дії сукупності експлуатаційних факторів, формує протокол з графіками зміни зношеності та прогнозованого і номінального залишкових ресурсів у часі (дод. Б.2). Програмне забезпечення дозволяє визначати залишковий ресурс навіть у випадку, коли контроль параметрів здійснюється епізодично. За результатами n вимірювань, для апроксимації значень вхідних параметрів у періоди між вимірюваннями і прогнозування їх на майбутнє застосовано метод параболічної екстраполяції.

На рис. 4.10 зображено головний інтерфейс користувача програми “Визначення залишкового ресурсу АД” з результатами аналітичних досліджень залишкового ресурсу насосної установки з АД типу 6A315LA4 потужністю 160 кВт при збільшенні сумарних втрат в 1,5 рази внаслідок перевантаження.

Програма написана в середовищі Visual Studio 2010 з підтримкою Net Framework 2.0, код інтерфейсу – Visual Basic. Net, код розрахунку – мова MATLAB.



а



б

Рис. 4.10 Інтерфейс користувача програми “Визначення залишкового ресурсу АД”: а – вікно втрат; б – вікно залишкового ресурсу

4.4 Алгоритми теплового і струмового захисту асинхронних двигунів для засобів функціонального діагностування електромеханічних систем

Рекомендації, викладені в ПУЕ стосовно захисту АД, не враховують сучасних вимог щодо надійного захисту двигуна від перегрівання обмоток статора, зумовленого струмами зворотної послідовності, несиметрією та несинусоїдальністю напруги живлення, а також перевантажувальну характеристику діагностованого двигуна. Одним із перспективних видів захисту від перевантаження є застосування функціонального діагностування з використанням математичного моделювання теплового стану АД (рис. 4.11) [30,104].

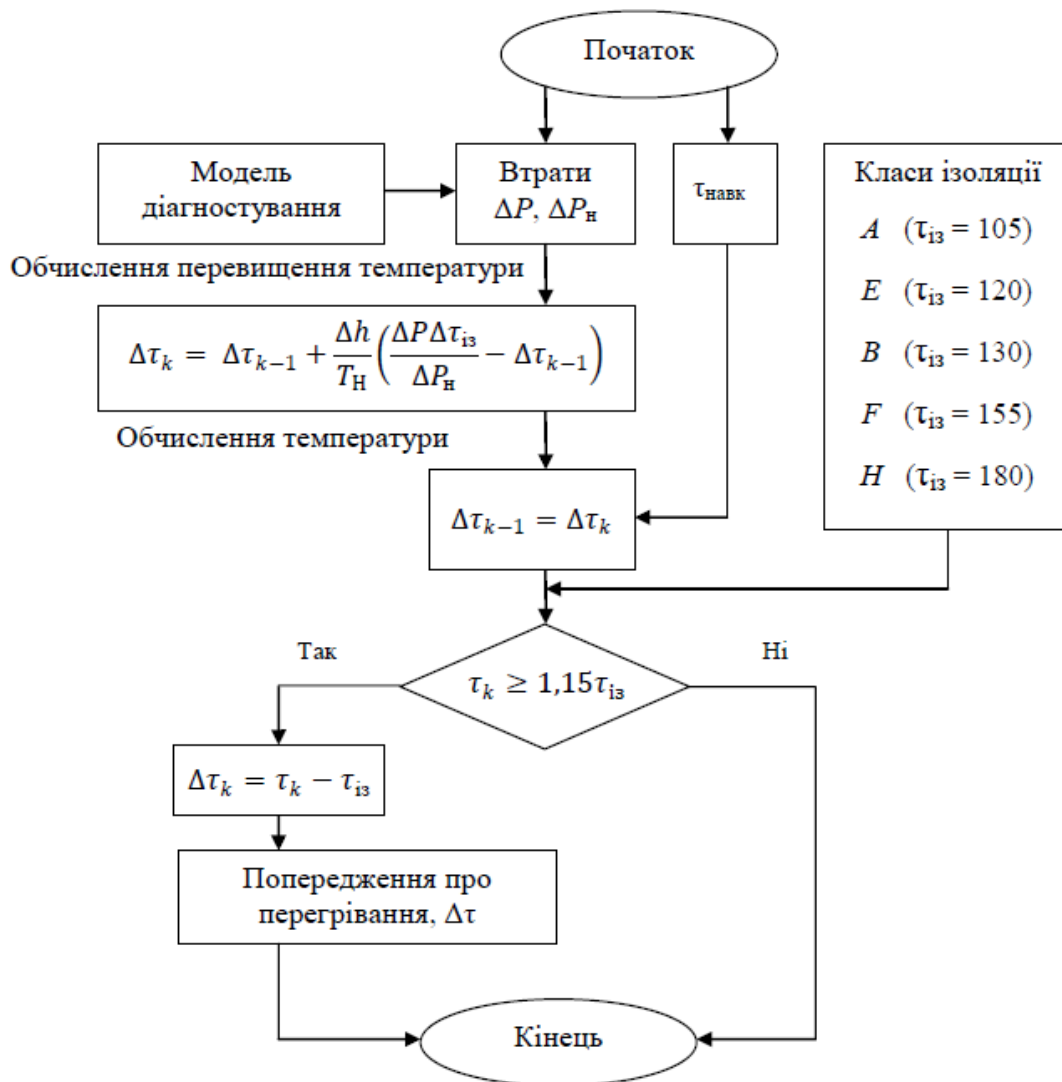


Рис. 4.11 Алгоритм роботи теплового захисту АД

Чим більша кратність струму перевантаження відносно номінального - тим менший припустимий час перевантаження

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{k_1^2 - 1}, \quad (4.1)$$

де t - початкове перевищення температури двигуна [141].

Спрощено формула (4.1) має вигляд

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{k_1^2},$$

де k_1 - початковий коефіцієнт кратності струму; k - коефіцієнт, який змінюється в межах 1–1,5 [120].

На рис. 4.12 зображена перевантажувальна характеристика АД з різними початковими режимами.

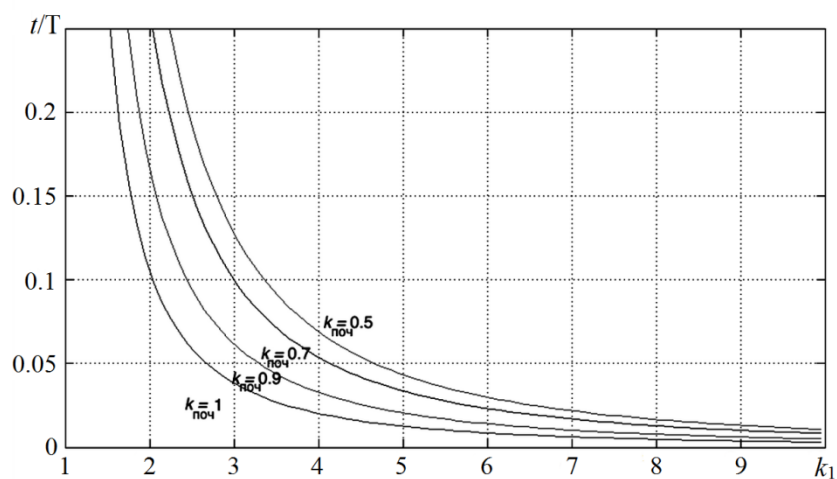


Рис. 4.12 Перевантажувальна характеристика АД з різними початковими режимами

В [103,142] наведено кілька варіантів часострумової характеристики захисту:

$$\text{---}, \quad (4.2)$$

$$\text{---}, \quad (4.3)$$

$$\text{---}, \quad (4.4)$$

де , , - сталі величини, які вибираються меншими

$$\text{---}, \quad (4.5)$$

де відповідає температурі АД при струмі перевантаження (1,15 – 1,5)

Взявши як вихідну точку за ГОСТ 183-74* ($t = 120\text{с}$,), з урахуванням коефіцієнта запасу можна знайти значення

-

$$\text{---}, \quad (4.6)$$

$$\text{---}, \quad (4.7)$$

$$\text{---}. \quad (4.8)$$

Для рівняння (4.5) приймаємо $= 25^\circ\text{C}$, а $= 165^\circ\text{C}$ для класу ізоляції В. Тоді

$$\text{---}. \quad (4.9)$$

Як видно з рис. 4.13, часострумові характеристики захисту за формулами (4.2), (4.3), (4.4) значною мірою відрізняються в початковій частині, за незначних струмів перевантаження, а характеристика 4 значно відрізняється

від інших для значень $k_I > 1,5$. Вирази (4.6) - (4.9) можуть використовуватися лише для загальної оцінки процесу нагрівання, оскільки базуються на одній точці (ГОСТ 183-74*).

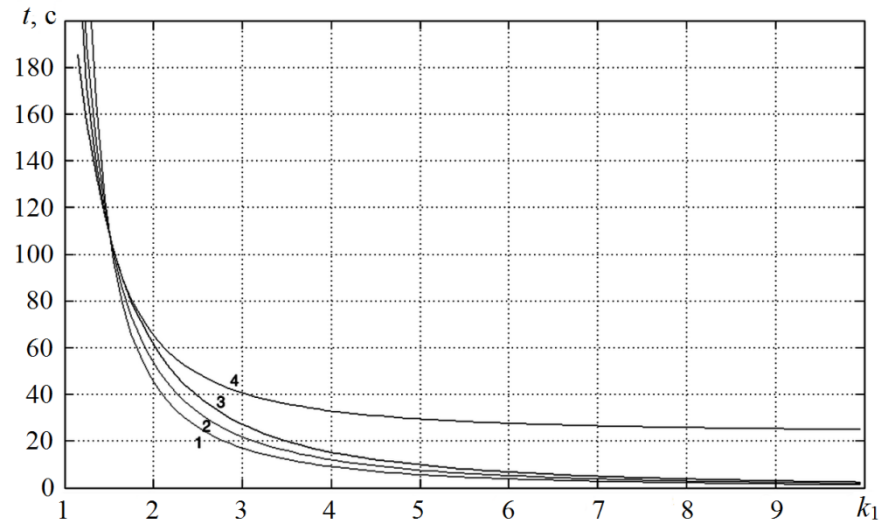


Рис. 4.13 Часоструміві характеристики спрацювання захисту:

1 – за формулою (4.8); 2 – за формулою (4.6); 3 – за формулою (4.7);
4 – за формулою (4.9)

В існуючих пристроях захисту перевантажувальна здатність АД (рис. 4.14) повною мірою не використовується, що є їх значним недоліком. Як часоструміву характеристику захисту пропонується використовувати перевантажувальну характеристику двигуна. Це дозволяє налагоджувати захист під параметри конкретного АД (рис. 4.15).

АД можуть отримувати теплове перевантаження струмами зворотної послідовності від фазних струмів нижчих від струмів спрацювання теплових реле існуючих пристроїв захисту. Наприклад, при «злипання фаз» або обриві фази зі сторони високої напруги у понижувального трансформатора зі схемою з'єднання «трикутник-зірка» із заземленою нейтраллю струм в одній із фаз в 2 рази перевищує струм у двох інших [141]. Абсолютні значення струмів прямої та зворотної послідовності дорівнюють одне одному, тобто $|I_1| = |I_2|$. Таким чином, захист АД за струмом повинен ураховувати струм зворотної послідовності.

