

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

О. О. ЗАКЛАДНИЙ

О. М. ЗАКЛАДНИЙ

УДК 62-83-52.003(082)

**ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
СИСТЕМ ШАХТНИХ СТАЦІОНАРНИХ УСТАНОВОК**

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 шахтних
стаціонарних установок: Монографія / О.О. Закладний, О.М. Закладний – К.: Видавництво
«Лібра», 2013. – 187 с.: ил.

ISBN 978-617-693-001-3

У монографії розглядаються засоби діагностування енергоефективності
електромеханічних систем для зниження їх електроспоживання і виявлення джерел
неефективного використання енергії. Значну увагу приділено дослідженню
енерговикористання електромеханічних систем шахтних стаціонарних установок.

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

УДК 62-83-52.003(082)

ББК 31.261.63-04

ISBN 978-617-693-001-3

© О.О. Закладний,
О.М. Закладний, 2013
© Лібра 2013

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	6
1 КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ	10
1.1 Загальні положення.....	10
1.2 Методи та засоби діагностування електромеханічних систем.....	17
1.3 Класифікація методів діагностування електромеханічних систем з асинхронними двигунами.....	29
2 МЕТА І ЗАВДАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	43
2.1 Фактори впливу на енергоефективність і технічний стан електромеханічних систем з асинхронними двигунами	43
2.2 Вплив якості напруги живлення на електромеханічні системи з синхронними двигунами.....	57
2.3 Завдання моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем	65
2.4 Вартість життєвого циклу електромеханічних систем.....	70
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ШАХТНИХ СТАЦІОНАРНИХ УСТАНОВОК	74
3.1 Аналіз електроспоживання шахтних установок та механізмів	74
3.2 Класифікація графіків електричних навантажень електромеханічних систем циклічної дії	84
3.3 Класифікація графіків електричних навантажень електромеханічних систем безперервної дії	91

3.4 Апроксимація автокореляційних функцій процесу електроспоживання електромеханічних систем	94
3.5 Вибір кроку дискретизації процесу електроспоживання електромеханічних систем	100
3.6 Моделювання індивідуальних графіків електричного навантаження із заданими кореляційними властивостями	105
4 ЗАСОБИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	113
4.1 Схемно-технічні рішення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем.....	113
4.2 Алгоритм функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами.....	122
4.3 Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами...	126
4.4 Алгоритми теплового і струмового захисту асинхронних двигунів для засобів функціонального діагностування електромеханічних систем	133
4.5 Мобільний програмно-апаратний комплекс для функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем	139
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	148
ДОДАТОК А (Протокол програми “Діагностування параметрів АД”).....	166
ДОДАТОК Б (Протокол програми “Визначення залишкового ресурсу АД”)..	185

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ

ЕМС – електромеханічна система;

ЕП – електричний привод;

АЕП – асинхронний електропривод;

АД – асинхронний електродвигун;

ШСУ – шахтні стаціонарні установки;

СД – синхронний електродвигун;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ГЕН – графік електричного навантаження;

ПЯЕ – показники якості електроенергії;

ЕН – електричне навантаження;

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

ІЕ – 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;

ЕРС – електрорушійна сила;

СР – споживачі-регулятори.

ВСТУП

Аналіз структури втрат електроенергії у сфері виробництва, розподілення та споживання показує, що вирішальна частка втрат (85–90%) приходить на сферу енергоспоживання, тоді як втрати її під час передавання та розподілення становлять лише 10–15%.

Енергозбереження – найважливіше завдання сьогодення. Одним з актуальних завдань є підвищення ефективності енерговикористання. Реалізація нормування і зниження втрат електричної енергії в електричних мережах – державна політика в галузі енергозбереження. Кінцевий споживач енергії нині потребує застосування такої само політики, тобто підвищення рівня енергоефективності використання електрообладнання. Як відомо, використання енергії є важливим критерієм оцінки прогресу. У зв'язку з різким подорожчанням енергетичних носіїв проблема забезпечення ними підприємств є одним з пріоритетних напрямів стратегічного розвитку держави.

На даному етапі розвитку України великого значення набувають питання розроблення та впровадження методів і засобів керування енергоефективністю, оскільки на сьогодні гостро постала проблема економії енергетичних ресурсів. Проблемою є також відсутність загальнодержавної стратегії збереження енергоресурсів на гірничовидобувних підприємствах. На сьогодні рівень енерговикористання гірничовидобувної техніки характеризується значними непродуктивними витратами енергії. На підготовчих і видобувних роботах коефіцієнт завантаження не перевищує 50%. Робота прохідницьких комплексів на добовому інтервалі має в основному нерегулярний характер. На провітрювання прохідницьких вибоїв і на холостий хід конвеєрів витрачається в 3.5–6 разів більше електроенергії ніж на виконання основних операцій – руйнування гірського масиву і доставлення гірської маси до перевантажувального пункту. Значними є також резерви економії на шахтному транспорті. Вагомий потенціал енергозбереження мають стаціонарні установки, де резерв становить до 10%. Однакові за призначенням гірничі машини й

комплекси, навіть в однакових умовах, різняться за рівнем енерговикористання. Отже, кожену установку з точки зору енергоспоживання слід розглядати не як середньостатистичні, а як унікальні об'єкти і для них адаптувати відповідні енергетичні моделі та енергозаощаджувальні заходи.

Значні резерви економії енергії на гірничовидобувних підприємствах мають електромеханічні системи (ЕМС) з електроприводом, оскільки оснащені ними машини і установки є одними з найбільш енергоємних споживачів електроенергії. 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.

Поширеність АЕП пояснюється його відносною простотою – виготовлення, підключення, обслуговування, а також задовільними експлуатаційними й конструкційними характеристиками. Однак в реальних умовах, в залежності від різноманітних факторів, задовільні для умов експлуатації відповідно до ТУ і виконання АЕП показники його енергоефективності та надійності не співпадають із заявленими.

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 витрат у вузлах агрегату [41]. До того ж має місце фізичне старіння конструкційних матеріалів, що виражається в зростанні витрат 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 КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ 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]. Лише на одному потужному гірничо-металургійному комплексі ВАТ «Криворіжсталь» встановлено понад 30000 електродвигунів потужністю понад 2000 МВт [127].

Структура електроспоживання гірничовидобувного підприємства залежить від багатьох факторів, основними з яких є глибина шахти, водонасиченість, продуктивність тощо (ДСТУ 3224-95 "Методи визначення норм витрачання електроенергії гірничими підприємствами"). Вона розподіляється наступним чином: вентиляція 17,13%; водовідлив – 14,28%; підйом – 13,32%; кондиціонування повітря – 10,88%; підземний транспорт – 5,60%; видобувні роботи – 5,26%; технологічний комплекс поверхні – 3,75%; вироблення стисненого повітря – 2,46%; підготовчі роботи – 1,29%; освітлення – 0,69%; інші електроприймачі – 20,58%; втрати електроенергії – 4,76%.

Потужні ЕМС, як наприклад, шахтні стаціонарні установки (ШСУ),

характеризуються загальними ознаками, що дозволяє об'єднати їх в одну групу: стаціонарність виконання; значна потужність електропривода; необхідність у регулюванні продуктивності; високі вимоги до експлуатаційної надійності; значні початкові й експлуатаційні витрати; тривалий строк служби; підвищені вимоги до загальношахтних енергетичних показників.

Постійно зростаюча потреба країни у власних енергоресурсах вимагає збільшення видобутку енергетичного вугілля і, відповідно, – підвищення потужностей електропривода ШСУ. Відповідальною ланкою гірничих підприємств є підйомні установки, одинична потужність яких може сягати 10 МВт. Шахтні підйомні установки видають на поверхню понад половину всіх корисних копалин, а питома енергоспоживання може становити до 30% [77].

Тенденція зростання виробничої потужності гірничовидобувних підприємств спричинила розвиток стаціонарного конвеєрного транспорту, який дозволяє збільшити продуктивність і економічність видобування корисних копалин. На відкритих роботах використовуються конвеєри довжиною до 100 км, довжиною става одного конвеєра до 10 км, продуктивністю 20 тис. т / год і більше, шириною стрічки 3 м й швидкістю 6–8 м / с [78,79].

Шахтні вентиляційні установки головного провітрювання є одними з найпотужніших у вітчизняній практиці. Продуктивність їх сягає 300 м³/с, питома енергоспоживання – 30–35%, а одинична потужність привода – 5000 кВт [77,80].

На вуглевидобувних підприємствах експлуатується значна кількість компресорних станцій та пересувних установок. Встановлена потужність привода на центральних компресорних станціях Кривбасу сягає 18 МВт, а питома енергоспоживання на деяких рудниках – 30–40% [77].

Стаціонарні водовідливні установки вуглевидобувних підприємств обладнано насосами загальною потужністю привода до 0,5 МВт [122].

Низька надійність електротехнічного комплексу гірничовидобувних 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 проектних 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.

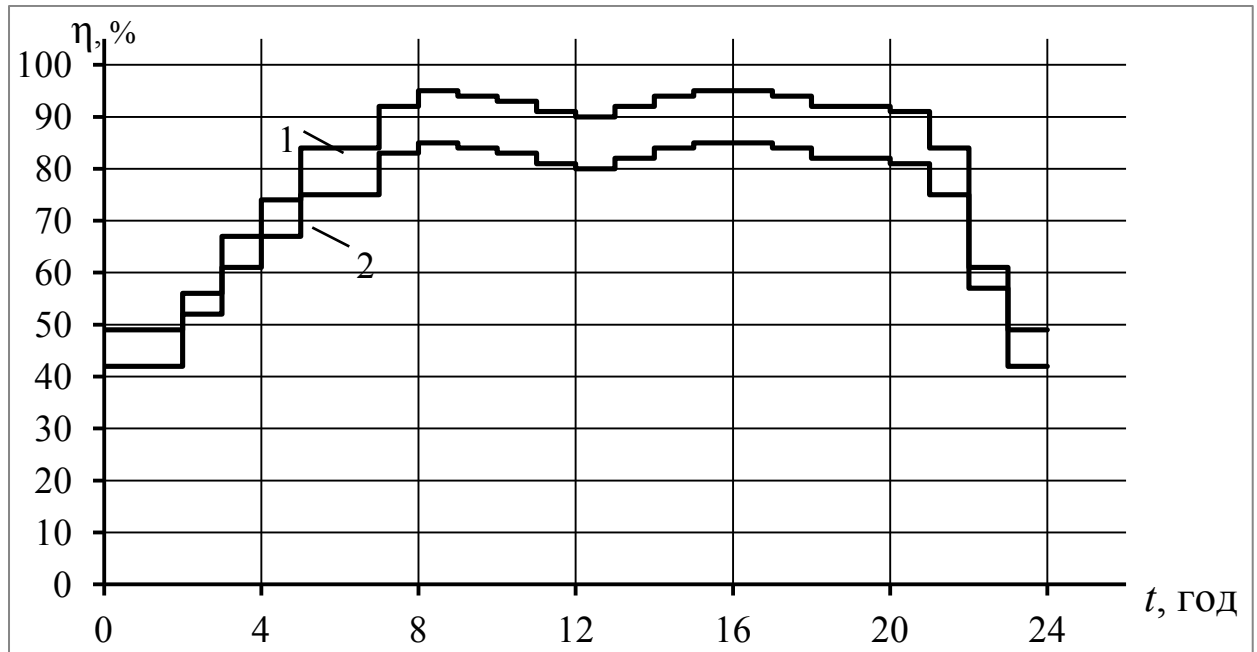
Аварії поділяються на технологічні – близько 35%, експлуатаційні – 50% та конструкційні – 15% [7]. У більшості випадків (85–95%) відмови АЕП трапляються через пошкодження обмоток та розподіляються таким чином: міжвиткові замикання – 93%, пробій міжфазної ізоляції – 5%, пробій пазової ізоляції – 2%. На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

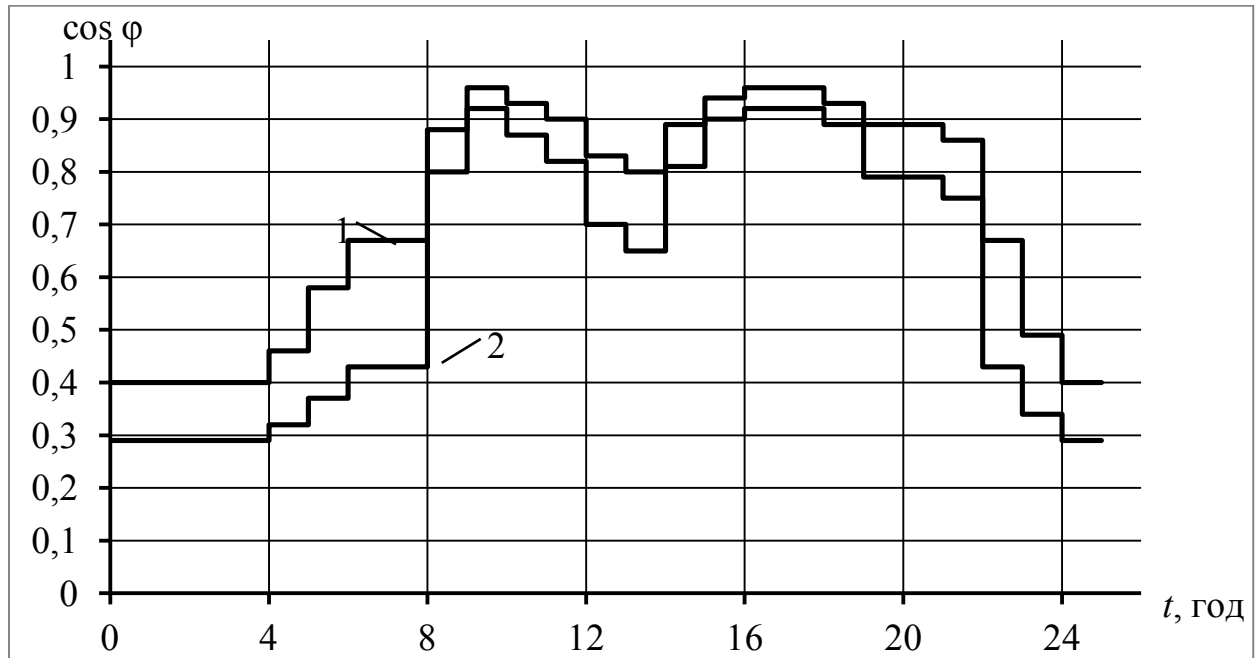
Переважає більшість АЕП після ремонту повертається на підприємство і експлуатується до наступного виходу з ладу. Після ремонту параметри й характеристики машин значно відрізняються від заводських, і, по суті, відремонтований двигун – це інша електрична машина. Така машина вимагає іншого підходу до її 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.



а



б

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

1 – паспортні; 2 – після ремонту

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

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 [2,3,11,12,154,155], 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 [141] 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 [138]. 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 обгрунтована його заміна дозволять скоротити витрати підприємства на спожиту електроенергію, технічне обслуговування і ремонти.

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, АВВ, «Инкотес» і ряд інших мають випробувальні стенди для досліджень двигунів [130]. 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 [129,130,152,153]. Це не дозволяє виявити дефекти, що зароджуються, і запобігти ушкодженню АЕП аж до створення аварійної ситуації.

Стенд універсальний для випробування високовольтних електродвигунів [137]. 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" (рис. 1.2) [136].

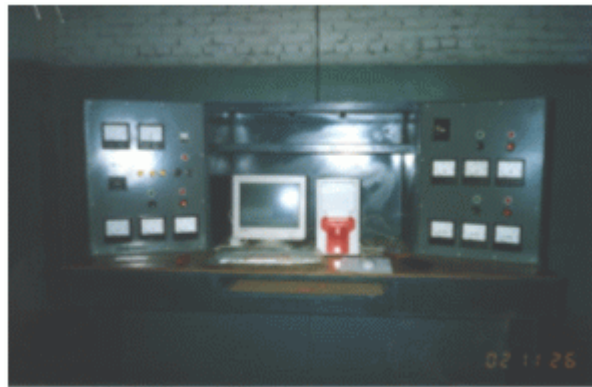


Рис. 1.2 Стенд ЗАТ "НИПО" для діагностики АД

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 $\cos\phi$, $\text{ККД} = f(P_2)$.

Стенд випробування асинхронних електродвигунів потужністю до 100 кВт типу 02.01.07, 02.01.07/М1 (рис. 1.3), 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/М1 автоматизовано процес

вимірювання і проведення випробувань із виведенням усіх протоколів у комп'ютер.



Рис. 1.3 Стенд випробування асинхронних електродвигунів потужністю до 100 кВт типу 02.01.07, 02.01.07/М1

Діагностичний стенд електродвигунів для лабораторій і виробництва [134]. Стенд розроблено у Німеччині, в лабораторії доктора Штайгера Мохило (рис. 1.4). 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.



Рис. 1.4 Діагностичний стенд Штайгера Мохило електродвигунів для лабораторій і виробництва

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 [131]. Стенди серії ELMOTE XX (рис. 1.5), 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.



Рис. 1.5 Серія комп'ютеризованих стендів ELMOTE XX для діагностики електродвигунів

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» [135]. Устаткування: LabVIEW; NI PXI-1042; NI PXI-8175; NI PXI-4070; NI PXI-6527; NI PXI-8422/2; мегомметр M4122В.

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. 1.6.

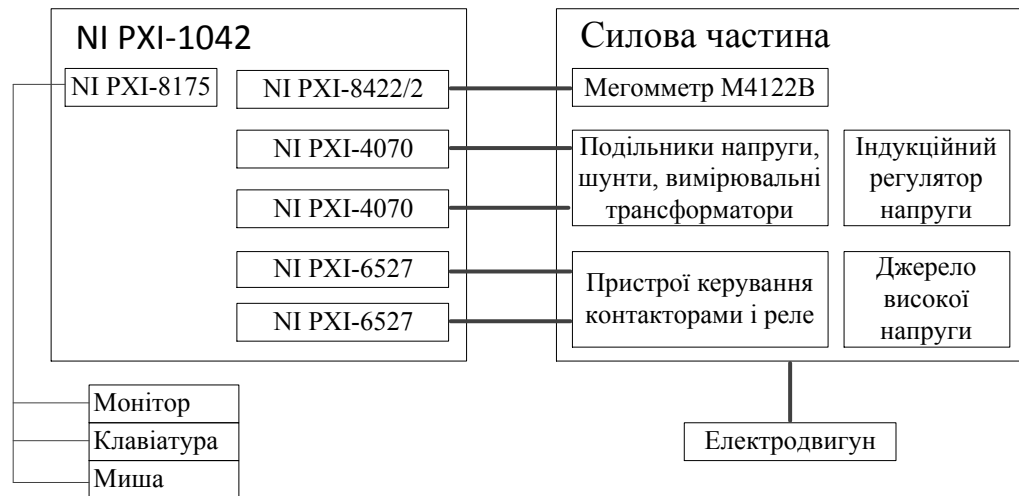


Рис. 1.6 Стенд для випробування АД компанії «AviaOk International»

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.

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.-Петербургу (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. 1.7.

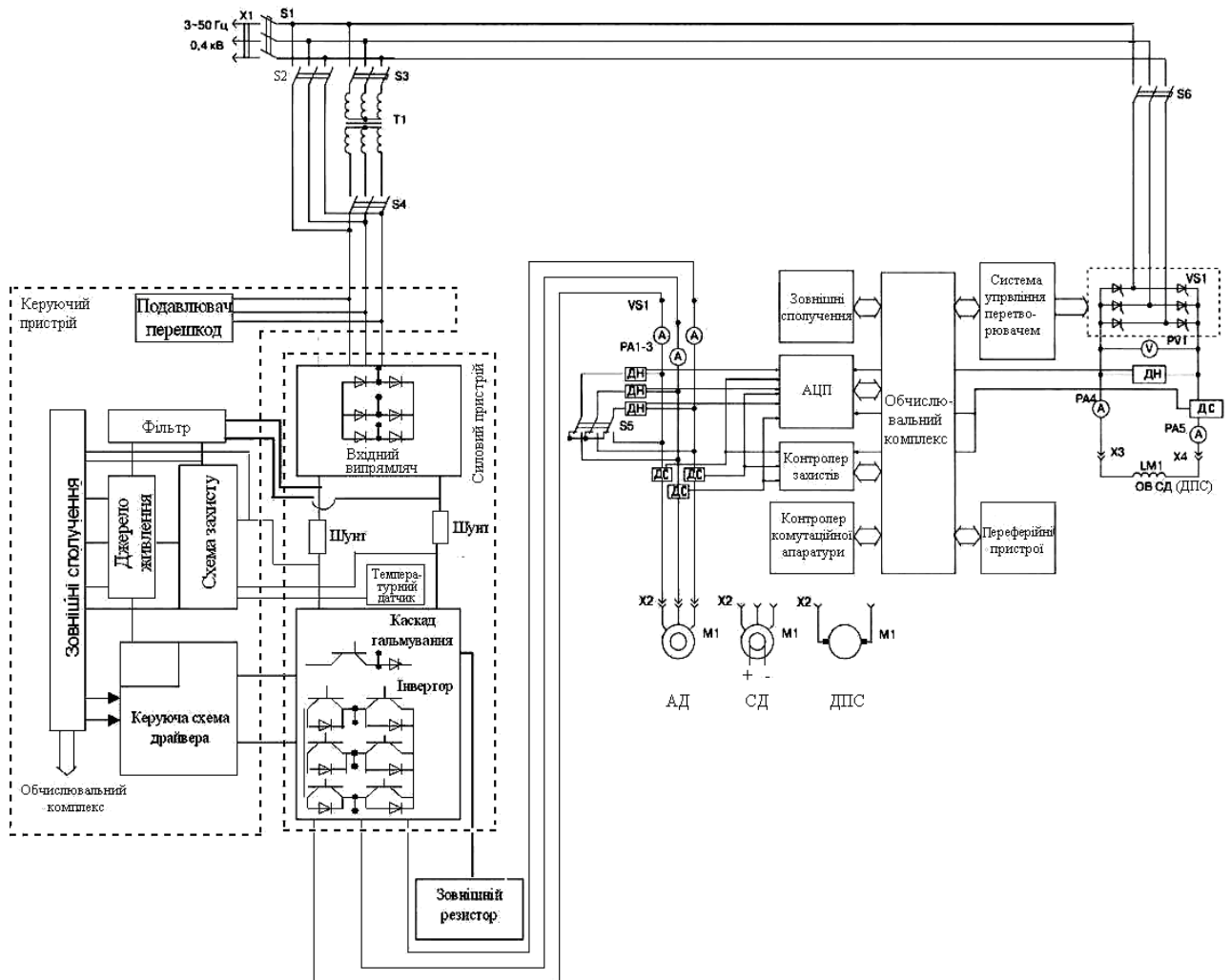


Рис. 1.7 Функціональна схема програмно-апаратного комплексу діагностування електричних машин

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 обойми 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 [128]. 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 (ВАТ «Криворіжсталь») [127].

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 [126]. «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 [121]. 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. 1.8).

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 подовження терміну служби (що робити з обладнанням після закінчення призначеного строку служби).



Рис. 1.8 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'ясувати 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. 1.9).

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.