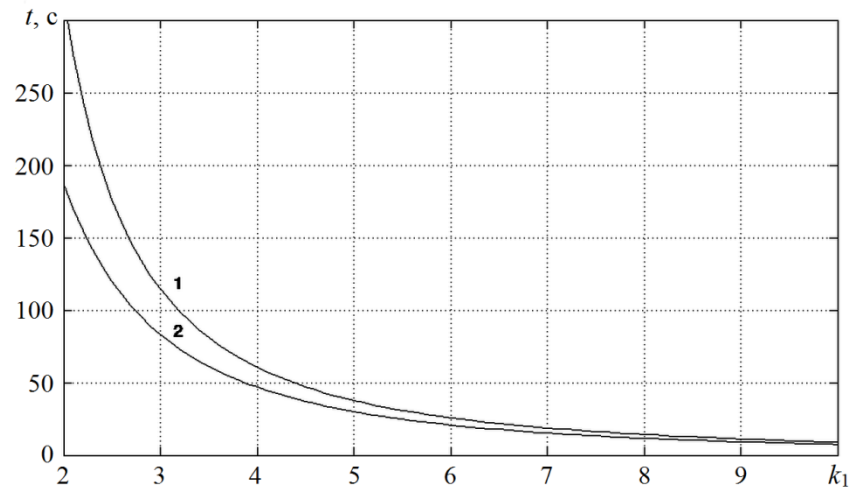


Рис. 4.14 Характеристики: 1 - перевантажувальна двигуна АД 4А280S2У3;
2 - часострумова захисту

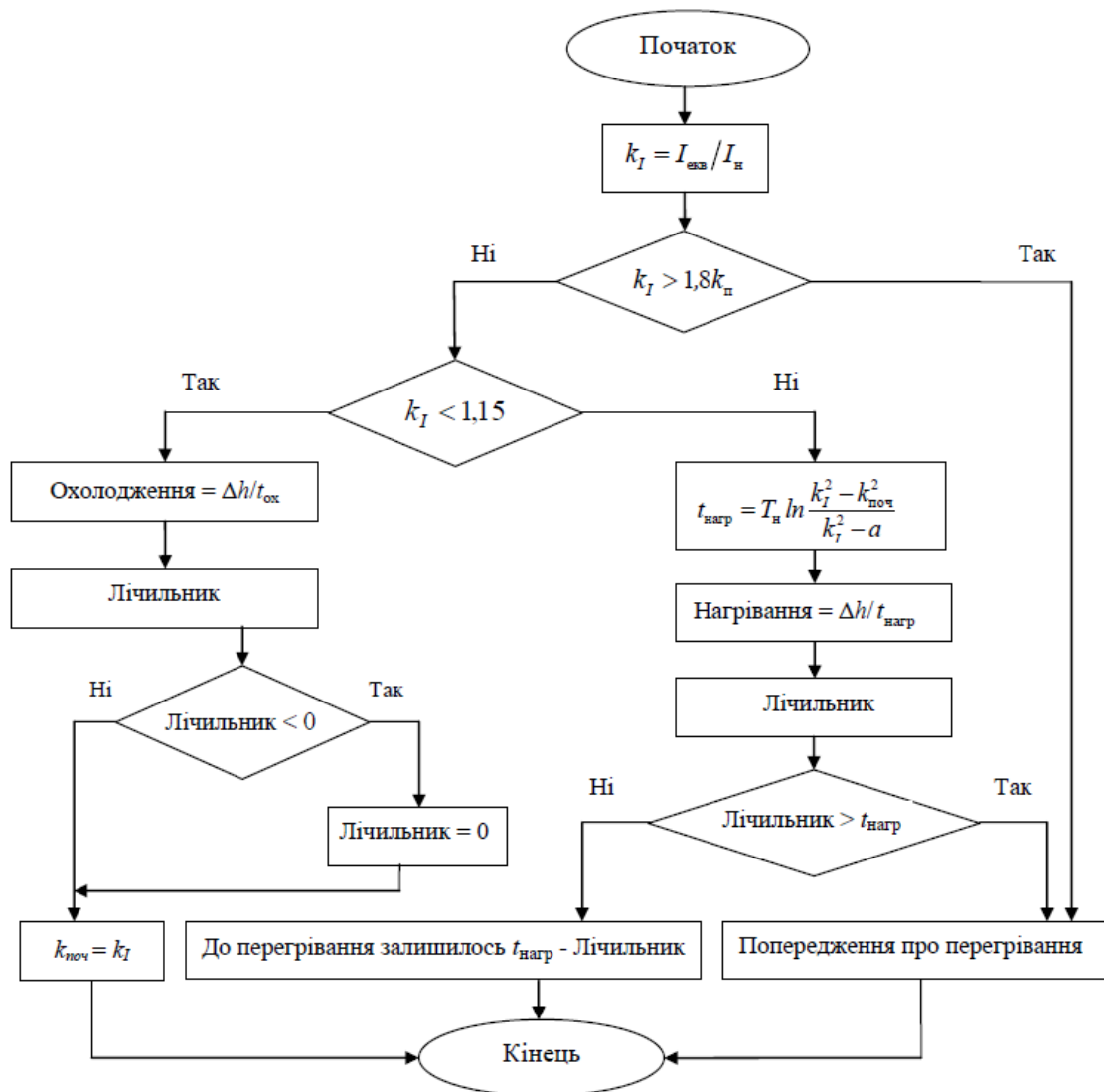


Рис. 4.15 Алгоритм роботи струмового захисту АД

Еквівалентний фазний струм з урахуванням струму зворотної послідовності

$$\underline{\underline{\quad\quad\quad}}, \quad (4.10)$$

де $\underline{\underline{\quad\quad\quad}}$ - діюче значення найбільшого фазного струму; k - ваговий коефіцієнт струму [101,102].

Для АД ваговий коефіцієнт струму

$$\underline{\underline{\quad\quad\quad}}.$$

Згідно ГОСТ 13109-97 дозволяється розраховувати напруги зворотної послідовності за спрощеною формулою $\underline{\underline{\quad\quad\quad}}$, де $\underline{\underline{\quad\quad\quad}}$,

- найбільше та найменше діючі значення з трьох міжфазних напруг i -го спостереження з урахуванням гармонічних складових напруг за коефіцієнту спотворень синусоїдальності кривих напруги, який не перевищує 5%. Похибка розрахунків у цьому разі не перевищує 8%.

Використовуючи співвідношення складових зворотної послідовності для струмів і напруг у переході від схеми з'єднання «трикутник» до схеми «зірка» [141], можна перетворити наближену формулу для напруги зворотної послідовності у формулу струму зворотної послідовності у фазах трипровідної мережі

$$(4.11)$$

де $\underline{\underline{\quad\quad\quad}}$ - найбільше та найменше з трьох діючих значень фазних струмів у лінії в i -ому спостереженні з урахуванням гармонічних складових цих струмів за коефіцієнту спотворень синусоїдальності кривих струму не більше 5%.

Таким чином, підставляючи (4.11) в (4.10), з урахуванням струму зворотної послідовності спрощено можна записати

$$\underline{\underline{\quad\quad\quad}}.$$

Мінімальний захист встановлюється на АД, які необхідно вимикати при пониженні напруги для запобігання самозапуску відповідальних двигунів, а також АД, самозапуск яких після відновлення напруги неприпустимий за умовами безпеки або особливостями технологічного процесу [120] Критична напруга

—
—

Напруга спрацьовування захисту приймається такою, що дорівнює , витримка часу на відімкнення 0,5–5 с для відповідальних двигунів, для інших АД - –

4.5 Мобільний програмно-апаратний комплекс для функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем

Розроблені моделі, методики та програми функціонального діагностування енергоефективності ЕМС експериментально перевірено в лабораторних умовах. Створений мобільний програмно-апаратний комплекс для функціонального діагностування енергоефективності ЕМС реалізовано на основі датчиків струму (гнучких струмовимірювальних кліщів Fluke i5sPQ3), напруги (щупів напруги VPS40), температури, комутаційного пристрою з АЦП типу m-DAQ, ПЕОМ та алгоритмів і програм “Еталонна модель АД”, “Діагностування параметрів АД”, “Визначення залишкового ресурсу АД” (рис. 4.16) [44,88,99]. Він може використовуватись як для проведення експериментальних досліджень із застосуванням лабораторного стенду, так і для роботи в режимі комп’ютерного експерименту.

Проведено два експерименти: виявлення несправностей обмоток статора і ротора АД та поступове навантаження до виходу двигуна з ладу.

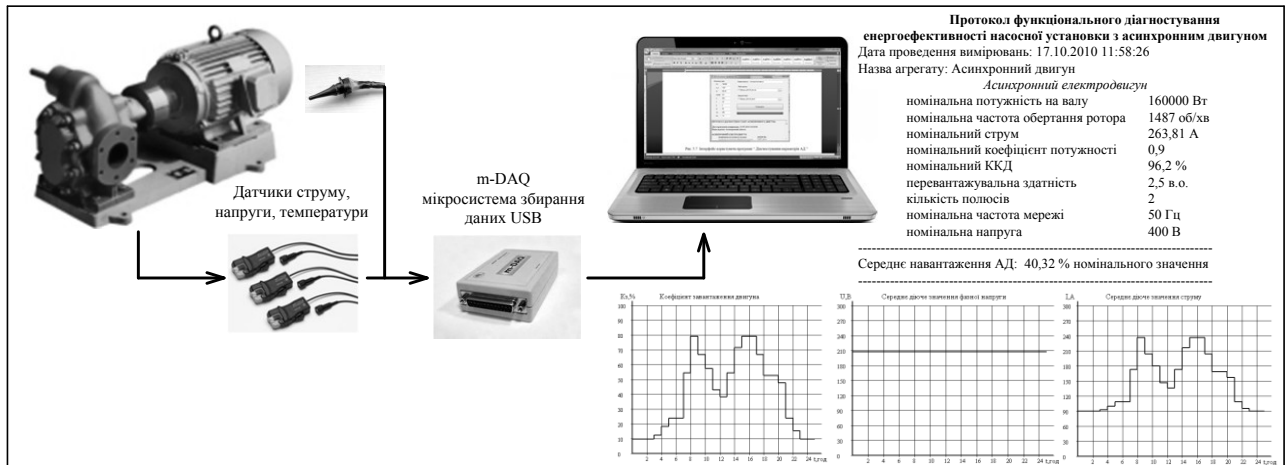
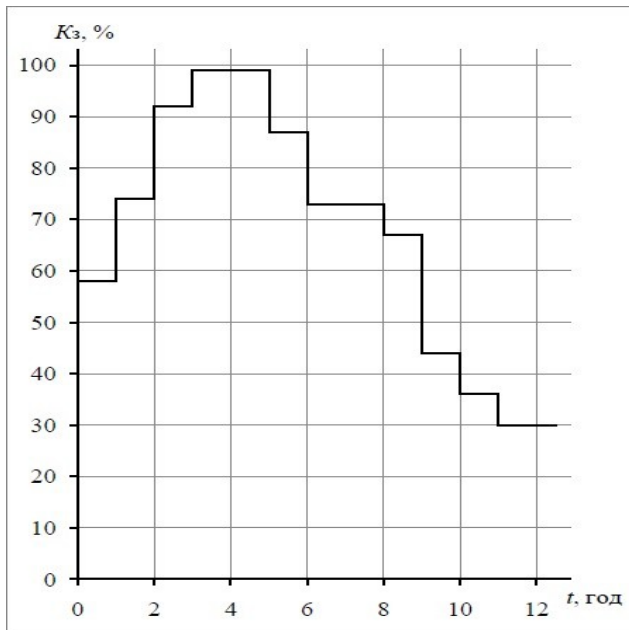


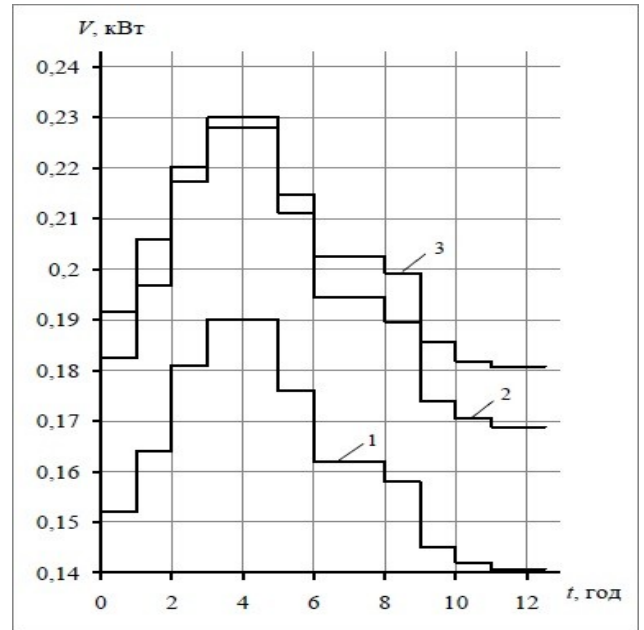
Рис. 4.16 Структурна схема мобільного програмно-апаратного комплексу для функціонального діагностування енергоефективності ЕМС з АД

Несправність у обмотці статора реалізована шляхом припаювання в лобовій частині однієї з фаз обмотки перемички з мідного дроту, яка зашунтувала декілька витків. Додатково введення несправності в ротор здійснювалось заміною справного ротора іншим, з трьома відірваними стрижнями. АД типу 4A80B4УЗ ($n_H=1500\text{об/хв}$, навантажувався за допомогою навантажувального пристрою «Тормоз ПТ-2,5М» в лабораторних умовах відповідно до ГЕН АД промислового насоса (рис. 4.17).