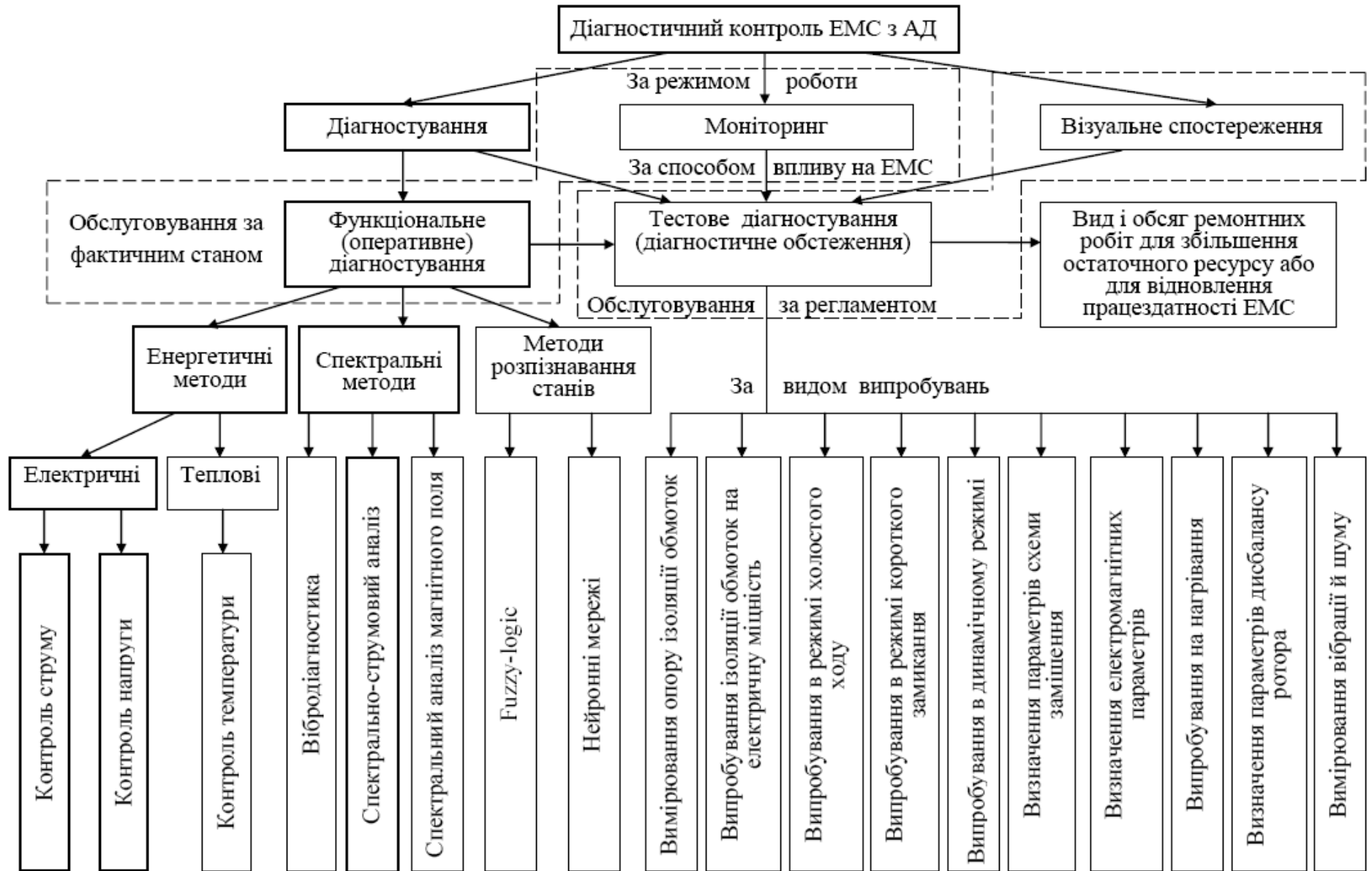


Рис. 1.9 Схема класифікації методів діагностування ЕМС з АД

У разі обслуговування за регламентом енергофактивність 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 визначити 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 – безперевний процес збору та аналізу інформації про значення діагностичних параметрів стану об’єкту.

В технічному діагностуванні під *моніторингом* розуміють безперевний процес збору та аналізу інформації про значення діагностичних параметрів стану об’єкту. *Багатофакторний моніторинг* - це безперевне (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 [150]. Метод спектрально-струмового аналізу, заснований на аналізованні 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; ВJM 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 МЕТА І 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

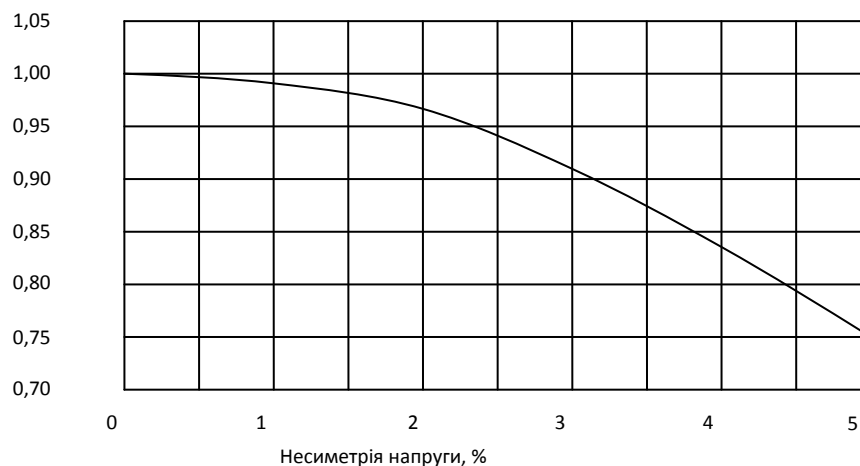


Рис. 2.2 Залежність коефіцієнта погіршення потужності від несиметрії напруги живлення

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

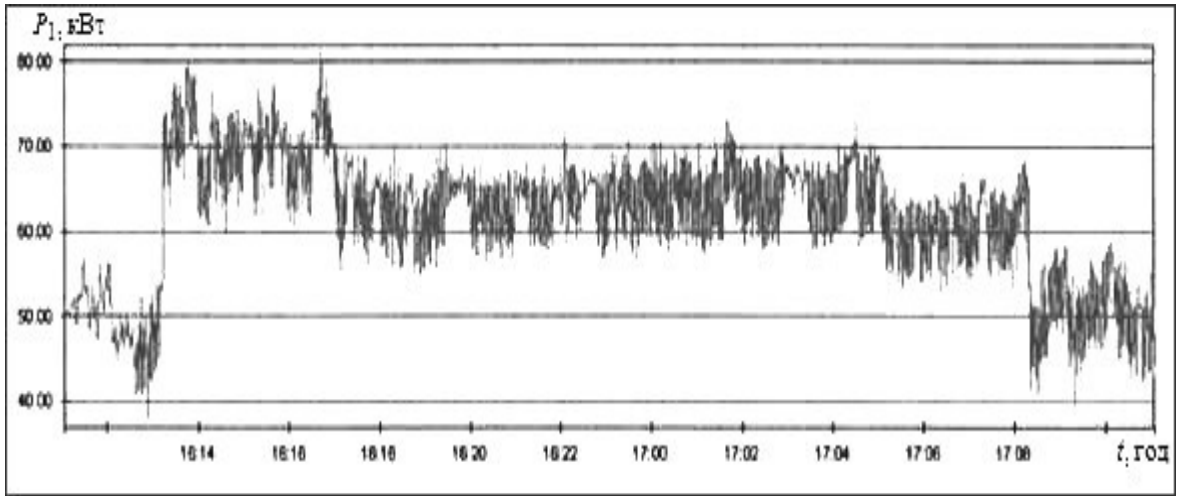
де $P_{\text{р}}^{\text{д}}$ - реактивна потужність двигуна на холостому ході, квар; $\Delta P_{\text{р}}^{\text{д}}$ - приріст споживання реактивної потужності з даним завантаженням двигуна, квар;
 $P_{\text{р}}^{\text{н}}$ — $P_{\text{р}}^{\text{д}}$ - реактивна потужність двигуна з номінальним завантаженням, квар;
 $\Delta P_{\text{р}}^{\text{н}}$ - приріст споживання реактивної потужності з номінальним завантаженням двигуна, квар; $\tan \phi$ - тангенс відповідний коефіцієнту двигуна з номінальним навантаженням; $\eta_{\text{д}}$ - 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).

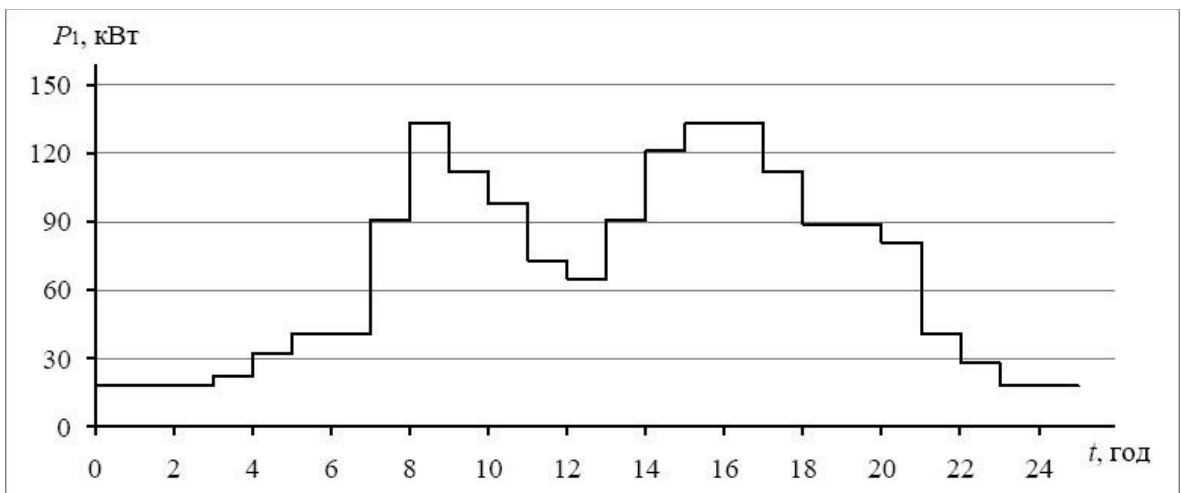
Робота АД завжди супроводжується його нагріванням, що зумовлено процесами, які відбуваються в ньому, і втратами потужності. Нормативний строк служби двигуна визначається температурою нагрівання його ізоляції. У сучасних двигунах застосовується кілька класів ізоляції, припустима температура нагрівання 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.

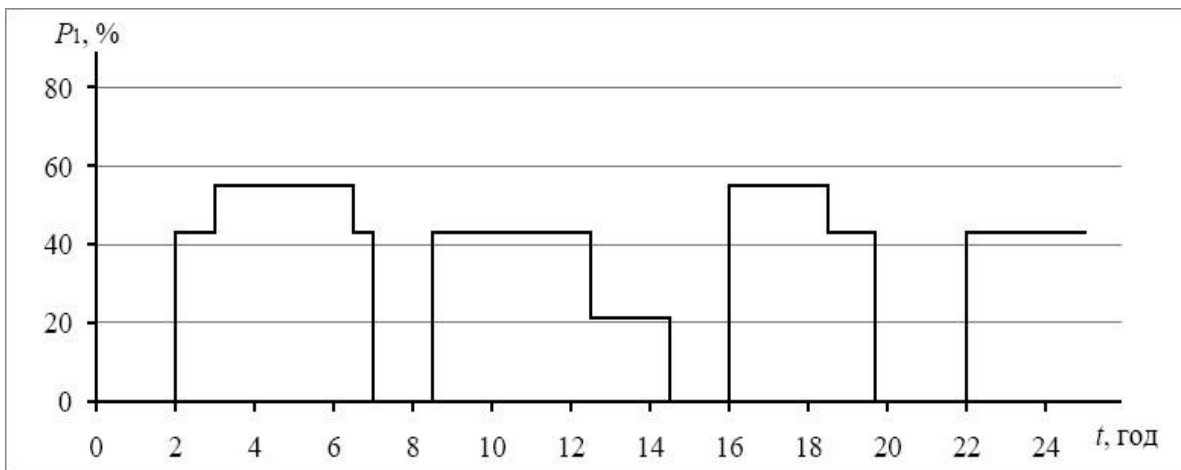
Характер навантаження двигуна залежить від механізму, який він приводить у рух. Двигуни вентиляторів і транспортних засобів зазвичай працюють зі сталим навантаженням. Двигуни млинів, дробарок і подрібнювачів мають різкозмінний характер роботи. Один і той само механізм залежно від технологічних умов роботи 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

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].

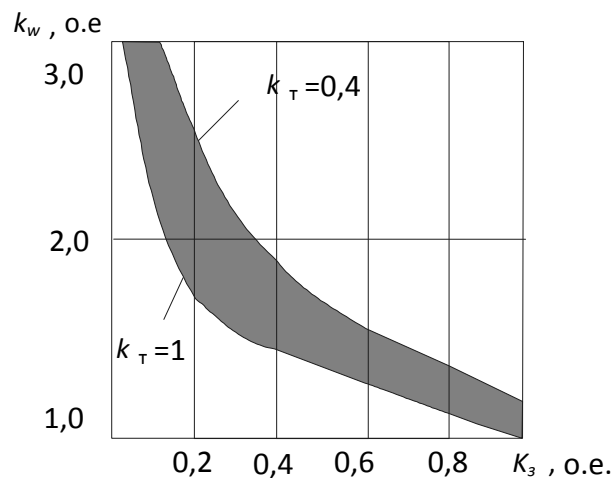


Рис. 2.4 Залежність коефіцієнту зростання питомої витрати електричної енергії від коефіцієнту завантаження

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.

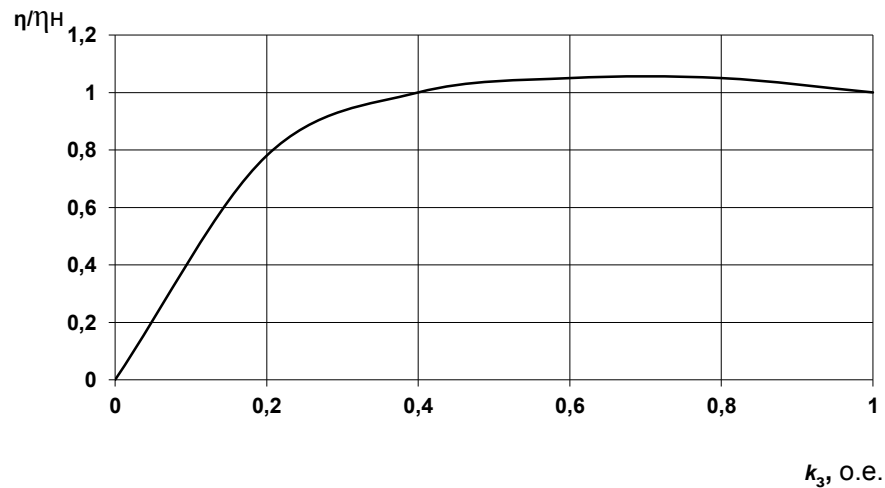


Рис. 2.5 Усереднена залежність ККД від коефіцієнту завантаження

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: ІЕ1 – стандартний (ІЕ – international Efficiency); ІЕ2 – високий; ІЕ3 – 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].

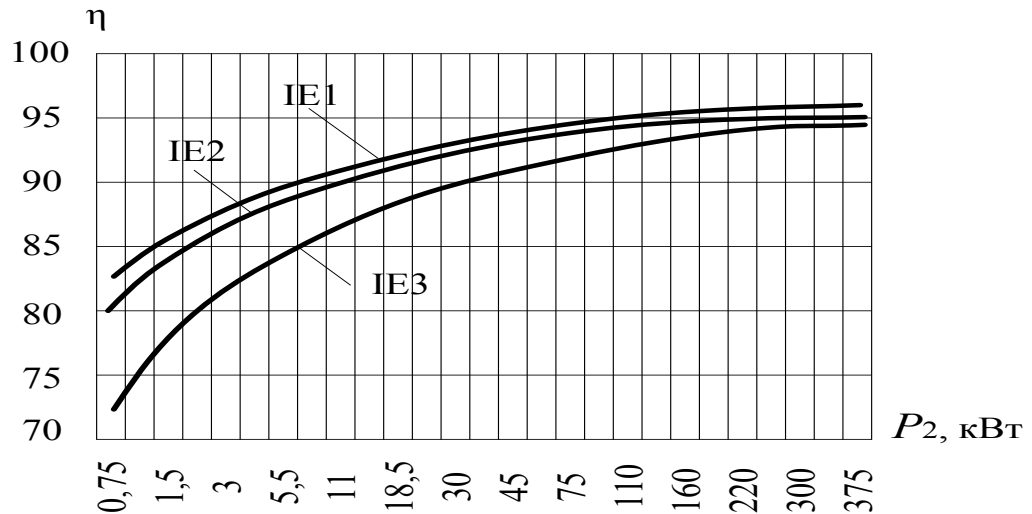


Рис. 2.6 Рівні ККД для нового стандарту енергоефективності низьковольтних трифазних АД

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).

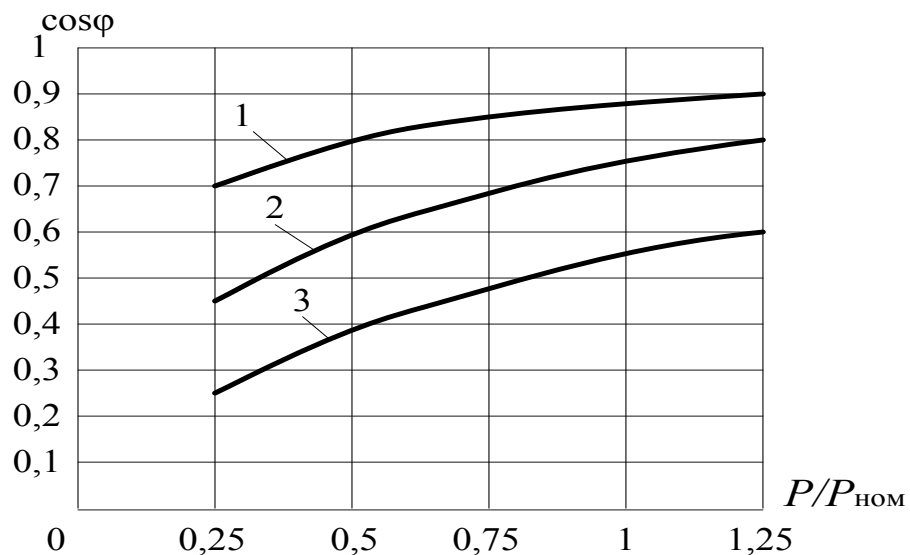


Рис. 2.7 Залежність $\cos\varphi$ від кратності механічного навантаження АД серії 4А для різних рівнів номінальних значень коефіцієнта потужності (1 – $\cos\varphi = 0,9$; 2 – $\cos\varphi = 0,8$; 3 – $\cos\varphi = 0,7$)

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 [140]. Проведені дослідження дають підставу вважати, що з

капітального ремонту виходить машина з погіршеними характеристиками і зниженою навантажувальною здатністю [139].

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

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

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]

$$\begin{aligned}
 & \text{---} & & \text{---} \\
 & \text{---} & & \text{---} \\
 & \text{---} & & \text{---} & & \text{---} \\
 & \text{---} & & \text{---} & & \text{---}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

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

На рис. 2.8 зображено модель СД з урахуванням несинусоїдальності напруги в середовищі MATLAB.

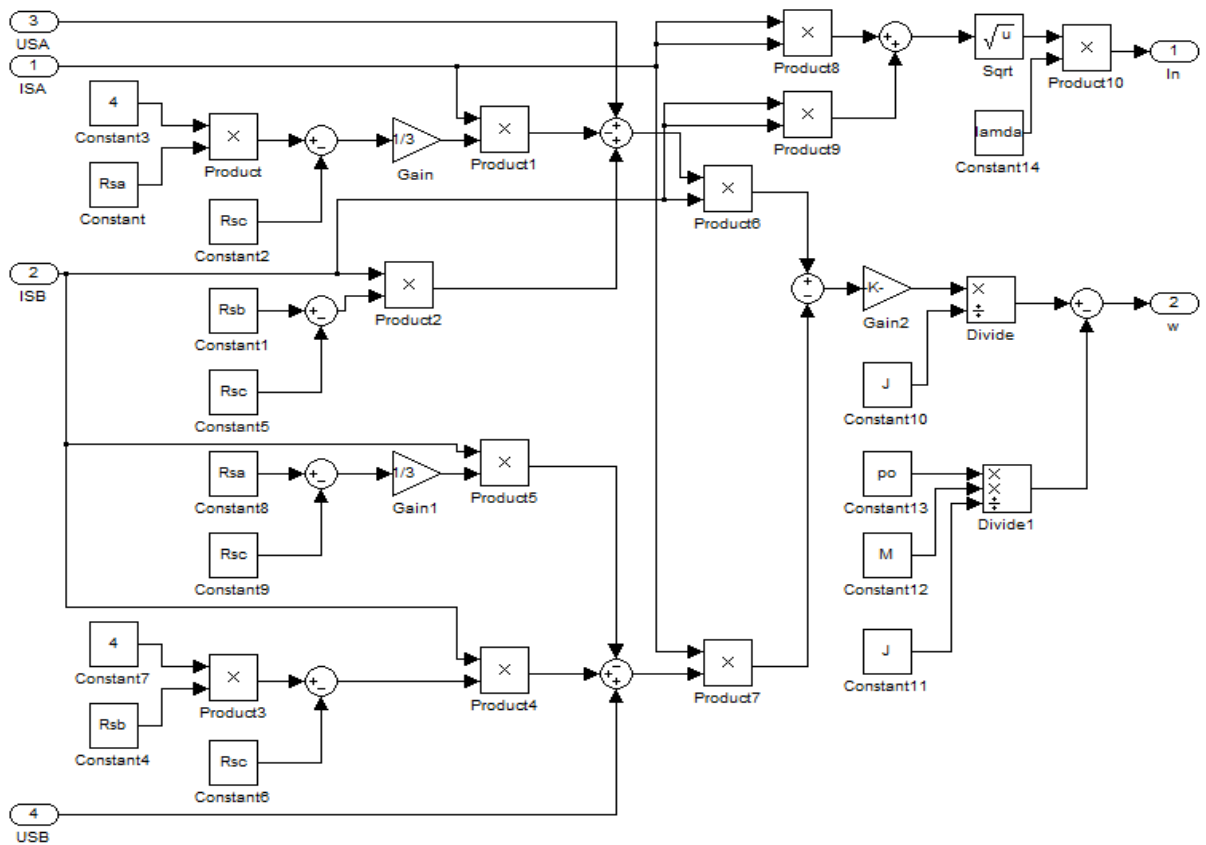


Рис. 2.8 Модель СД з урахуванням несинусоїдальності напруги в середовищі MATLAB

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.

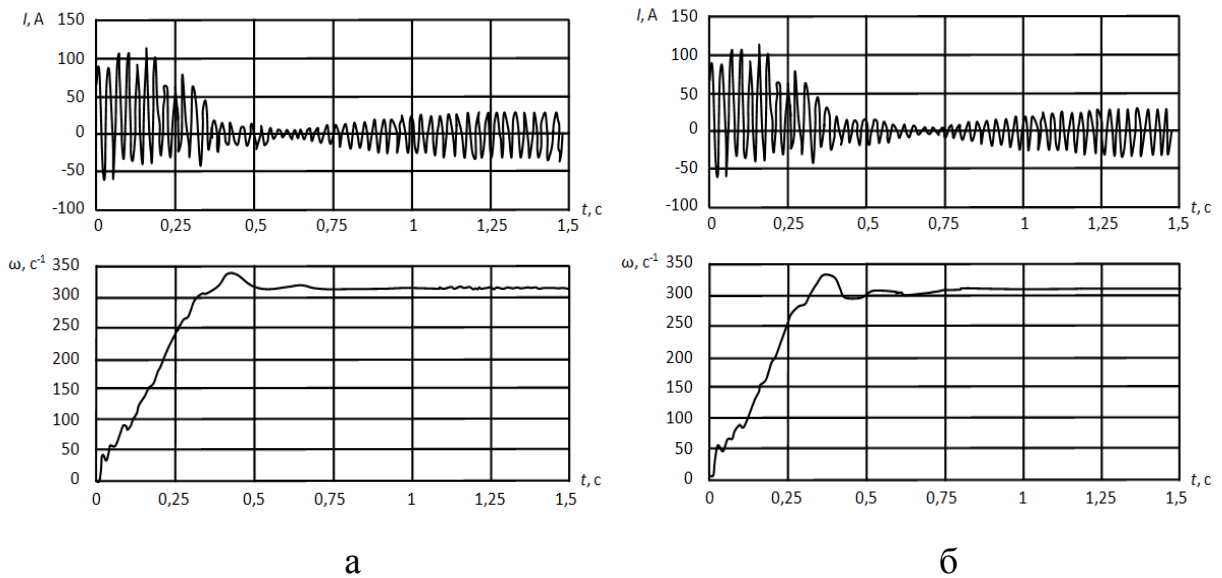


Рис. 2.9 Результати моделювання синхронного двигуна:

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

$$\frac{U}{U_n} = \frac{I_m}{I_{m_n}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_{\sigma}}{X_{\sigma_n}}\right)^2}}$$

де k - коефіцієнт, для переходу від обмотки якоря до обмотки збудження; λ - магнітна індукція в зазорі; λ_n - число послідовно з'єднаних витків, яким при цьому магнітному потоці визначається значення ЕРС у фазі обмотки; k_n - обмотковий коефіцієнт; U/U_n - відносне значення напруги.

Зі зменшенням значення λ знижується і опір X_{σ} . Це в свою чергу, викликає [46,124] непропорційне зниження струму збудження

$$\frac{I_m}{I_{m_n}} = \frac{U}{U_n} \cdot \frac{1}{k} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{X_{\sigma}}{X_{\sigma_n}}\right)^2} \quad (2.2)$$

де β , β_n - відносні навантаження статора відповідно за активною та реактивною потужністю; X_{σ} - опір двигуна по поздовжній осі, відповідне насичення магнітного кола при холостому ході і номінальній напрузі статора.

Для синхронних електродвигунів згідно (2.2) збільшення напруги на 10% призводить до відповідної залежності складової індуктивного опору двигуна по поздовжній осі полюсів X_{σ} від завантаження двигунів активною потужністю

$$\frac{X_{\sigma}}{X_{\sigma_n}} = \frac{U}{U_n} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_{\sigma}}{X_{\sigma_n}}\right)^2}}$$

де U - 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 $U_{зв}$ до напруги прямої послідовності $U_{пр}$

—

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).