На першому етапі експерименту виявлено зменшення активного опору обмотки статора двигуна на 20% і збільшення втрат в обмотці в середньому на 25% протягом циклу роботи. Після введення додаткової несправності у ротор виявлено зменшення активного опору обмотки ротора на 10% і збільшення втрат у обмотці на 12%. Сумарні змінні втрати зросли на 21% (рис. 4.17, б). Отримані результати підтвердили наявність несправностей в обмотках статора і ротора двигуна.



а



б

Рис. 4.17 Графіки: а - ГЕН АД промислової насосної установки; б - змінних втрат у часі (1 – неушкодженого двигуна; 2 – ушкодженого двигуна, визначені згідно пунктів 6.2.3-6.2.5 ГОСТ 25941-83; 3 – ушкодженого двигуна, за допомогою комплексу діагностування)

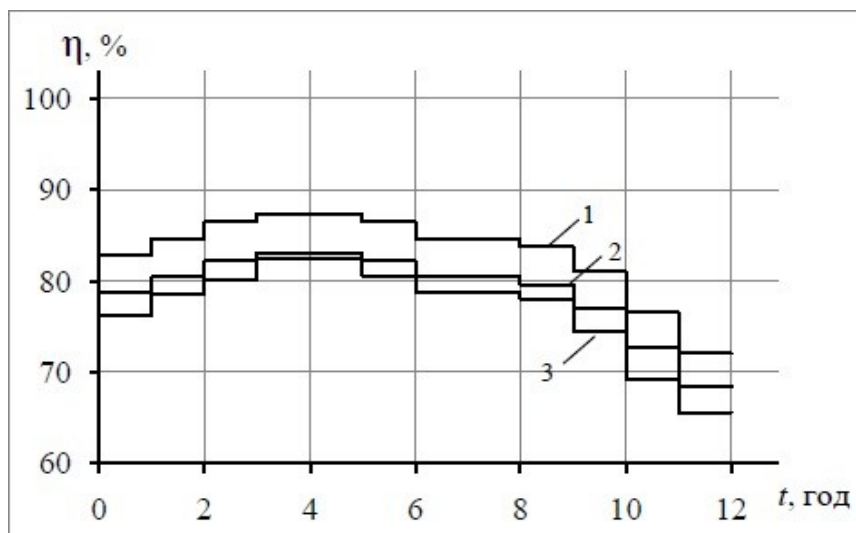


Рис. 4.18 Графіки зміни ККД у часі: 1 – неушкодженого двигуна; 2 – ушкодженого двигуна, визначені за методом тарованої допоміжної машини; 3 – ушкодженого двигуна, за допомогою комплексу діагностування

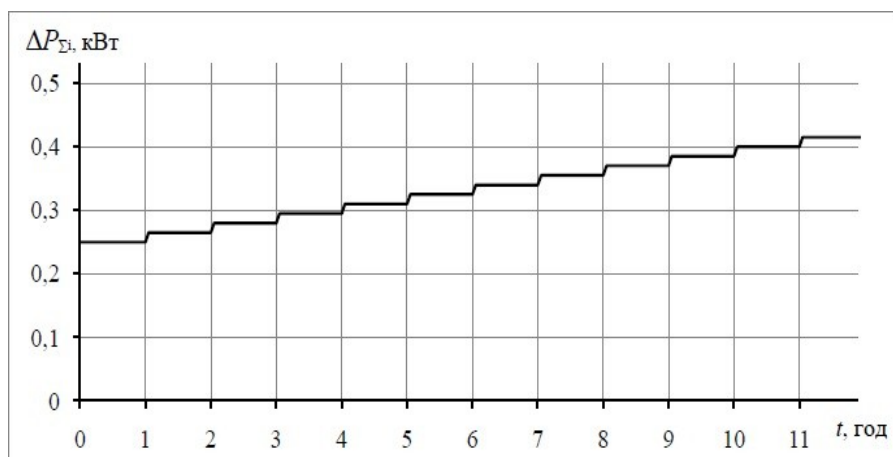
Для перевірки ККД його значення визначалось відповідно до ГОСТ 25941-83 «Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия» шляхом безпосереднього визначення методом тарованої допоміжної машини (4.18).

Як видно з рис. 4.17, 4.18, найменші величини похибки визначення змінних втрат і ККД знаходяться в області номінальних навантажень. Найбільше значення відносної похибки за втратами становить 7%, а ККД – 4,5%.

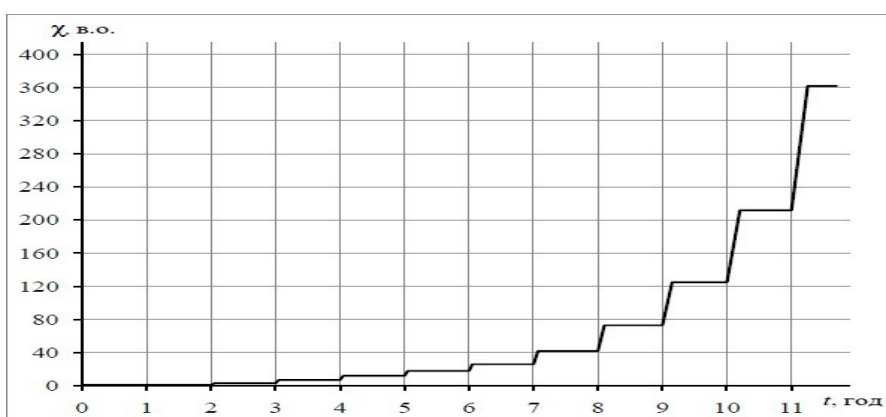
Для перевірки достовірності моделі та програми розрахунку залишкового ресурсу АД виконано експериментальне дослідження методом прискореного експерименту. Здійснено вимірювання параметрів (струмів, напруг і температури) АД типу 4A90LB8Y3 ($n_H=750\text{об/хв}$, , прогнозування залишкового ресурсу та його порівняння з експериментально встановленим. Дослідження здійснено в умовах послідовного збільшення навантаження до 150% з дискретністю приблизно 5% та витримування на кожному рівні навантаження протягом однієї години (рис. 4.19).

Результат прогнозування вказав на те, що АД повинен вийти з ладу в кінці 11 години роботи за даних умов експерименту. Фактично відмова двигуна відбулась у кінці 13 години. Відносна похибка прогнозування залишкового ресурсу за експериментом, обумовлена неточністю визначення початкового ресурсу та похибкою власне моделі старіння ізоляції, не перевищує 20%.

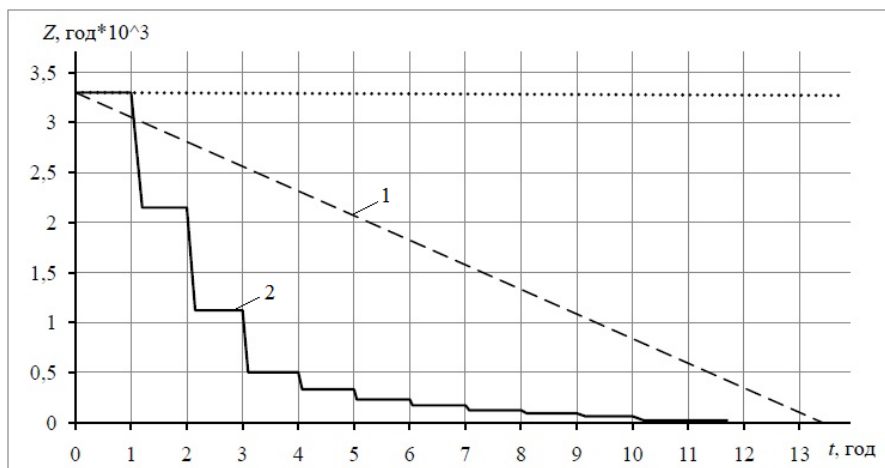
Експериментальна перевірка моделей, методик і програм на розробленому мобільному програмно-апаратному комплексі підтвердила високу точність визначення енергетичних показників ЕМС з АД, адекватність енергетичного підходу до визначення несправностей та достатню точність прогнозування залишкового ресурсу.



а



б



в

Рис. 4.19 Графіки зміни в часі: а – сумарних втрат потужності; б – зношування ізоляції; в – залишкового ресурсу (1 - експериментальне значення, 2 - прогнозоване)

За допомогою комп'ютерного моделювання виконано дослідження роботи насосної установки з АД відповідно до ГЕН, експериментально знятого під час енергоаудиту (4.20). Номінальні дані АД насосної установки:

$$n_H=1450\text{об/хв},$$

Строк служби - 20 000 год. Усталене відхилення напруги – 5%, коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності – 1%, зношення – 11240 год.

Результати моделювання – еталонні та фактичні характеристики насосної установки – наведено на рис. 4.21 – 4.25 та в табл. 4.1.

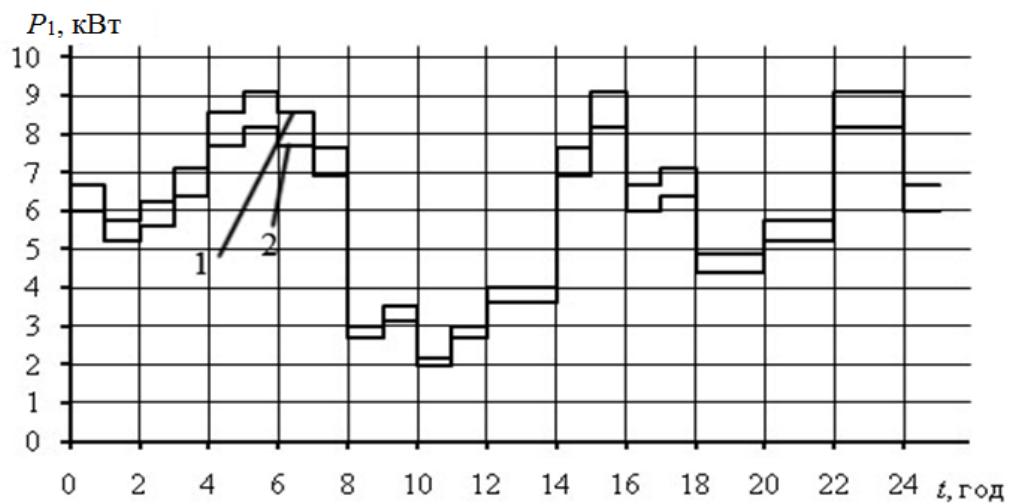


Рис. 4.20 ГЕН насосної установки: 1 – експериментально знятий; 2 – еталонний

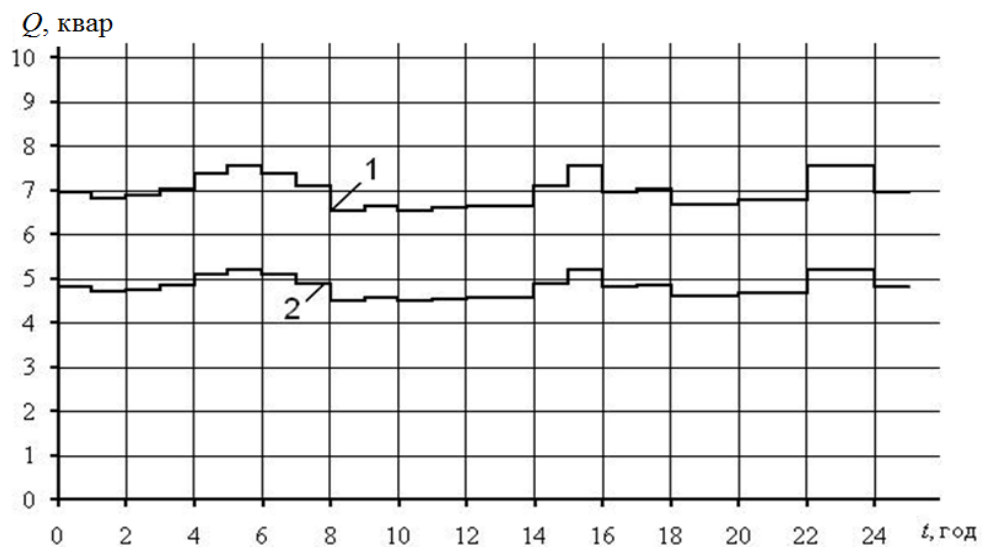


Рис. 4.21 Реактивна потужність насосної установки:

1 – фактична; 2 – еталонна

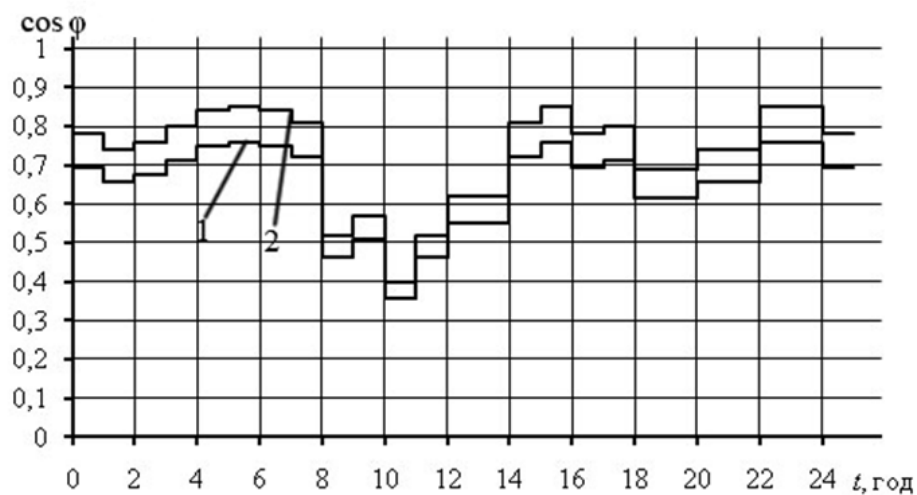


Рис. 4.22 Коефіцієнт потужності насосної установки:
1 – фактичний; 2 – еталонний

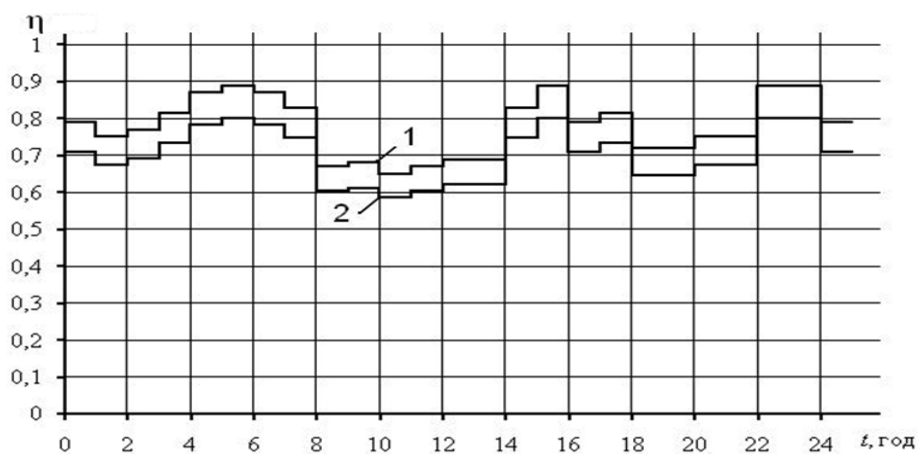


Рис. 4.23 ККД насосної установки: 1 – еталонний; 2 – фактичний

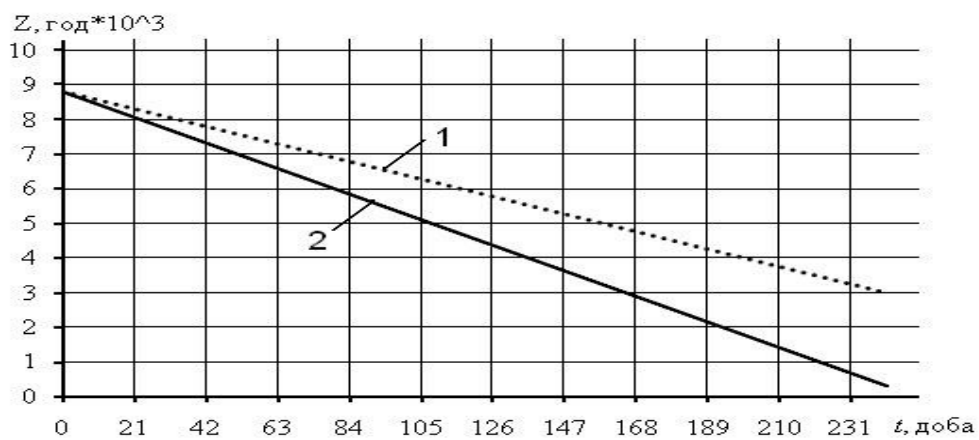


Рис. 4.24 Залишковий ресурс насосної установки:
1 – еталонний; 2 – фактичний

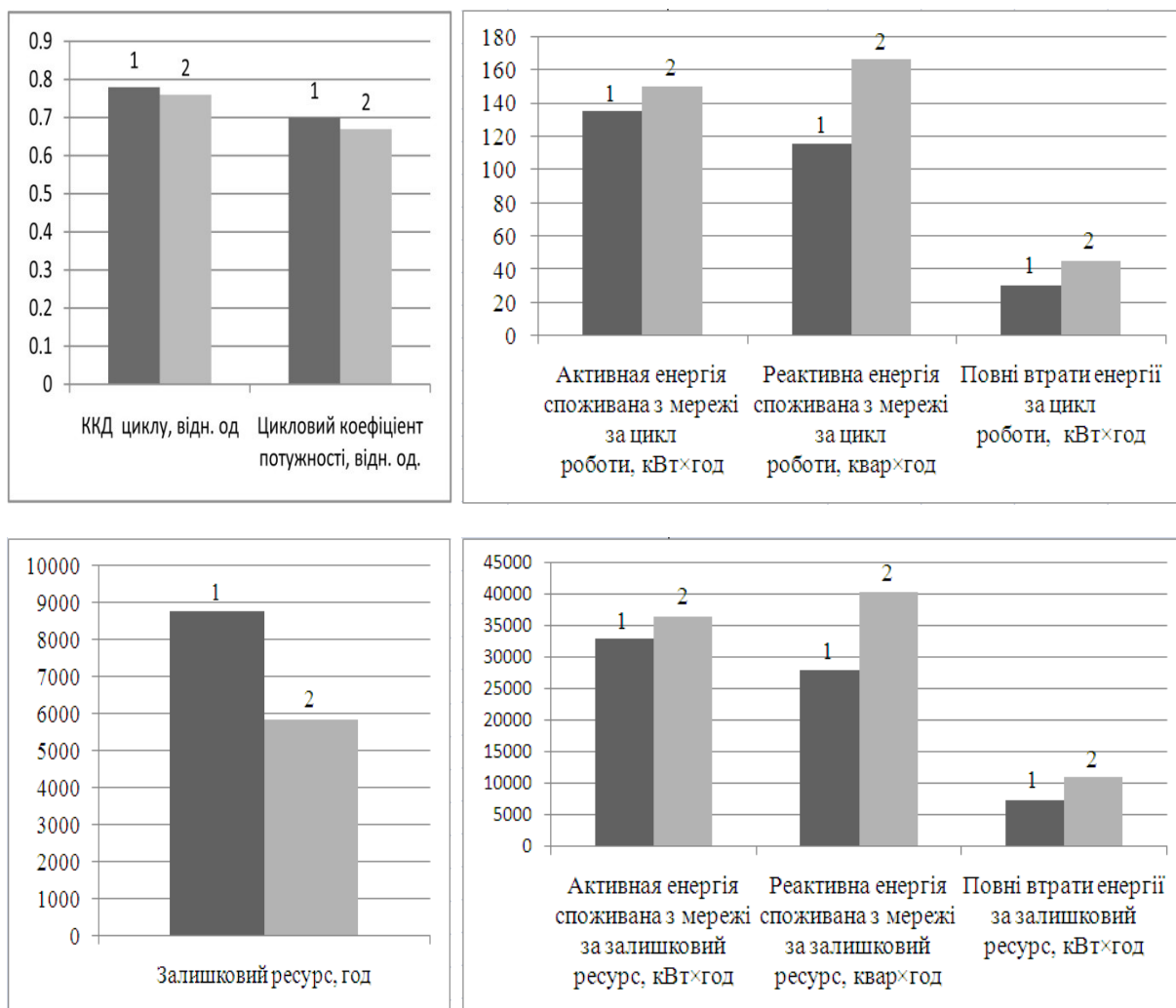


Рис. 4.25 Результати моделювання параметрів насосної установки:

1 – еталонні значення; 2 – фактичні

Для визначення вартості життєвого циклу необхідно оцінити спожиту електроенергію ЕМС протягом залишкового ресурсу

— —
— —

Таблиця 4.1

Результати моделювання параметрів насосної установки

Параметр	Еталонні значення	Фактичні значення
ККД циклу, відн. од	0,78	0,7
Цикловий коефіцієнт потужності, відн. од.	0,76	0,67
Залишковий ресурс, год	8760	5840
Активна енергія, що споживається з мережі за цикл роботи, кВт·год	135	150
Реактивна енергія, що споживається з мережі за цикл роботи, квар·год	115	166
Повні втрати енергії за цикл роботи, кВт·год	30	45
Активна енергія споживана з мережі за залишковий ресурс, кВт·год	32940	36600
Реактивна енергія спожита з мережі за залишковий ресурс, квар·год	28060	40504
Повні втрати енергії за залишковий ресурс, кВт·год	7320	10980

У таких умовах роботи (рис. 4.24) залишковий ресурс АД ЕМС становить 5840 год, а для роботи в номінальному режимі – 8760 год. Відносне зношування становить 1,5, що свідчить про передаварійний режим роботи АД ЕМС.

Як видно з рис 4.25, застосування функціонального діагностування енергоефективності ЕМС з АД дозволить знизити споживання активної енергії на 10%, реактивної – на 30%, підвищити в 1,5 рази залишковий ресурс до паспортного його значення, ККД – на 8%, коефіцієнт потужності – на 9%, знизити втрати на 33%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Bulletin of industrial energy efficiency and energy management standarts [“Vienna Energy Efficiency and Climate Meetings”], (Вена, Австрія, 19-22 березня 2007 р.) / United Nations Industrial Development Organization. - Vienna, Austria, 2007. – 150 с.
2. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник / О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
3. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсозбережение: учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
4. Лісовський В.С. Автоматизація виробничих процесів у гірничій промисловості: Навч. Посіб. Для проф.-техн. Навч. Закл. / В.С. Лісовський, О.М. Закладний, М.Г. Борисюк та ін. – К.: Факт, 2001. – 164 с.
5. Виноградов С.Б. Оценка работоспособности электроприводов насосных станций горно-обогатительных комбинатов / С.Б. Виноградов, Имад Бардавил // Сб. статей «Проблемы создания новых машин и технологий». –1998. - №.2. - С. 125-128.
6. Вовк О.Ю. Метод періодичного діагностування асинхронних двигунів/ О.Ю. Вовк, Л.М. Безменнікова, С.О. Квітка // Праці ТДАТУ. – 2010. - № 10, Т4. - С. 39-46.
7. Котеленец Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов по спец. “Электромеханика” / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
8. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М.М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.

9. Прокопенко В.В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями: Навчальний посібник. / В.В. Прокопенко, О.М. Закладний, П.В. Кульбачний. – К.: Освіта України, 2009. – 438 с.
10. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография / [А.П. Черный, А.И. Гладырь, Ю.Г. Осадчук и др.]. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
11. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З.И. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Asadema, 2004. - 256с.
12. Энергосбережение. Системы электропривода. Методы анализа и выбора: ДСТУ 3886-99. – [Чинний від 1999-06-18]. – К.: Госстандарт України, 2000. – 55 с. – (Національний стандарт України).
13. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудувных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. - 360 с.
14. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України. / [Праховник А.В., Дешко В.І., Закладний О.М. та ін.]. – Луганськ: вид-во "Місячне сяйво", 2010. - 696 с.
15. Энергоефективність та відновлювальні джерела енергії / [За заг. ред. А. К. Шидловського]. — К.: Українські енциклопедичні знання, 2005. –512 с.
16. Соркин М.А. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы [Електронний ресурс] / М.А. Соркин // Новости электротехники. - 2005. - №2(32). – Режим доступу до журн.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/12.php>.
17. Закладний О.М. Застосування новітніх силових електронних компонентів у регульованому електроприводі/ О.М. Закладний, О.О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2006. - №.2. - С. 47-53.
18. Закладний О.М. Сучасні методи регулювання якості електроенергії / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. - 2007. - №2. - С. 25-30.