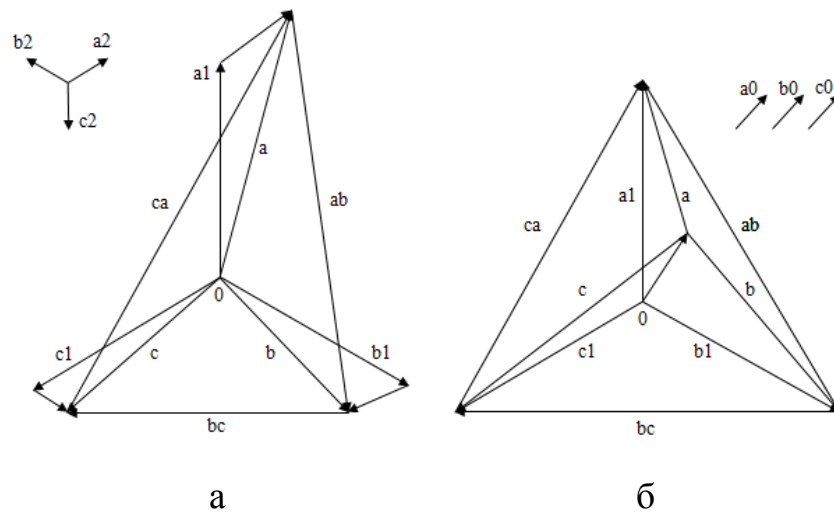


Рис. 2.10 Векторна діаграма напруг

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).

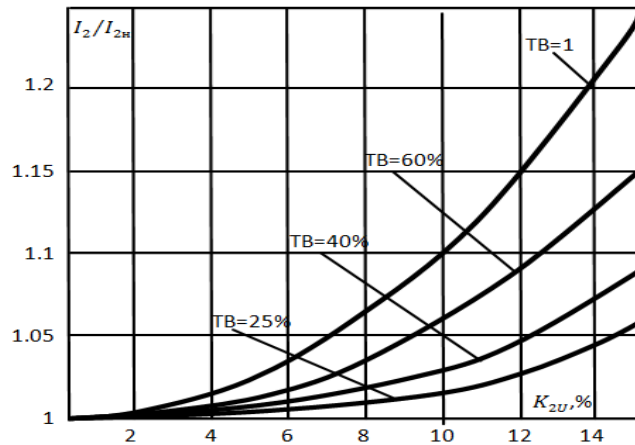


Рис. 2.11 Графіки залежності струму зворотної послідовності для різної тривалості ввімкнення.

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 x_{ad} . Визначимо зміну реактивної складової струму статора з урахуванням зміни насичення

Після розв'язання (2.4) відносно x_{ad} 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].

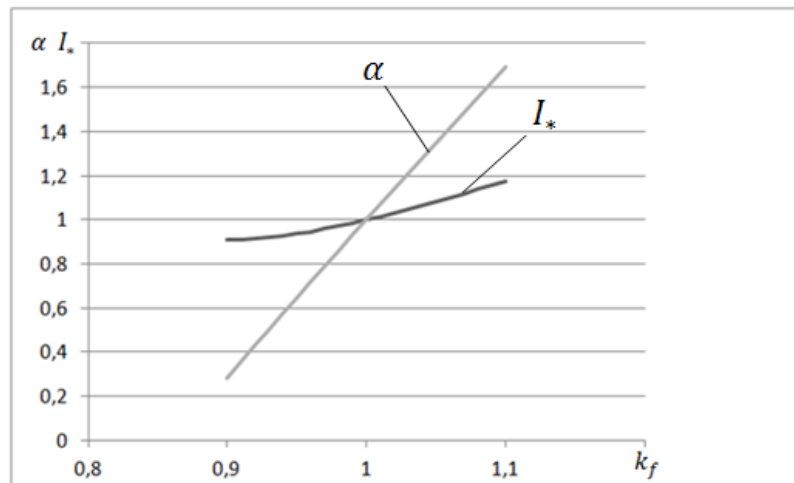


Рис. 2.12 Залежність реактивної потужності () і струму статора () СД від частоти і напруги

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].

2.4 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% (рис. 2.14) [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].

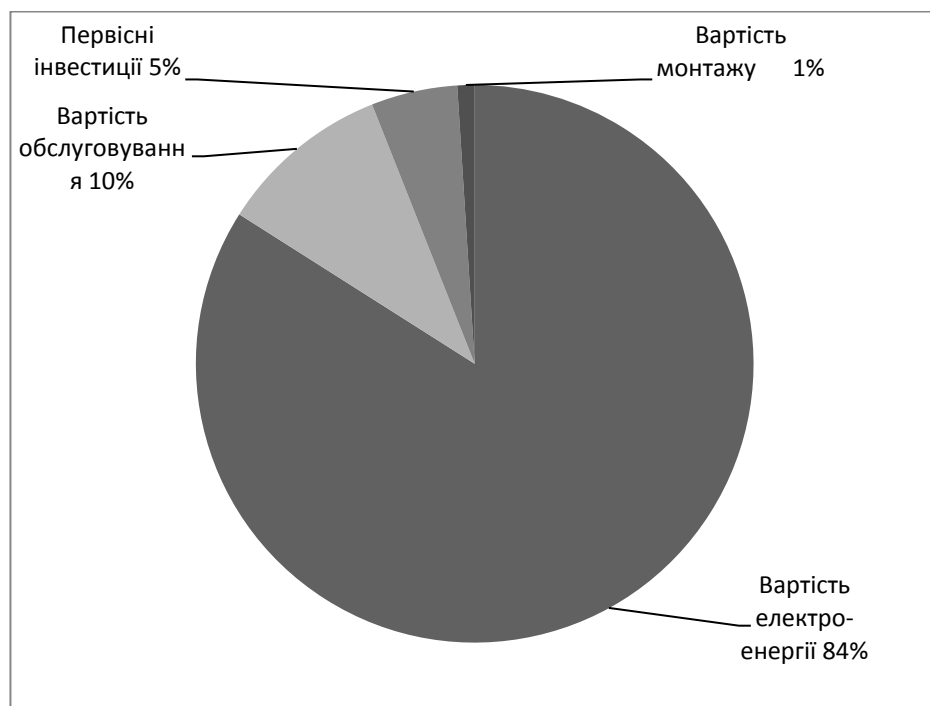


Рис. 2.14 Структура вартості життєвого циклу ЕМС з насосною установкою

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 доквілля, 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.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ШАХТНИХ СТАЦІОНАРНИХ УСТАНОВОК

3.1 Аналіз електроспоживання шахтних установок та механізмів

Найбільш відповідальною ланкою гірничих підприємств є підйомні установки, одинична потужність яких на даний час перевищує 10 МВт. Шахтні підйомні установки видають на поверхню більше половини всіх корисних копалин, а їх питоме енергоспоживання може досягати 30 % [2,4,77].

Тенденція зростання виробничої потужності гірничих підприємств призвела до появи стаціонарного конвеєрного транспорту, що дозволяє збільшити продуктивність і економічність видобутку корисної копалини. Тільки на вугільних шахтах країни довжина стрічкових конвеєризованих виробок становить близько 2700 км, а на відкритих роботах використовуються конвеєри протяжністю до 100 км з довжиною става одного конвеєра до 10 км. Продуктивність таких ліній досягає 20 тис. т/год і більше при ширині стрічки 3 м і швидкості 6-8 м/с [78,79].

Рудникові вентиляторні установки головного провітрювання є одними з найбільших. Продуктивність їх досягає 600 м³/с, енергоспоживання - 30-40%, а одинична потужність привода - 5000 кВт [77,80].

Обстеження Криворізького басейну показали, що більшість вентиляторних установок шахт мають ККД значно нижчий норми (0,6, а в деяких випадках – 0,3–0,4). Лише 22% вентиляторів працюють у зоні економічного використання. Фактично питома витрата потужності в 1,5–2 рази перевищує припустиму величину, а загальна вартість перевитрати електроенергії приводами головних вентиляторів становить четверту частину витрати електроенергії всіма установками за рік.

Це пояснюється тим, що більшість вентиляторів експлуатується поза зоною економічної роботи, тобто режим роботи вентиляторів не відповідає параметрам вентиляційних мереж (невідповідність фактичних значень

еквівалентних отворів вентиляційних напрямків шахт їх проектним значенням; наявність значних підсмоктувань повітря з поверхні через зону обвалення і надшахтні споруди; обладнання вентиляторів нерегульованим приводом тощо).

Причинами низьких енергетичних показників вентиляторів є:

змінний аеродинамічний опір мережі в процесі розроблення шахтного поля, вентилятор вибирається на максимальні значення продуктивності й тиску, що досягаються лише через декілька років роботи, тому вентилятор тривалий час працює в режимах відмінних від розрахункового;

невідповідність реальних величин параметрів вентиляції (кількість метану, довжина і перетин виробок, витоки повітря тощо) розрахунковим, яка призводить до того, що фактичний режим роботи вентилятора значно відрізняється від розрахункового;

зміна величини природної тяги залежно від пори року, а іноді навіть протягом доби, в залежності від температури повітря на поверхні;

зміна метановиділення, що залежить від атмосферних, гірничо-геологічних умов, призводить до простоїв у випадку підвищення припустимої концентрації, а також до перевитрати електроенергії.

Експериментально встановлено, що коливання депресії між лютим і вереснем на деяких шахтах становить 20 мм.вод.ст. при зміні витрати повітря понад 12%. Особливо великі коливання природної тяги спостерігаються в районах з різко континентальним кліматом, де природна тяга має змінний напрямок у різні пори року, а іноді - й часдоби.

Слід урахувати наступне: сезонні коливання тиску і температури навколишнього середовища вимагають регулювання продуктивності в межах 10-15%; за період експлуатації шахти продуктивність може зрости в 1,5-2 рази; зміна добового ритму гірничих робіт (підривні роботи наприкінці змін) вимагає підвищення продуктивності на 15-20%; у святкові і ремонтні дні продуктивність може становити 30-50% робочої.

У вугільній промисловості експлуатується 1500 станцій і 2300 пересувних компресорних установок загальною продуктивністю 110000 м³/хв. Установлена

потужність устаткування на центральних компресорних станціях Кривбасу сягає 12 000 м /хв, потужність привода – 18 МВт, а питоме енергоспоживання на деяких рудниках - 50-60% [77] .

Стаціонарні водовідливні установки вугільної промисловості обладнані 10 тис. насосів загальною потужністю привода 2,2 млн. кВт .

Структура електроспоживання шахти залежить від багатьох чинників, основними з яких є її глибина, водонасиченість, продуктивність тощо (ДСТУ 3224-95 "Енергозбереження. Методи визначення норм витрачання електроенергії гірничими підприємствами"). Згідно з дослідженнями [143-148] структура споживання електроенергії технологічними процесами і установками шахти: видобувні роботи – 5,26%; підготовчі – 1,29%; підземний транспорт – 5,60%; кондиціонування повітря – 10,88%; водовідлив – 14,28%; підйом – 13,32%; вентиляція 17,13%; технологічний комплекс поверхні – 3,75%; вироблення стисненого повітря – 2,46%; інші електроприймачі – 20,58%; освітлення – 0,69%; втрати електроенергії – 4,76%.

З наведених даних видно, що найбільш енергоємними технологічними комплексами є підйомні установки, підземний конвеєрний транспорт, провітрювання, водовідлив. Отже, для зменшення перевитрати електроспоживання шахти необхідно регулювати режими роботи підйомних установок, магістральних конвеєрних ліній, головних вентиляторних та головних водовідливних установок [19]. Ці установки належать до так званих споживачів-регуляторів (СР).

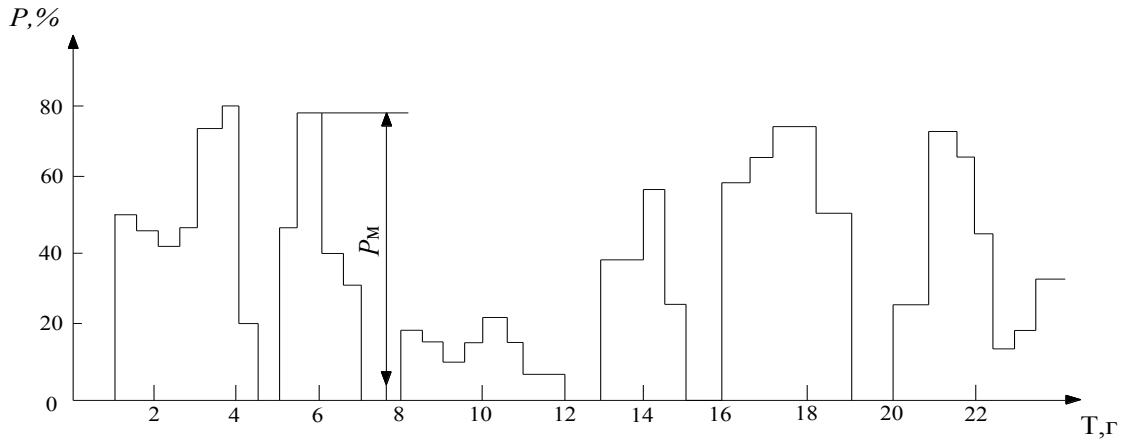
Збільшення електроспоживання гірничою промисловістю викликається не лише абсолютним зростанням виробництва, але і якісними змінами технології, ускладненням гірничо-геологічних умов видобутку корисних копалин, запровадженням природоохоронних заходів. Споживання електроенергії в гірничовидобувній промисловості залежить від багатьох гірничо-технологічних факторів, більшість яких на даний час не враховується в аналізуванні й плануванні на всіх рівнях. На основі досліджень електроспоживання та обсягів видобутку копалини встановлено, що діапазони

регулювання питомого електроспоживання й активної потужності значні навіть у разі збереження попередніх послідовностей технологічних процесів, тобто без зміни форм графіків навантаження, що свідчить про додаткові можливості зниження потужності за рахунок вжиття енергозберігаючих заходів з одночасним зниженням електроспоживання. В області видобутку корисних копалин є певні можливості подібного регулювання навантажень за рахунок енергозбереження та вдосконалення технологічних процесів.