19. Праховник А.В. Контроль та аналіз в реальному часі режимів енерговикористання промислових електроприводів / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». - 2007. С. 151-155.

20. Праховник А.В. Функціональне діагностування енергетичної ефективності асинхронного електропривода промислових установок і механізмів протягом життєвого циклу / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - 2010. - № 28. - С. 495-497.

21. Закладний О.М. Універсальний діагностувальний комплекс для прискорених випробувань електродвигунів / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. - 2007. - №4. - С. 35-39.

22. Закладний О.М. Методика прискореного діагностування електродвигунів / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. - 2007. - №2. - С. 47-53.

23. Закладний О.М. Оцінка енергетичної та економічної ефективності застосування регульованого електропривода в насосних установках / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Тірництво»: Збірник наукових праць. - 2008. - №16. - С. 90-97.

24. Каргапольцев В.П. Энергосбережение с применением защитного мониторинга электродвигателей / В.П. Каргапольцев, И.Я. Симахин // Контроль. Диагностика №8, 2007. С. 46-47.

25. Игнатьев Е.Б. Оценка состояния электрооборудования на основе программного комплекса «Диагностика+» в режиме ON-LINE / Е.Б. Игнатьев, Е.Ю. Комков, Г.В. Попов // VIII Симпозиум «Электротехника 2010», доклад 4.13, 2010.

26. <http://www.donix-ua.com/>

27. Уварова В.А. Системы мониторинга технологических и производственных процессов промышленных предприятий / В.А. Уварова, Хлыст С.В., Роженко Р.М. и др. // «Измерительная техника» №5, 2007. С. 59-61.

28. Закладний О.О. Методика розрахунків робочих параметрів асинхронного електропривода за паспортними даними / О.О. Закладний, О.М. Закладний, І.В. Притискач // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. - № 4/2010 (63), ч.3. - С. 119-126.

29. Закладной А.Н. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей / А.Н. Закладной, О.А. Закладной // Энергетика та електрифікація. - 2010. - №4. - С.63-67.

30. Закладний О.М. Захист як складник системи функціонального діагностування асинхронних електродвигунів / О.М. Закладний, Т.В. Гребенюк, О.О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. - 2010. - №4. - С. 36-41.

31. Ермолаев С.А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве: Учебник / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев. – К.: Фирма “Инкос”, 2005. – 670 с.

32. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией [Электронный ресурс] / [Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов, В.Б. Траппер] // Гірнична електромеханіка та автоматика. Збірник наукових праць. - 2008. - №80. – Режим доступу http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Geta/2008_80/11.pdf.

33. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – [3-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

34. Хорольский В.Я. Эксплуатация электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / В.Я. Хорольский. – Ставрополь, 1996. - 320с.

35. Закладний О.М. Електропривод: навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. – К.: Видавництво «Освіта України», 2009. – 316 с.
36. Праховник А.В. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2011. №1. С. 66-72.
37. Муравлева О.О. Особенности проектирования асинхронных двигателей в современных условиях / О.О. Муравлева, П.В. Тютёва // Проблемы энергетики. – 2008. - №7. – С.173-183.
38. Пахомов А.И. Диагностика асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве / А.И. Пахомов. – Краснодар, 2008. – 241 с.
39. Хомутов С.О. Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов / С.О. Хомутов, Е.В. Кобозев, П.И. Семичевский / Ползуновский вестник. – 2009. - №1-2. - С. 220-229.
40. Воробьев В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
41. Раннее диагностирование электромеханических систем / [Седуш В.Я., Кравченко В.М., Борисенко В.Ф., Сидоров В.А.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2009. - № 19. – С. 152-156.
42. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. / Д.И. Родькин. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
43. Луговой А.В. Итоги научно-производственного семинара «Проблемы энергосбережения в промышленности» / А.В. Луговой // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды Кременчугского государственного политехнического института. – 1998. - №2. - С. 3-8.
44. Закладний О.М., Закладний О.О. Мобільний програмно-апаратний комплекс для функціонального діагностування енергоефективності

електромеханічних систем / О.М. Закладний, О.О. Закладний, В.О. Броницький // Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» – СевНТУ 2012. С. 10-12.

45. Закладной А.Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями: Монография / А.Н. Закладной, О.А. Закладной – К.: Издательство «Либра», 2012. – 185 с.

46. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / - М: Энергия, 1980. – 928 с.

47. Макаричев Ю.А. Синхронные машины: учеб.пособ. / Ю.А. Макаричев, В.Н. Овсянников. – Самара. Самар.гос.техн.ун-т, 2010. - 156с.: ил.

48. Гадай А.В. Дослідження математичної моделі синхронного двигуна при несинусоїдній напрузі живлення /- Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2007, № 2. – 56-60 с.

49. Аракелян В.Г. Цели, понятия и общие принципы дигностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования / В.Г. Аракелян // Электротехника. - 2002. - №5. - С.23-27.

50. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. / В.В. Овчаров. – К.: Изд-во УСХА, 1990. -110 с.

51. Ширман А. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Ширман, А. Соловьев. – М.: 1996. - 252 с.

52. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999.- 344 с.

53. Костюков В.Н. Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия / В.Н. Костюков, А.П. Науменко // Контроль. Диагностика. – 2007. - №3.- С. 50-59 с.

54. Браташ О.В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей. / О.В. Браташ, А.П. Калинов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2010. – № 2/(10). – С. 41-47.

55. Хомутов С.О. Ситуационное планирование ремонтов электродвигателей на основе их электромагнитной диагностики / С.О. Хомутов, В.А. Рыбаков, В.Г. Тонких. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. -230 с.

56. Кузеев И.Р. Электромагнитная диагностика оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. / И.Р. Кузеев, М.Г. Баширов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 294 с.

57. Баширов М.Г. Оценка технического состояния и прогнозирование ресурса насосно-компрессорного оборудования по искажению спектра электромагнитного поля двигателя электропривода / М.Г. Баширов // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сборник статей. ч.1. - 2003. - №5 (25). – С. 420 – 423.

58. Тонких В. Г. Определение надежности обмотки статора асинхронного двигателя методом анализа его внешнего электромагнитного поля / В.Г. Тонких, С.О. Хомутов // Автоматизированная подготовка машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы Международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2005. – С. 243.

59. Веденев В.Н. Оценка технического состояния электрических двигателей на основе системного анализа характеристик их магнитного поля / В.Н. Веденев, В.Г. Тонких, С.О. Хомутов // Измерение, контроль, информатизация: материалы седьмой Международной НТК. – Барнаул: АлтГТУ. - 2006. – С. 255.

60. Гашимов М.А. Логические методы диагностики технического состояния электрических машин / М.А. Гашимов // Электричество. - 1999. - № 7. - С.20-26.

61. Кравченко В.М. Определение технического состояния электромеханических систем [Электронный ресурс] / В.М. Кравченко, В.А. Сидоров // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2009. - №28. – Режим доступа до журн.: http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/SNTDGTU/2008_28/S46.pdf.

62. Шетат Б. Использование искусственных нейронных сетей для диагностики асинхронного электропривода в режиме реального времени / Б. Шетат, Дж. Ходжа // Электротехника. – 2003. - №12. - С.16-20.

63. Кучерук В.Ю. Елементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів. Монографія. / В.Ю. Кучерук – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003 – 195 с.

64. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 384 с.

65. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб. для вузов / О.Д. Гольдберг. – [2-е изд.]. – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.

66. Коварский Е.М. Испытание электрических машин / Е.М. Коварский, Ю.И. Янко. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

67. Гольдберг О.Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг, И.М. Абдулаев, А.Н. Абиев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. - 158 с.

68. Результаты диагностики электродвигателей в эксплуатации для обоснования ремонта по состоянию / [Ное Д., Гвидо М., Аксенов Ю.П., Ярошенко И.В.] // Электро. – 2008. - №3. – С. 30-39.

69. Слоним Н.М. Испытания асинхронных двигателей при ремонте / Н.М. Слоним. – М.: Энергия, 1980. - 88 с.

70. Закладной О.М. Вплив якості напруги живлення на електропривода з синхронними двигунами / О.М. Закладной, О.О. Закладной, Т.Ю. Оборонов // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський

політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2012, - Вип. 21. С. 121-128.

71. Закладний О.О. Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами / О.О. Закладний, О.М. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2011. №2. С. 102-108.

72. Парте Р.Р. О способе вынутаго ротора/ Р.Р. Парте // Электричество.- 1961.- №6. - С.88.

73. Новиков Ю.Д. Экспериментальное определение индуктивностей рассеяния асинхронных двигателей / Ю.Д. Новиков, З. Гентковски, Ю.В. Бабин // Электротехника. – 1982. - №3.

74. Здор И.Е. Анализ методов диагностики асинхронных короткозамкнутых двигателей / И.Е. Здор, В.А. Мосьпан, Д.И. Родькин // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды Кременчугского государственного политехнического института. – 1998. - № 2. - С. 99-104.

75. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 36471. Наукова стаття «Методика та алгоритми діагностування електродвигунів» / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов; дата реєстрації 10.01.2011.

76. Энергетичний менеджмент: Навчальний посібник/ [Прахівник А.В., Розен В.П., Разумовський О.В., та інші.] – К.: Київ. Нот.-ф-ка, 1999. – 184 с.

77. Чермалых В.М. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок / В.М. Чермалых, Д.И. Родькин, В.В. Каневский. – М.: Недра, 1976. – 398с.

78. Фаддеев Б.В. Конвейерный транспорт на рудных карьерах / Б.В. Фаддеев. – М.: Недра, 1972. – 161с.

79. Шахмейстер Л.Г. Подземные конвейерные установки / Л.Г. Шахмейстер, Г.И. Солод. – М.: Недра, 1976. – 432с.

80. Богопольский Б.Х. Автоматизация шахтных вентиляторных установок / Б.Х. Богопольский, М.А. Левин и др. – М.: Недра, 1976. – 320с.

81. Луговой А.В., Родькін Д.Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин // ЕЛЕКТРОінформ. – 2001. – №1. – С.14-16.
82. Чорний О.П., Курбанова І.Г. Компьютеризовані комплекси для діагностики машин // ЕЛЕКТРОінформ. – 2004. – №1. – С.19-22
83. <http://www.icpe.ro>
84. <http://www.dr-staiger-mohilo.de>
85. <http://www.aviaok.com>
86. <http://www.zaonipo.perm.ru>
87. <http://www.markos.ukrbiz.net/production/device5.htm>
88. Закладний О.М. Технічні засоби функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем / О.М. Закладний, О.О. Закладний, В.М. Пермяков // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2012. №1. С. 47-54.
89. Кокорин С.А. Системы измерения качества электроэнергии на базе промышленно выпускаемых средств автоматизации / С.А. Кокорин, Е.Е. Ней, В.К. Новиков // «Электротехника» №10/03, 2003. С. 44-47.
90. Бешта Ю.В., Куваев С.М., Аль-Батайнех. «Определение потерь в асинхронном двигателе после ремонта» - Труды международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода», 16-21 сентября 1996. Харьков, Основа, 1996.
91. Бешта А.С., Желдак Т.А. Определение потерь в стали асинхронного двигателя по методике холостого хода // Сб. Статей «Проблемы создания новых машин и технологий», в.1. – Кременчуг, 1998.
92. Овчаров С.В. Поліпшення роботи асинхронних електродвигунів поточних технологічних ліній в аномальних режимах / С.В. Овчаров // Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.6.– 2002.– С.7 –11.
93. Соловьев А.Л. Защита асинхронных электрических двигателей напряжением 0,4 кВ. Учебное пособие / А.Л. Соловьев. – СПб.: ПЭИПК, 2007. – 72 с.