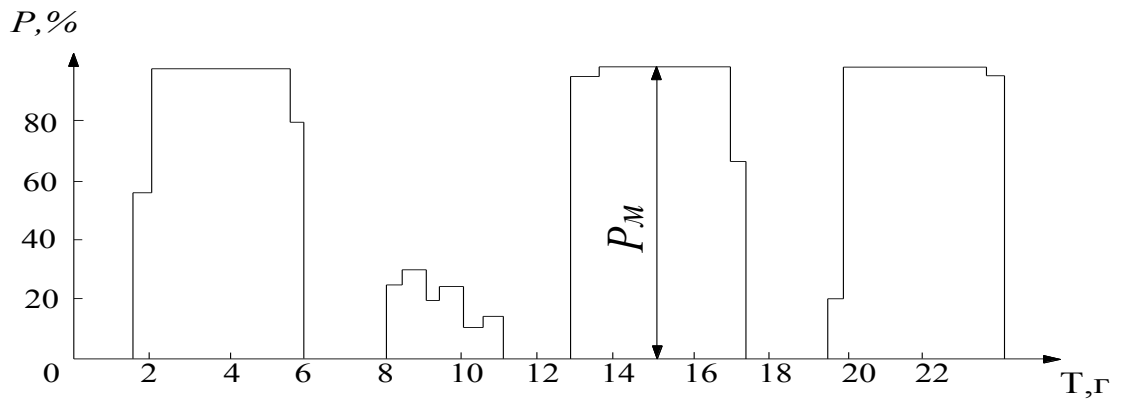
Підйомні установки. На рис. 3.1 наведено ГЕН підйомів, які належать до нерегулярних. На рис. 3.1,а зображено графік вугільного (рудного) або породного підйому, для якого відсутній ємний бункер у приствольному дворі шахти для акумулювання копалини. Відсутність бункера істотно відображається на формі графіка, який показує, що в різні півгодинні інтервали часу виконується неоднакове число циклів підйому вантажу, а отже – потужність у вказані інтервали часу різна.

Разом з тим графік має максимум навантаження, що свідчить про існування хоч би одного такого інтервалу часу, де число циклів підйому вантажів було б максимальним. Така закономірність виявляється не для кожної добової реалізації, але стійка у разі достатньо великого числа реалізацій. Для ГЕН підйомів спостерігається значне зниження його потужності в період ремонтної зміни (з 6 до 12 години) не лише за рахунок відсутності завантаження скіпів (клітей), але і зменшення швидкості руху посудин і кількості виконуваних циклів за інтервал часу. Наявні характерні провали графіка між змінами.

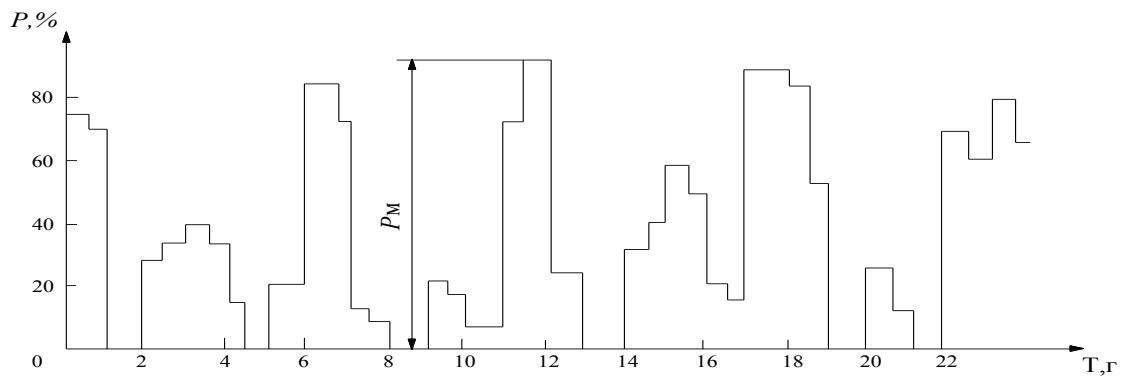
На рис. 3.1,б наведено ГЕН вугільного (рудного) підйому, забезпеченого ємним бункером у приствольному дворі для акумулювання копалини. Наявність бункера помітно вплинула на форму графіка. Згідно ГЕН наявне повне й продуктивне завантаження підйому і, як результат, – менша його зайнятість за часом доби.



а



б



в

Рис. 3.1 Графіки електричних навантажень підйомів:
 а – вугільного (рудного) або породного, без ємного бункера-накопичувача; б – те саме за наявності ємного бункера-накопичувача;
 в – клітьового

Таким чином, існують необхідні передумови для ефективного регулювання режимів електроспоживання. Як і в графіку (рис. 3.1, а) є розриви в роботі підйому між змінами і значне зниження навантаження в ремонтну зміну.

На рис. 3.1, в показано ГЕН клітьового підйому, який працює в режимах підйому-спуску людей і доставлення матеріалів та інших вантажів. Графік також залежить від режиму роботи підйому і має різне навантаження за інтервалами часу доби, характерним є підвищене навантаження між змінами і понижене в період робочих і ремонтних змін. Враховуючи характер режиму роботи підйому кліті, неможливо істотно змінити форму графіка і створити які-небудь передумови до виконання функцій регулювання режимів електроспоживання.

Водовідливні установки. Для ГЕН головного водовідливу (рис. 3.2) характерною є залежність від притоку шахтної води. Його максимум залежить лише від кількості включених в роботу насосів, тому загальне навантаження водовідливної установки визначається розрахунковою потужністю двигуна насоса, помноженою на максимальне число агрегатів, які працюють одночасно.

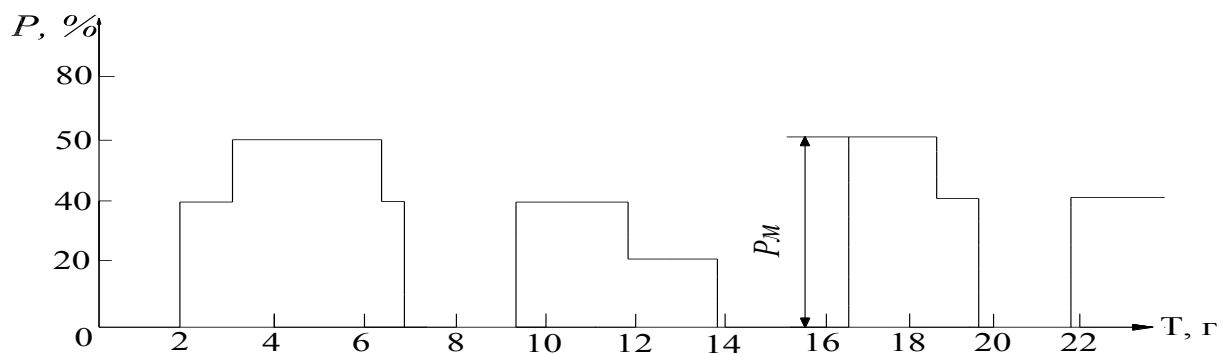


Рис. 3.2 Графік електричних навантажень головного водовідливу

На рис. 3.3 показано ГЕН установки вентилятора. Графік відносно рівномірний і має невеликі відхилення від деякої середньої величини, викликані зміною опору мережі в результаті різних технологічних операцій. Значні зниження навантаження можуть бути на період ремонтної зміни, коли видобуток копалини не відбувається. Це зниження можливе у разі використання регульованого приводу.

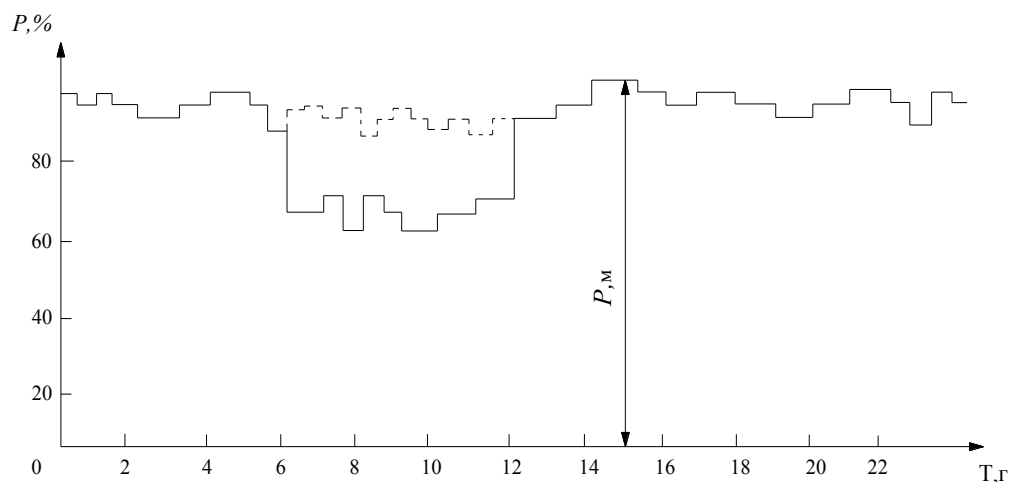


Рис. 3.3 Графік електричних навантажень вентиляторної установки

Аналогічний ГЕН має компресорна станція (рис. 3.4). На ньому відображено деяке зниження навантаження між змінами за рахунок системи регулювання продуктивності компресора, а також значне зниження навантаження в ремонтну зміну, якщо є можливість відключення частини компресорів на цей період. Графік станції холодильних машин аналогічний графіку компресорної станції, але з тією відмінністю, що на період ремонтної зміни машини не відключаються, а робота холодильних машин передбачається сезонною. Визначення розрахункового максимального навантаження виконується так само, як це було вказано для водовідливної установки.

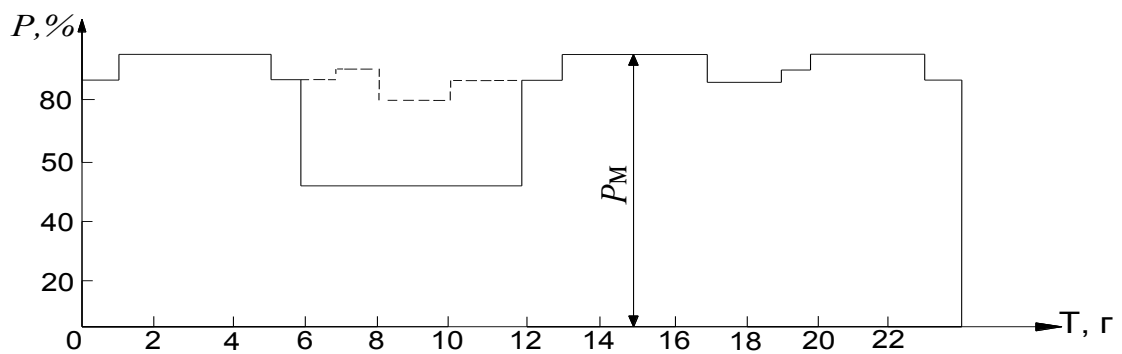


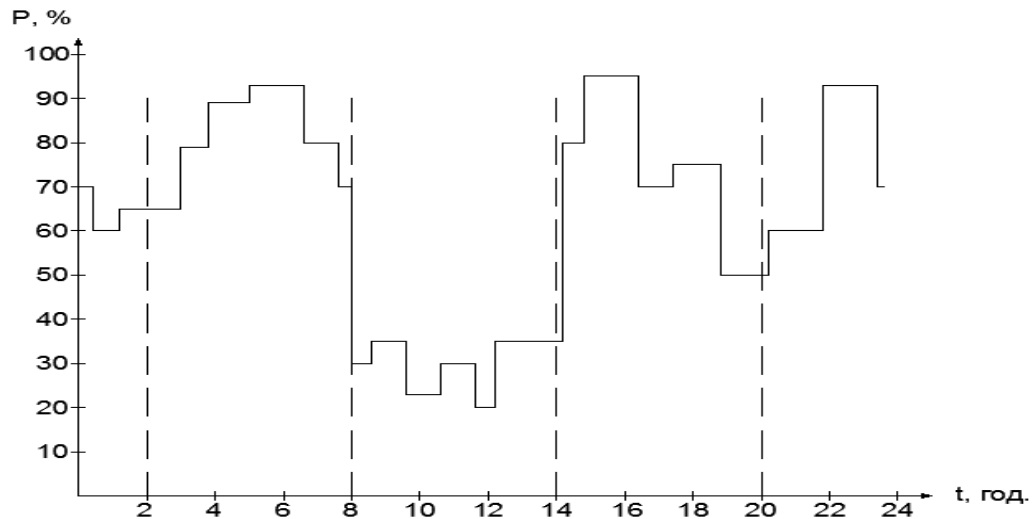
Рис. 3.4 Графік електричних навантажень компресорної станції

Магістральний конвеєрний транспорт. Конвеєрний транспорт шахти за своїм технологічним призначенням є транспортним об'єктом, який обслуговує очисні вибої і, отже, питання про регулювання режимів роботи конвеєрів має реальний сенс лише у порівнянні з інтенсивністю вибійного вантажопотоку.