94. Беркович М.А. Основы техники релейной защиты / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов, - [6-е изд.]. – М.: Энергоиздат, 1984. – 376 с.
95. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты / А.М. Мусин. – М.: Колос, 1979. – 112 с.
96. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов. / В.А. Андреев . – [4-е изд.]. – М.: Выс. шк., 2006. – 639 с.
97. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – [2-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
98. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
99. Закладний О.М. Засоби функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем / О.М. Закладний, О.О. Закладний, В.М. Чермалых // Науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, 2012 – Вип.3/2012 (19) – 628-631 с.
100. Байтер И.И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд / И.И. Байтер. – [2-е изд.]. – М.: Энергия, 1980. – 104с.
101. Подстанция. Трансформатор. Двигатель. Сборные шины. Защита и контроль : каталог Schneider Electric. Серия Sepam. – 2001. – 74 с.
102. Сушко В. Защита низковольтных электродвигателей совершенных устройств [Электронный ресурс] / В. Сушко // Новости электротехники. - 2005. - №5(35). – Режим доступа до журн.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/35/11.php>.
103. Коваленский И.В. Релейная защита электродвигателей высокого напряжения / И.В. Коваленский. - Л.: Энергия, 1964. – 81 с.
104. Закладний О.О. Захист як одне із завдань системи моніторингу енергетичного стану асинхронного електропривода // Вісник Кременчуцького

державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 2010. - № 4/2010 (63), ч. 2. - С. 135-138.

105. Сивокобыленко В.Ф. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – №. 3(56)., ч.2. – С. 74-78.

106. Синдеев И.М. К вопросу о синтезе логических схем для поиска неисправностей и контроля состояния сложных систем / И.М. Синдеев // Изв. АН СССР. Серия Техническая кибернетика. - 1963. - № 2. - С. 22-28.

107. Осипов О.И. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов / О.И. Осипов, Ю.С. Усынин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. - 160 с.

108. Технические средства диагностирования: Справочник / [В.В. Ключев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.]; под общ. ред. В.В. Ключева. - М.: Машиностроение, 1989. - 672 с.

109. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №35407. Наукова стаття «Методика визначення енергетичної та економічної ефективності регульованого електропривода в насосних установках» / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов; дата реєстрації 19.10.2010.

110. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №33773. Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення «Методика визначення енергетичної та економічної ефективності застосування регульованого електропривода в насосних установках» / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов; дата реєстрації 18.06.2010.

111. Романов Р.А. Современные средства и методики диагностики оборудования горнодобывающей и горноперерабатывающей отрасли согласно концепции "Надежное оборудование" / Р.А. Романов, В.В. Севастьянов, А.П. Печеневский // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2008. - №2.

112. Калінов А.П. Системи діагностики, моніторингу та керування ресурсом роботи електромеханічних комплексів на основі показників якості перетворення енергії. Підсумки роботи і перспективи розвитку наукового напрямку / А.П. Калінов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробничий журнал. – 2009. - №3. - С. 22 – 30.

113. Закладной А.Н. Влияние качества напряжения питания на работу синхронных двигателей / А.Н. Закладной, О.А. Закладной, Т.Ю. Оборонов, О.С. Ильчук // Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования», Национальный минерально-сырьевой Университет «Горный», сборник научных трудов, часть 1, 25-27.04.2012 – 161-163 с

114. Праховник А.В. Діагностування енергоефективності електромеханічних систем як інструмент енергоменеджменту / Праховник А.В., Закладний О.М., Закладний О.О. // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2011, - Вип. 21. С. 121-128.

115. Pumps life cycle cost: a guide to LCC analysis for pumping systems. executive summary / [Hydraulic institute and Europump]. - Washington, DC, USA, 2001. - 16 с.

116. McCoy A. Gilbert. Energy management for motor-driven systems / Gilbert A. McCoy, John G. Douglass. - Washington, DC, USA, 2000. – 123 с.

117. Gill P. Electrical power equipment maintenance and testing / Paul Gill. – USA, CRC Press: 2008. – 1002 с.

118. Закладний О.О. Енергетична модель формування і збереження еталонів для систем функціонального моніторингу асинхронного електропривода / О.О. Закладний, О.М. Закладний, І.В. Притискач // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2011, - Вип. 20. С. 159-166

119. Гуринович А.Д. Анализ стоимости жизненного цикла при выборе энергоэффективного насосного оборудования для водозаборных скважин / А.Д. Гуринович, А.А. Казанцев // Энергоэффективность. - 2005. - №6. - С. 12-13.

120. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – [4-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

121. Thomson W. T. A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past, present and future [Электронный ресурс] / Thomson W. T. // Power electronics and drives. - 1999. - №9., С. 3-18. - Режим доступа <http://www.spectraquest.com/tech/MCSA.pdf>.

122. Автоматизация и автоматизированные системы управления в угольной промышленности / Под ред. Б.Ф. Братченко. М.: Недра, 1976. – 383с.

123. Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір № 33936. Комп'ютерна програма «Методика розрахунків робочих параметрів асинхронного електропривода за паспортними даними» / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов, І.В. Притискач; дата реєстрації 30.06.2010.

124. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – [3-е изд.]. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

125. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.

126. Thorsen V. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry/ V. Thorsen, M. Dalva // EMD. – 1997. - № 444, С. 109-113.

127. Cho K.R. Detection of broken rotor bars in induction motors using state and parameter estimation / K.R. Cho, J.H. Lang, S.D. Umans // Industry applications. – 1992. - № 28. – С. 702-709.

128. Mehala N. Motor current signature analysis and its application in induction motor fault diagnostics / Neelam Mehala, Ratna Dahiya // International journal of

systems applications, engineering and development. – 2007. - №2. – С. 29 – 35.

129. Mehala N. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for induction machines / Neelam Mehala, Ratna Dahiya // International journal of circuits, systems and signal processing. – 2009. - №1. – С. 10 – 17.

130. Schoen Randy R. Motor bearing damage detection using stator current monitoring / Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farrukh Kamran, Robert G. Barthel // IEEE. Industry application magazine. – 1995. - №. 6. – С. 123-145.

131. Thomson W. T. Current signature analysis to detect induction motor faults / William T. Thomson, Mark Fenger // IEEE. Industry application magazine. – 2001. - № 7/8. - С. 13-21.

132. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 36472. Комп'ютерна програма «Діагностика енергетичного стану асинхронного електропривода» / О.М. Закладний, О.О. Закладний, І.В. Притискач, Т.Ю. Оборонов; дата реєстрації 10.01.2011.

133. Управление качеством электроэнергии / [И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

134. Бурковский А.Н. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения / А.Н. Бурковский, Е.Б. Ковалев, В.К. Коробов. – М.: Энергия, 1970. – 184 с.

135. Синчук О.Н. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // Электротехника. – 2003. - №3. - С. 205-211.

136. Определение допустимого тока статора взрывозащищенных асинхронных двигателей серии В, ВР в кратковременных режимах работы/ [А.Н. Бурковский, Т.О. Титкова, Т.П. Канашенкова, В.В. Макеев] // Электротехническая промышленность. Серия “Электрические машины”. -1978. - №7(89). – С.5-7.

137. Закладний О.О. Прогнозування залишкового ресурсу асинхронного електропривода / О.О. Закладний, О.М. Закладний // Науково-технічний

розвиток: економіка, технології, управління: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 21-24 квітня 2010 року.-К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 220 с. С.195

138. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – [2-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

139. Суднова В.В. Качество электрической энергии [Электронный ресурс] / В.В. Суднова. – М.: Энергосервис, 2000. - Режим доступа <http://www.test-electro.ru>.

140. Закладний О.О. Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електропривода / О.О. Закладний // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – 2010. – № 19. - С. 137-146.

141. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – [2-е изд.]. - М.: Недра, 1978. - 349 с.

142. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 248 с.

143. Закладний О.М. Діагностичні ознаки аварійних режимів асинхронних електродвигунів / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. 2011. №2. С. 23-30.

144. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения [Электронный ресурс] / В. Петухов // Новости электротехники. - 2008. - №1(49). – Режим доступа до журн. : <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/49/10.php>.

Додаток А

Вимоги до енергетичних показників асинхронних двигунів і показників якості електроенергії

Таблиця А.1

Допустимі відхилення показників АД

Показник		Допустимі відхилення
ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1) «МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОБЕРТОВЫЕ. Номинальные данные и рабочие характеристики»		
1. Коефіцієнт корисної дії (η)	Визначений методом окремих втрат: для машин потужністю до 50 кВт вкл.	-0,15(1- η)
	Визначений методом окремих втрат: для машин потужністю вище 50 кВт	-0,1(1- η)
	Визначений методом безпосереднього навантаження	-0,15(1- η)
2. Загальні втрати для машин потужністю понад 50кВт		+10% від повних втрат
3. Коефіцієнт потужності асинхронних двигунів*		—, але не менше 0,02 і не більше 0,07 за абсолютною величиною
4. Ковзання асинхронних двигунів		$\pm 20\%$ номінального значення, знак мінус лише для двигунів з підвищеним ковзанням
5. Початковий пусковий струм асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором		+20%
6. Початковий пусковий момент асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором		-15%
7. Максимальний обертовий момент двигунів змінного струму		-10%
8. Мінімальний момент у процесі пуску асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором		-20%. У стандартах або технічних умовах на окремі види машин допускається встановлювати додатково нижні граничні найменші значення мінімального обертального моменту
9. Момент інерції		$\pm 10\%$
10. Гарантійний термін		2 роки від дня початку експлуатації машини при гарантійному наробітку 10 000 год

* Допускається значення виміряного коефіцієнта потужності менше на 0,02 в порівнянні з нижньою межею встановленого значення з урахуванням допустимих відхилень за умови, що добутки отриманих вимірів значень коефіцієнта потужності та коефіцієнта корисної дії машин не нижче добутків встановлених значень цих величин, з урахуванням допустимих відхилень, передбачених у цьому пункті стандарту. Допустимі відхилення не поширюються на однофазні асинхронні двигуни з робочим конденсатором.

Таблиця А.2

Допустимі відхилення показників АД та ПЯЕ

ГОСТ 51689-2000 «МАШИНИ ЕЛЕКТРИЧНІ ОБЕРТОВІ. Двигуни асинхронні потужністю від 0,12 до 400 кВт включно. Загальні технічні вимоги»				
Допустиме перевантаження при номінальних напрузі й частоті при сервіс-факторі		1,1	10%	
		1,15	15%	
Допустима потужність навантаження при температурі навколишнього середовища, що перевищує максимальну робочу, %		40 °C	100	
		45 °C	96	
		50 °C	92	
		55 °C	87	
		60 °C	82	
Допустима потужність навантаження при експлуатації на висоті, що перевищує 1000 м над рівнем моря, %		1000 м	100	
		1500 м	98	
		2000 м	95	
		2500 м	92	
		3000 м	88	
		3500 м	84	
		4000 м	80	
		4300 м	74	
Допустимі вібрації зовнішніх джерел	Двигуни основного (базового) виконання	Прискорення, м/с ²	10	
		Частота, Гц	55	
	Двигуни з підвищеним ковзанням	Прискорення, м/с ²	20	
		Частота, Гц	55	
ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. Міждержавний стандарт»				
			Нормально допустимі	Гранично допустимі
Усталене відхилення напруги , %			± 5	± 10
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги , %	U _{ном} , кВ	0,38	8,0	12,0
		6-20	5,0	8,0
		35	4,0	6,0
		110-330	2,0	3,0
Коефіцієнт n-ої гармонічної складової напруги ,%			По таблиці 1	По таблиці 1
Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю , %			2	4
Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю , %			2	4
Відхилення частоти , Гц			± 0,2	± 0,4
Тривалість провалу напруги , с			-	30

Таблиця А.3

Значення коефіцієнта n-ої гармонічної складової напруги в процентах

Непарні гармоніки, не кратні 3, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Непарні гармоніки, не кратні 3**, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Парні гармоніки при $U_{\text{ном}}$, кВ				
n*	0,38	6-20	35	110-330	n*	0,38	6-20	35	110-330	n*	0,38	6-20	35	110-330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						> 12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
> 25	0,2+ +1,3 × × 25/n	0,2+ +0,8× × 25/n	0,2+ +0,6× × 25/n	0,2+ +0,2 × × 25/n										

*n - номер гармонічної складової напруги.
 ** Нормально допустимі значення, наведені для n, які дорівнюють 3 та 9, стосуються однофазних електричних мереж. У трифазних трипровідних електричних мережах ці значення беруть удвічі меншими наведених у таблиці.

Двигуни, які мають сервіс-фактор 1,15, допускають тривалу експлуатацію при номінальній потужності і номінальній напрузі й температурі навколишнього середовища до +50 °С. Відповідно до ГОСТ 28173 (МЕК 60034-1) двигуни витримують 1,5-кратні перевантаження по струму протягом 2 хвилин.