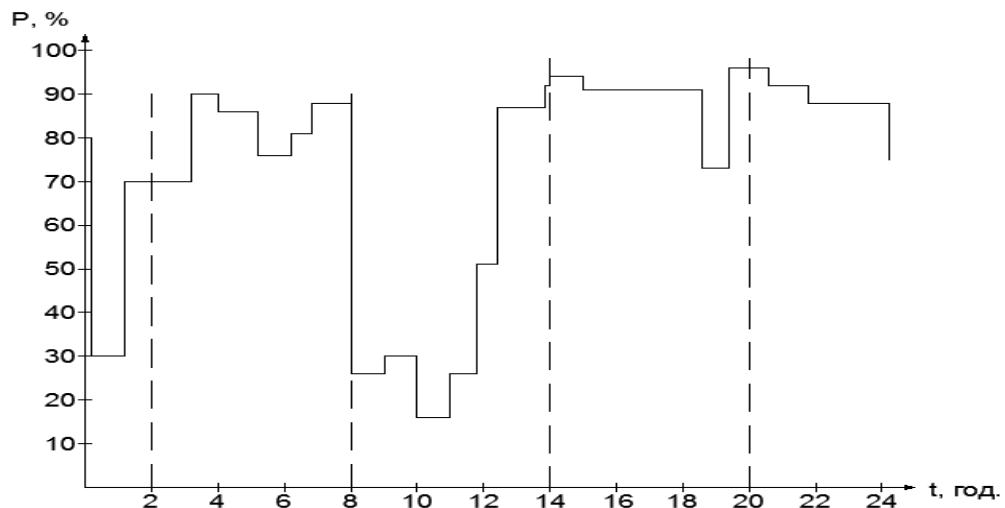
На рис. 3.5 наведено графіки електричних навантажень стрічкових конвеєрів: а - збірного штреку; б - магістрального штреку.

Оптимальне керування за критерієм «мінімальні питомі енерговитрати» може бути досягнуто за рахунок завантаження конвеєра, що забезпечує мінімальну витрату електроенергії на транспортування одиниці ваги вантажу, і скорочення загального часу неробочих пробігів стрічки.

Видобувні та прохідницькі комплекси. ГЕН видобувних та прохідницьких комплексів залежать не лише від технологічного процесу, але й значною мірою – від гірничо-геологічних умов, організації праці, кваліфікації обслуговуючого персоналу тощо. При неправильній організації праці електродвигуни вугільного комбайну отримують електричні перевантаження понад припустимі норми, часті пуски або реверсування, тривалі простої [149].



а



б

Рис. 3.5 Графіки електричних навантажень стрічкових конвеєрів:
а - збирного штреку; б - магістрального штреку

На рис. 3.6 і рис. 3.7 наведено ГЕН видобувного та прохідницького комплексу.

Оскільки електродвигуни працюють не протягом всієї зміни, то середня тривалість роботи двигуна комбайна за зміну характеризується коефіцієнтом машинного часу $K_{\text{маш}} = t_p / T_{\text{зм}}$ де t_p – середній час роботи комбайна за зміну, год.; $T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни, год. Для вітчизняних механізованих комплексів $K_{\text{маш}}$ становить 0,25–0,33 для закордонних – 0,4–0,6.

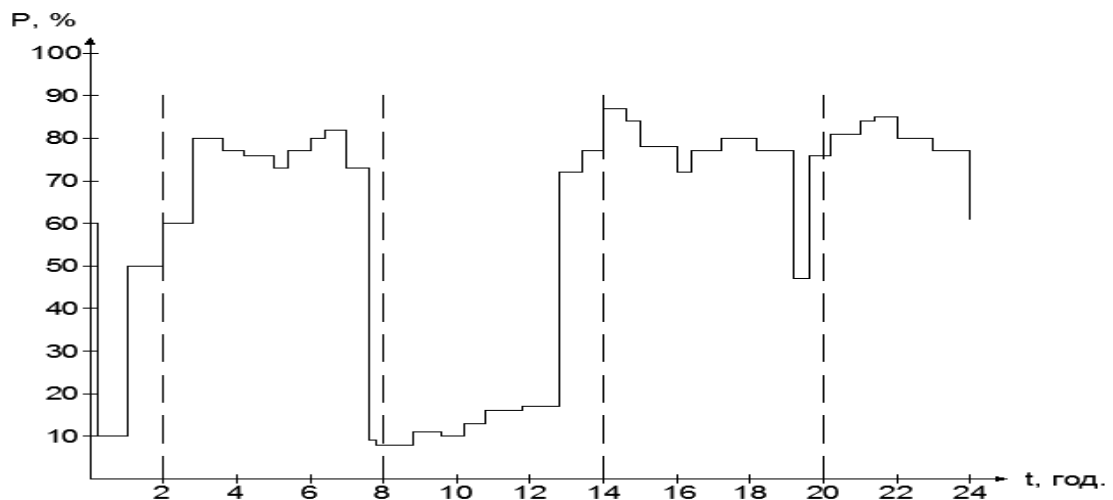


Рис. 3.6 Графік електричних навантажень механізованого видобувного комплексу

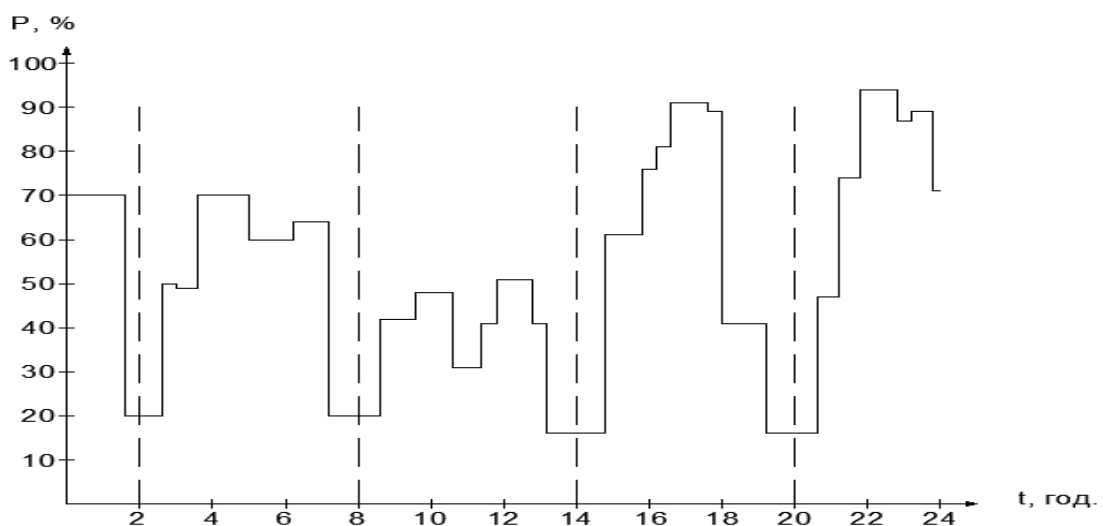


Рис. 3.7 Графік електричних навантажень прохідницького комплексу

Середня потужність електродвигунів у робочому режимі комбайна називається його енергетичною характеристикою й описується залежністю $P = A + BV_{\Pi}$ де A – середня потужність, витрачена електродвигуном при нульовій швидкості подачі комбайна; B – середній приріст потужності на одиницю швидкості подачі або коефіцієнт нахилу енергетичної характеристики; V_{Π} – середня швидкість подачі комбайна. На основі цього

виразу за методикою [149] може бути визначено режим роботи комбайна з урахуванням його максимальної продуктивності або мінімуму витрат часу на виконання заданого обсягу роботи.

3.2 Класифікація графіків електричних навантажень електромеханічних систем циклічної дії

Одним із факторів, які впливають на енергоефективність ЕМС, є її режим навантаження - ГЕН (р. 2, рис. 2.1). Огляд режимів роботи промислових установок показує, що, незважаючи на розмаїття окремих різновидів машин і механізмів, можна виділити обмежену їх кількість, які виконують у різних установках однакові функції й працюють у тому самому режимі та до ЕП яких ставляться однотипні головні вимоги.

За характером технологічного процесу промислові установки і механізми поділяються на дві групи - циклічної дії, робочий процес яких складається з однотипних циклів, що повторюються, і безперервної дії, технологічний процес яких має неперервний характер. Характер технологічного процесу впливає на режими роботи ЕМС і визначає головні вимоги, які ставляться до механізму. Так, до механізмів однакового призначення, наприклад, насосних установок, ставляться істотно відмінні вимоги, якщо один з них працює безперервно, а технологічний процес іншого має циклічний характер (р. 2, рис. 2.3). Таким чином, ГЕН ЕМС є основним показником, за яким слід класифікувати режим її роботи [81-83].

Класифікація ГЕН ЕМС циклічної дії (рис. 3.8, 3.9) здійснюється на підставі істотних ознак відповідних математичних моделей [24]. Усі ГЕН поділяються на дві групи - детерміновані й стохастичні [84]. Детермінований сигнал повністю відомий, стохастичний сигнал у будь-який момент часу являє собою випадкову величину, що набуває конкретних значень з деякою ймовірністю.