Таблиця А.4

Значення коефіцієнта завантаження

Показник		Допустимі відхилення
ДСТУ 3886-99 «Енергосбережение. Системы электропривода. Методы анализа и выбора»		
1. Коефіцієнт завантаження	Необхідна заміна на двигун меншої потужності	
	Доцільність зниження встановленої потужності АД повинна бути підтверджена розрахунком	
	Потужність АД вибрана вірно	

Додаток Б

Протоколи програм діагностування

Додаток Б1 Протокол програми “Діагностування параметрів АД”

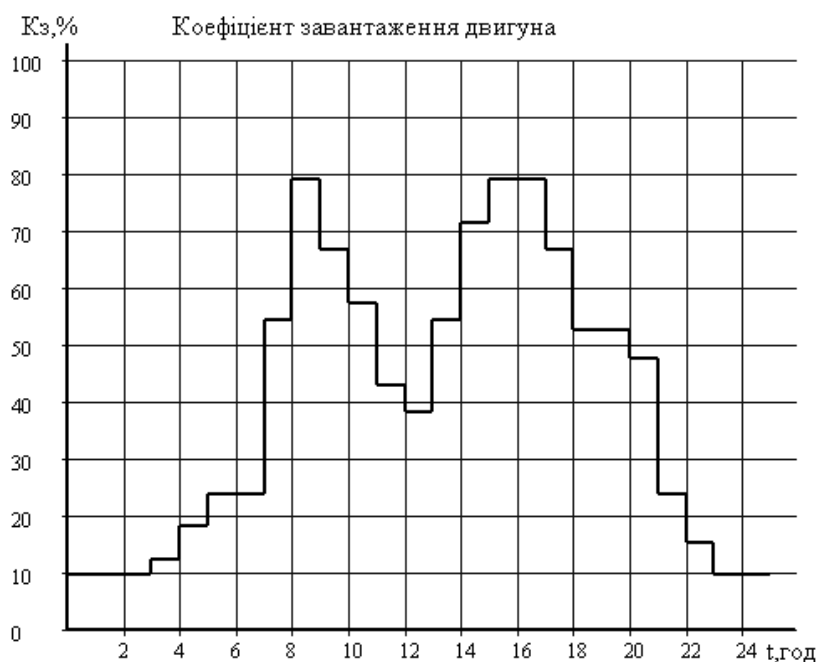
Дата проведення вимірювань: 17.10.2012 11:58:26

Назва агрегату: Асинхронний електродвигун

Паспортні дані

номінальна потужність на валу	160000 Вт
номінальна частота обертання ротора	1487 об/хв
номінальний струм	263,81 А
номінальний коефіцієнт потужності	0,9
номінальний ККД	96,2 %
перевантажувальна здатність	2,5
кількість полюсів	2
номінальна частота мережі	50 Гц
номінальна напруга	400 В

Середнє навантаження АД: 40,32 % номінального значення



Аналіз параметрів процесу енергоспоживання асинхронного двигуна

Середнє діюче значення фазної напруги	207,17 В
номінальне значення	230,94 В
відхилення	-10,29 %

Діючі значення напруги у фазах

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, В	199,2	199,2	199,2
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,85

Середнє діюче значення струму	147,91 А
-------------------------------	----------

Діючі значення струму в фазах

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, А	142,26	142,21	142,2
Відхилення, %	-3,82	-3,85	-3,86

Середня активна потужність	67541,79 Вт
----------------------------	-------------

Активна потужність у кожній фазі двигуна

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, кВт	21,66	21,64	21,64
Відхилення, %	-3,8	-3,87	-3,86

Середня повна потужність	91928,08 ВА
--------------------------	-------------

Повна потужність в кожній фазі двигуна

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, кВА	29,48	29,46	29,46
Відхилення, %	-3,81	-3,86	-3,87

Середня реактивна потужність

56991,78 вар

Реактивна потужність в кожній фазі двигуна

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, квар	18,27	18,27	18,27
Відхилення, %	-3,84	-3,85	-3,85

Середнє значення коефіцієнта потужності

0,66

Коефіцієнт потужності в кожній фазі двигуна

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, в.о.	0,64	0,64	0,64
Відхилення, %	-3,87	-3,86	-3,81

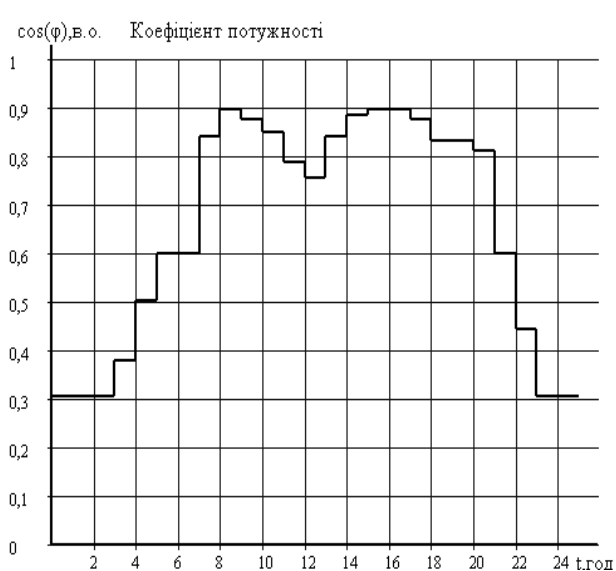
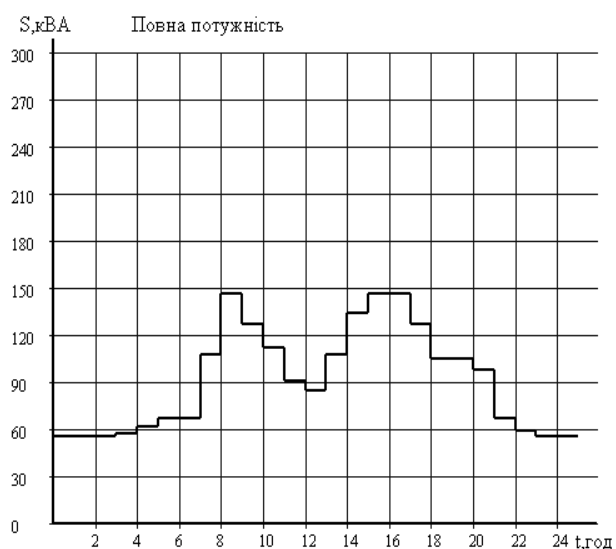
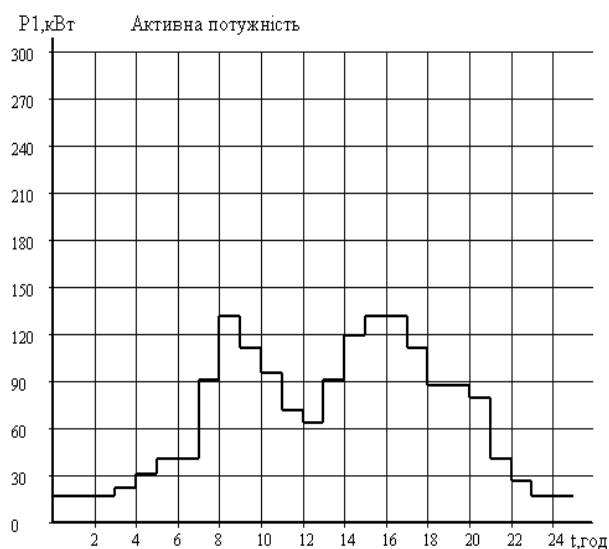
Середня потужність спотворення

607,42 ВА

Потужність спотворення кожної фази двигуна

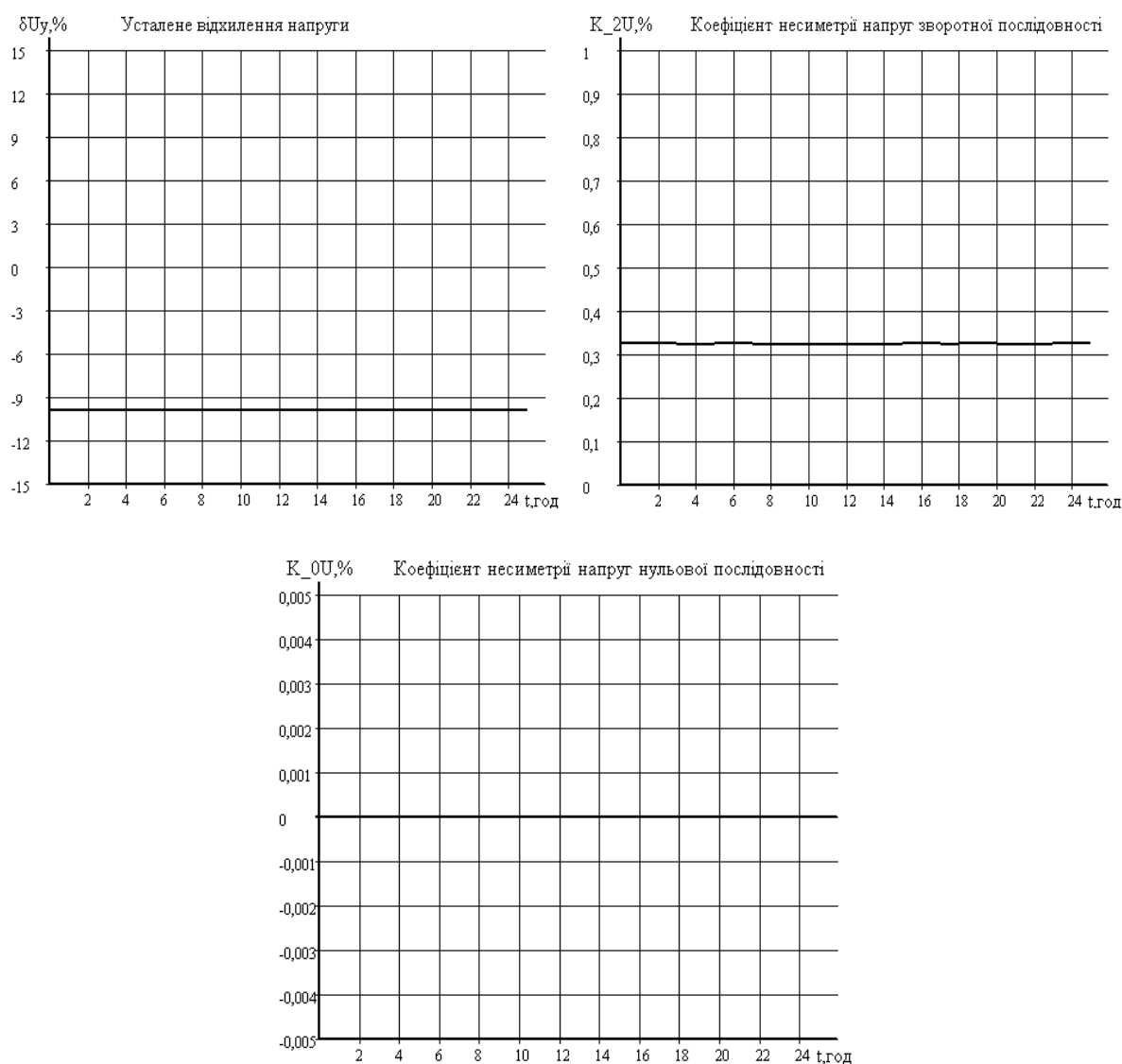
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, ВА	586,35	583,08	582,74
Відхилення, %	189,59	187,98	187,81





Аналіз показників якості електроенергії

Середнє усталене відхилення напруги	10,29 %
Середній коефіцієнт несиметрії напруг зворотної послідовності	0,33 %
Середній коефіцієнт несиметрії напруг нульової послідовності	0 %



Аналіз параметрів схеми заміщення

Приведений струм ротора АД	109,74 А		
Приведений струм ротора в кожній фазі АД			
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, А	105,55	105,51	105,51
Відхилення, %	-3,82	-3,86	-3,86

Середнє значення струму намагнічування

83,2 А

номінальне значення

88,28 А

відхилення

-5,75 %

Струм намагнічування кожної фази

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, А	80	80,01	80,01
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,84

Ковзання двигуна

0,004

номінальне значення

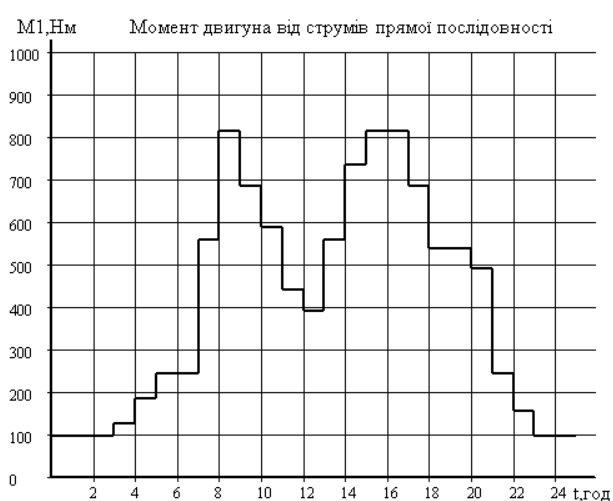
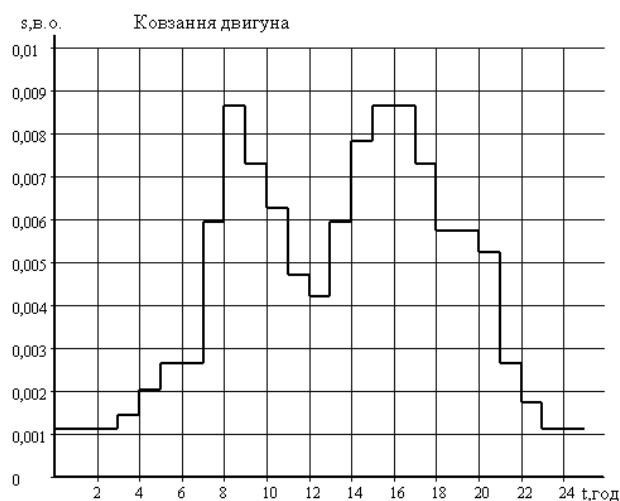
0,009

відхилення

-48,8 %

Момент двигуна від струмів прямої послідовності

414,34 Нм



Опори

Середнє значення загального опору 3,209 Ом

Загальний опір фаз статора АД

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	3,09	3,08	3,08
Відхилення, %	-3,74	-3,88	-3,92

Середнє значення сумарного активного опору 3,206 Ом

Сумарний активний опір фази обмоток двигуна

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	3,09	3,08	3,08
Відхилення, %	-3,74	-3,88	-3,92

Середнє значення індуктивного опору намагнічування двигуна 2,491 Ом

номінальне значення 2,616 Ом

відхилення -4,79 %

Індуктивний опір кола намагнічування фаз

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	2,4	2,39	2,39
Відхилення, %	-3,84	-3,85	-3,85

Середнє значення активного опору фази АД 0,014 Ом

номінальне значення 0,013 Ом

відхилення 2,41 %

Активний опір фаз статора

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	0,01	0,01	0,01
Відхилення, %	-4,09	-3,87	-3,58

Середнє значення приведенного активного опору фази ротора	0,008 Ом
номінальне значення	0,008 Ом
відхилення	1,6 %

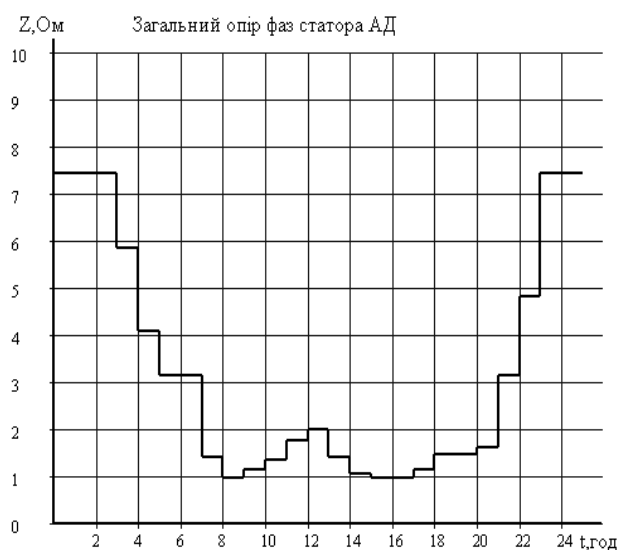
Приведений активний опір фаз ротора

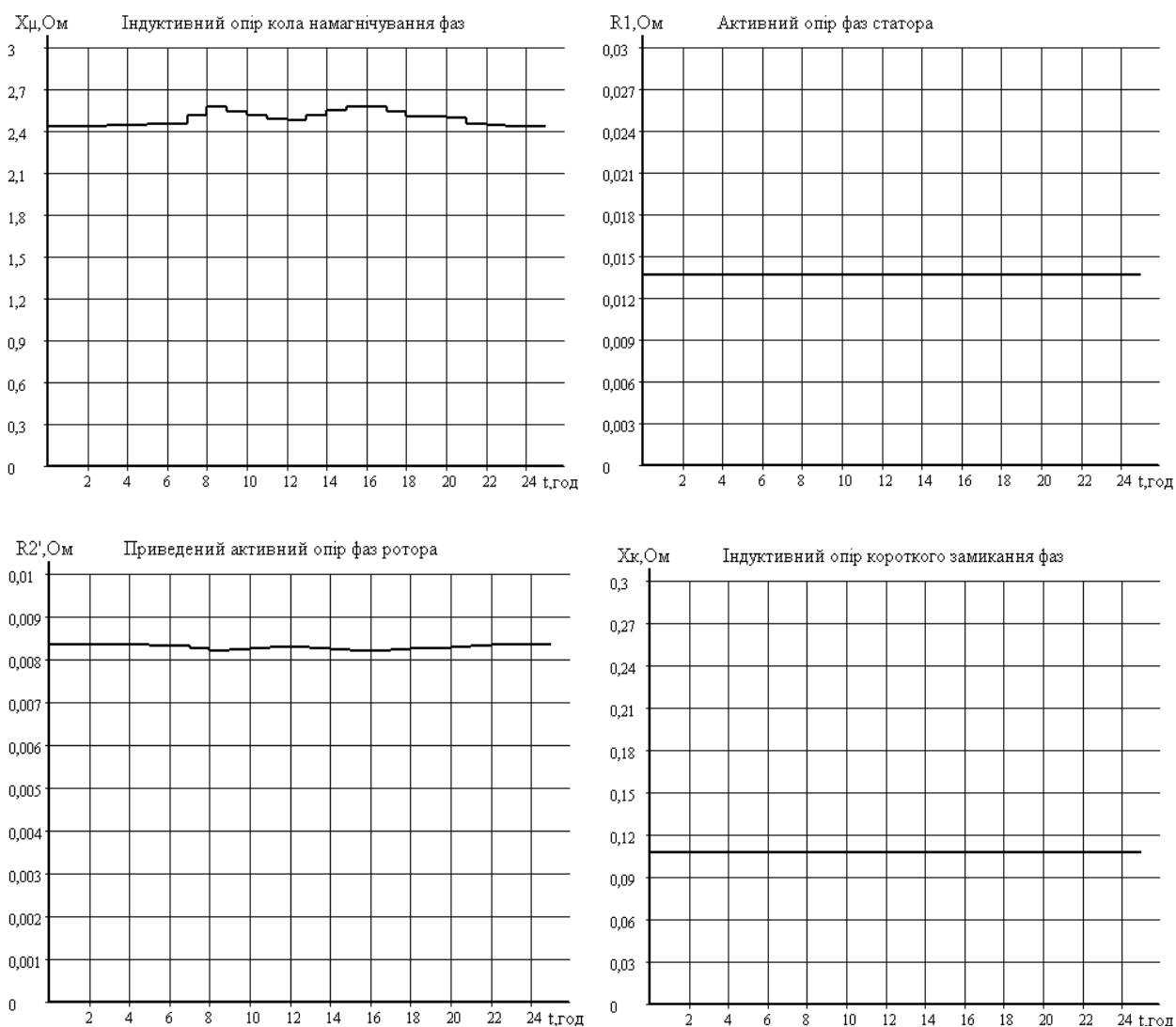
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	0,01	0,01	0,01
Відхилення, %	-3,81	-3,84	-3,88

Середнє значення індуктивного опору фази АД	0,108 Ом
номінальне значення	0,108 Ом
відхилення	-0,34 %

Індуктивні опори короткого замикання фаз

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	0,1	0,1	0,1
Відхилення, %	-3,81	-3,84	-3,88





Аналіз параметрів процесу енерговикористання споживаної енергії

Змінні втрати в обмотках	1082,25 Вт
Постійні втрати потужності	1854,7 Вт
номінальне значення	1832,24 Вт
відхилення	1,23 %
Додані (паразитні) втрати	230,36 Вт
Сумарні втрати потужності	3167,31 Вт

Додаткові втрати

від несиметрії напруги	0 Вт
від несинусоїдальності напруги	0 Вт
в обмотках і сердечниках двигуна	800 Вт

Коефіцієнт корисної дії

94,12 %

номінальне значення

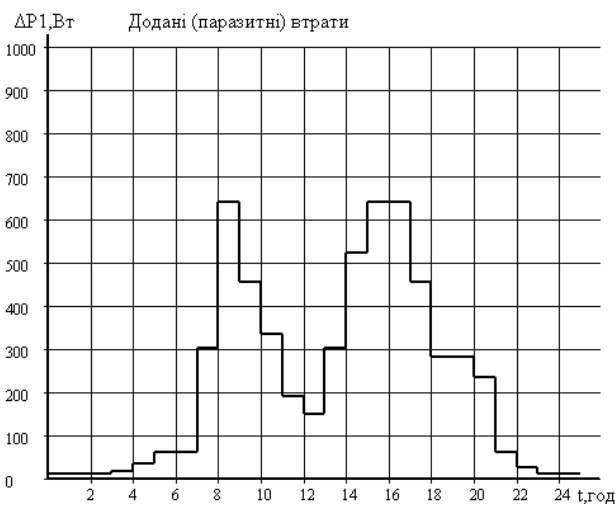
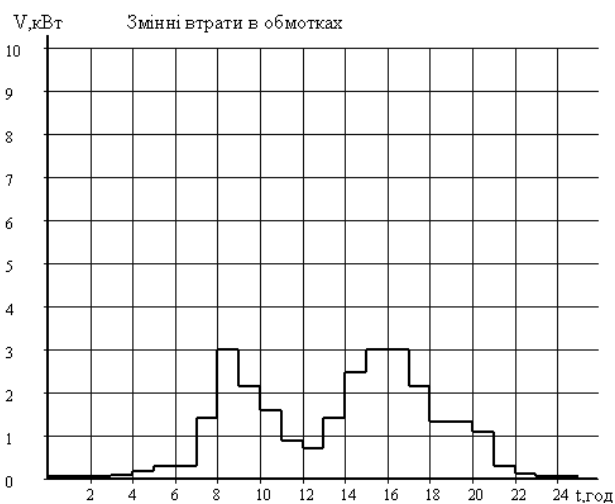
96,2 %

відхилення

-2,16 %

Електромагнітна потужність на валу АД

64604,84 Вт





Витрати енергії за цикл роботи

Активна енергія, споживана з мережі	1671,42 кВт*год
Реактивна енергія, споживана з мережі	1371,72 квар*год
Сумарні втрати енергії	77,42 кВт*год
Змінні втрати енергії в обмотках	27,01 кВт*год
Постійні втрати енергії	44,66 кВт*год
Додані (паразитні) втрати енергії	5,75 кВт*год
Додаткові втрати енергії	
від несиметрії напруги	0 кВт*год
від несинусоїдальності напруги	0 кВт*год
в обмотках і сердечниках двигуна	19,2 кВт*год

Додаток Б2 Протокол програми “Визначення залишкового ресурсу АД”

Дата проведення розрахунку: 29.10.2012 21:34:57

ВХІДНІ ДАНІ

номінальні втрати	6320 Вт
максимальна температура ізоляції	120 град.
Ь	-0,09
початковий знос	0 год
номінальний ресурс	175200 год
час дискретизації	1 хв

Кількість вхідних файлів:

7	
0	D:\resurs_res1.mat
1	D:\resurs_res2.mat
2	D:\resurs_res2.mat
3	D:\resurs_res3.mat
4	D:\resurs_res5.mat
5	D:\resurs_res6.mat
6	D:\resurs_res7.mat