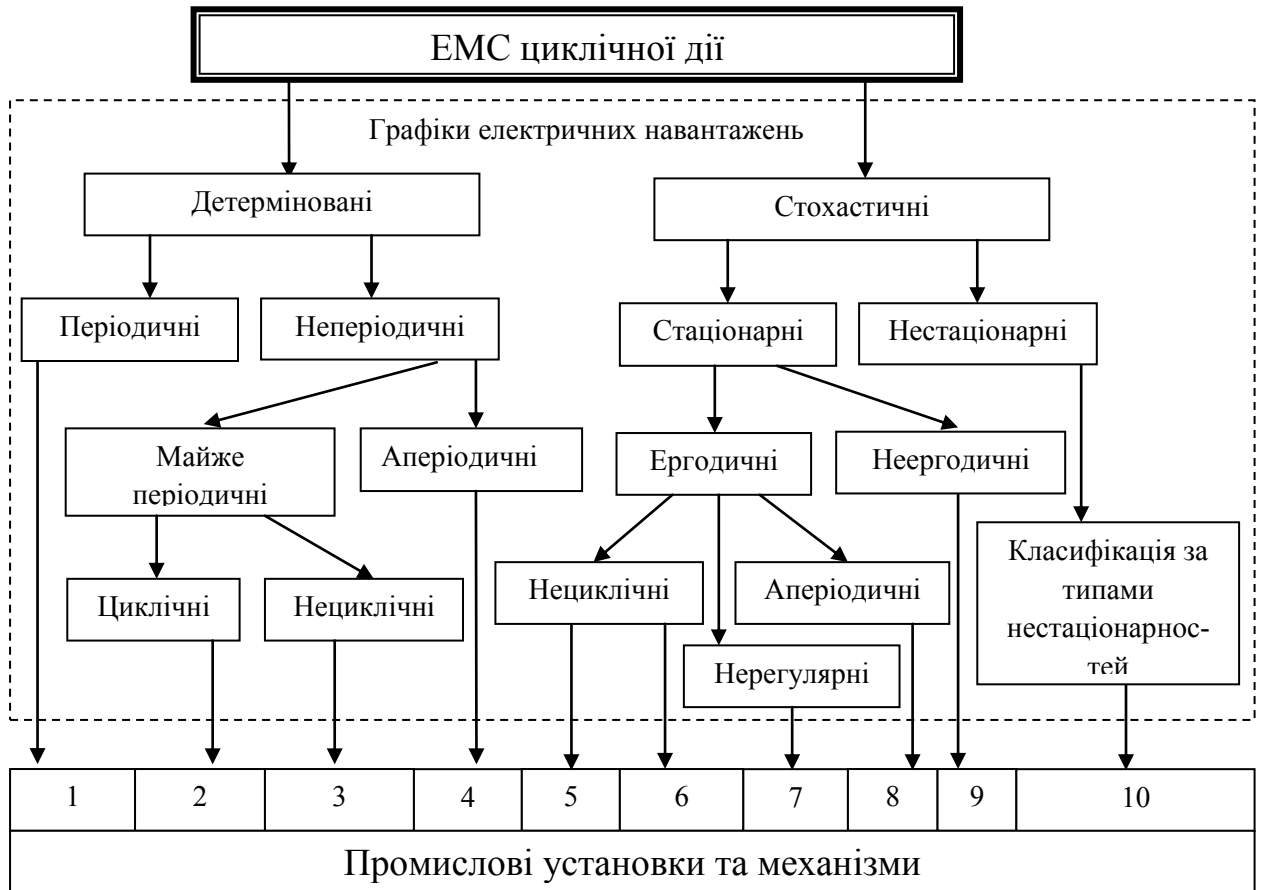


Рис. 3.8 Схема класифікації ГЕН EMC циклічної дії

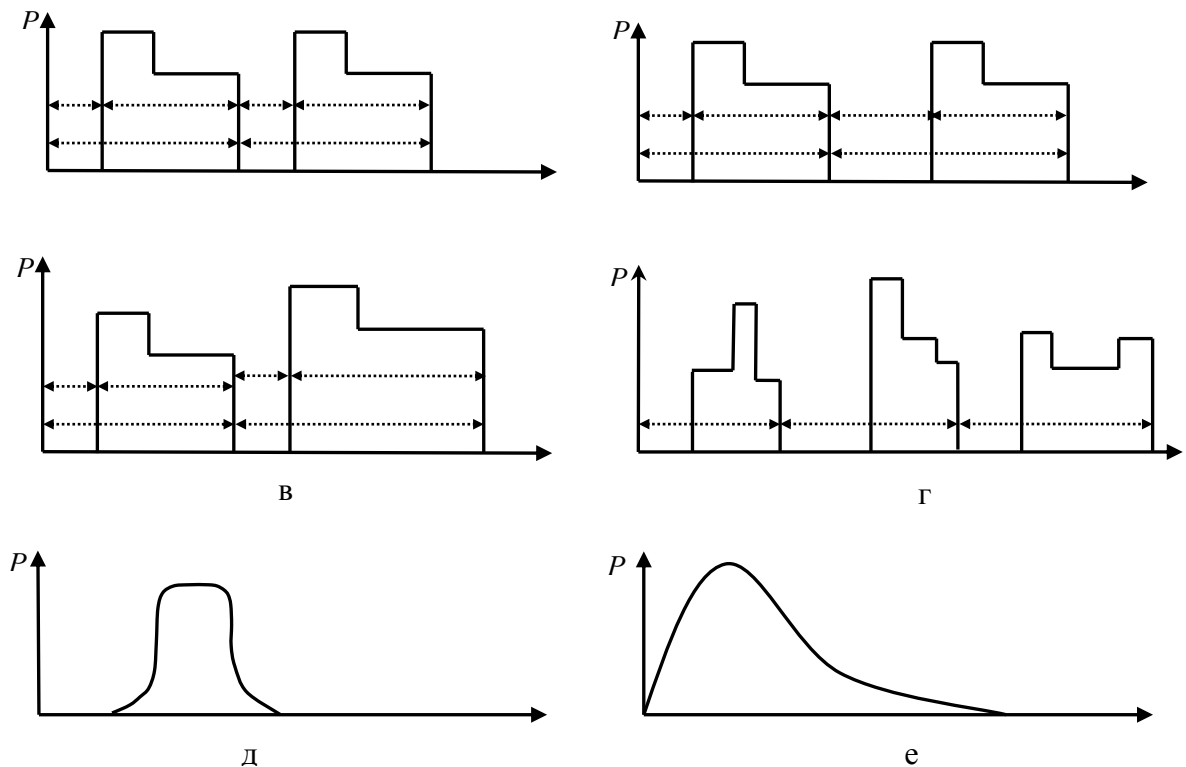


Рис. 3.9 Індивідуальні ГЕН: а - періодичний; б - циклічний; в - нециклічний; г - нерегулярний, д (е) – аперіодичний (імпульсний)

Приналежність того або іншого процесу споживання електроенергії ЕМС у ході технологічного процесу до детермінованого або випадкового типу найчастіше не є безперечною. З математичних позицій групи (підкласи) у класифікації називають множинами, у які поєднують ГЕН за якою-небудь загальною властивістю. Приналежність механізму (технологічного процесу) s до множини L_P записується у вигляді $s \in L_P$, де P – певна властивість даної множини ГЕН.

Один цикл дискретного індивідуального ГЕН певного механізму можна представити як послідовність з N імпульсів (інтервалів роботи в циклі) різної амплітуди. Якщо прийняти, що цикл починається у момент t_0 , то час початку k -ого інтервалу t_k , а час закінчення – $t_k + \tau_k$. Загальний ГЕН буде дорівнювати сумі графіків окремих інтервалів роботи. За допомогою функції Хевісайда можна записати

$$s(t) = \sum_{k=1}^N A_k H(t - t_k) - \sum_{k=1}^N A_k H(t - t_k - \tau_k)$$

де A_k – величина навантаження у k -й інтервал циклу; τ_k – тривалість i -ого інтервалу роботи.

З точки зору регулярності режимів приймачів детерміновані ГЕН можна поділити на два класи – періодичні й неперіодичні [85].

Періодичний ГЕН на рис. 3.9,а відповідає строго ритмічному процесу роботи з однаковими потужностями й часом T з періодом T , де T – повний час циклу; t_r – час роботи; t_z – час зупинки (паузи). Такі графіки мають, наприклад, окремі верстати і механізми в автоматичних потокових лініях (рис. 3.8, п.1).

За відомою функцією для одного циклу роботи механізму можна отримати рівняння для періодичного навантаження, віднявши від аргументу тривалість циклів, які завершилися від моменту початку роботи, а саме – $t - nT$, де

— кількість завершених циклів, яку можна знайти як $n = \left(\frac{t}{T} \right) - \text{ціла частина числа}$). Отже, для періодичного графіку навантаження можна записати рівняння

$$P(t) = P_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (3.1)$$

Неперіодичні ГЕН можна поділити на майже періодичні й аперіодичні. Майже періодичні у свою чергу - на циклічні й нециклічні.

Майже періодичні графіки, згідно [83], в усталеному режимі роботи задовольняють умові узагальненої періодичності, що означає стабільність витрати електроенергії. Майже періодичні гармонічні процеси визначаються математично як функція часу виду [86]

Облік усього різноманіття ГЕН у аналітичних методах розрахунку навантаження складний, тому йдуть на спрощення цих графіків, що в ряді випадків знижує точність [83]. Циклічні графіки (рис. 3.9, б) характерні для потокових ліній, де є ручні операції, наприклад, встановлення, припасування деталей, їх знімання тощо, а також установок із цикловою автоматизацією - шахтні скіпові підйомні установки (рис. 3.8, п.2). Ці графіки відповідають виробництву, де періодичність порушується через зміни тривалості пауз окремих циклів ($t_{\text{цикл}} = t_{\text{роб}} + t_{\text{пауз}}$) і характеризує непотокове, але циклічне виробництво. Тривалість робочих інтервалів $t_{\text{роб}}$ і характер відповідних ділянок графіка залишаються, як правило, практично незмінними. Тривалість пауз $t_{\text{пауз}}$ і циклів $t_{\text{цикл}}$ у таких графіках за різні цикли різні й змінюються за випадковим законом. Таким чином, незважаючи на неоднаковість пауз, існує середня тривалість циклу $T = \frac{t_{\text{роб}} + t_{\text{пауз}}}{n}$ де n — кількість циклів.

Для циклічного графіку навантаження характерна різна тривалість циклів роботи. У цьому випадку тривалість циклів, які завершилися від моменту початку роботи, потрібно знаходити за виразом

$$(3.2)$$

де t_j – тривалість j -ого циклу.

Нециклічні графіки (рис. 3.9, в) мають ЕМС, у яких повторювані операції строго не регламентовані, наприклад, верстати на ремонтних ділянках, шахтні клітьові підйомні установки, ліфти, підйомні крани, канатні дороги, приймачі кранів шихтованого мартенівського цеху тощо (рис. 3.9, п.3). У цьому випадку характер графіка істотно змінюється. Випадковими є всі значення часу

Змінюється й величина навантаження від циклу до циклу. Тривалість робочих інтервалів, як і пауз, різна, тобто

;

За виглядом нециклічний ГЕН здається зовсім нерегулярним. Але оскільки ЕМС беруть участь у виконанні певного планового виробничого завдання (наприклад, змінного), нециклічний графік подібний періодичному й циклічному і характеризується стабільністю споживання активної електроенергії за середню тривалість циклу групи агрегатів, до одного із яких належить даний приймач. Для нециклічного графіка характерна змінна величина навантаження для різних циклів роботи. Її можна представити як функцію номера циклу, який розглядається,

$$(3.3)$$

де $P_{k,p}$ – величина навантаження у k -ий інтервал p -ого циклу.

Для визначення навантажень урахування всіх особливостей форми індивідуальних графіків не завжди потрібне, тому цілком припустиме приведення менш регулярних індивідуальних ГЕН до більш регулярного типу. Наприклад, циклічний графік може бути замінений еквівалентним йому періодичним з періодом, який дорівнює середній тривалості базового часу із циклічного графіка.

Аперіодичні (імпульсні) графіки (рис. 3.9,д,е) становлять групу неперіодичних ГЕН і представляються формами, які існують у межах кінцевих часових інтервалів. Аперіодичні графіки характерні для багатоопераційних верстатів із кроковим ЕП на ремонтних ділянках (рис. 3.8, п.4).

Аперіодичні графіки задаються довільними функціями часу. До аперіодичних графіків належать також імпульсні, які являють собою сигнали зазвичай досить простої форми, що існують у межах кінцевих часових інтервалів. Основними характеристиками імпульсних графіків є частота проходження імпульсів ν , середнє й ефективне значення потужності та фактична тривалість ввімкнення $T_{B\phi}$ [83].

На відміну від попередніх графік стохастичного навантаження не може бути виражений детермінованою функцією часу. У реєстрації випадкового процесу реалізується лише один з можливих варіантів (виходів) випадкового процесу, а досить повний і точний опис процесу в цілому можна зробити лише після багаторазового повторення спостережень і обчислення певних статистичних характеристик ансамблю реалізацій ГЕН.

Випадкові процеси поділяються на стаціонарні й нестаціонарні [86]. Випадкові стаціонарні ГЕН зберігають свої статистичні характеристики в послідовних реалізаціях випадкового процесу. У свою чергу стаціонарні графіки поділяються на ергодичні й неергодичні [87].

Ергодичні ГЕН можна поділити на нециклічні й нерегулярні. Нециклічні графіки мають ЕП основних механізмів екскаватора – підйому, напору, тяги (рис. 3.8 п.5) і повороту (рис. 3.8, п.6).

Нерегулярні графіки (рис. 3.9,г) зустрічаються рідше. Їх мають

електроприводи механізмів, які обслуговують технологічні процеси несталого характеру. У цьому випадку характер ГЕН на робочих ділянках істотно змінюється, тривалість робочих інтервалів і пауз різна. Умова стабільності споживання електроенергії не виконується. До них належать механізми буріння свердловин великої глибини, голчастого гідрозатвору для пропускання води, розвідувального буріння, пересування екскаватора, шахтні водовідливні установки тощо (рис. 3.8, п.7). Наприклад, механізм буріння свердловин великої глибини створює нерегулярний ГЕН, оскільки твердість породи та її товщина весь час змінюються.

Для нерегулярного графіка характерна ще й різна тривалість інтервалів роботи для різних циклів. Її теж можна представити як функцію номера циклу, який розглядається,

$$, \quad (3.4)$$

де t_i – тривалість i -ого інтервалу роботи p -ого циклу.

Моделювання в середовищі MATLAB періодичного, циклічного, нециклічного і нерегулярного ГЕН за рівняннями Хевісайда (3.1) - (3.4) відповідно показало достатню для інженерної практики точність.

Аперіодичні (ергодичні) графіки характерні для електроінструменту - електроперфоратори, відбійні електромолотки тощо (рис. 3.8, п.8).

До неергодичних ГЕН слід віднести ті самі механізми, що й для нерегулярного графіка, але в одиничній реалізації (рис. 3.8, п.9).

Нестаціонарні режими мають місце за несталих робочих умов. Не існує загального методу - кожний технологічний процес або клас процесів вимагає спеціального розгляду. До нестаціонарних ГЕН належать ті само, що й у п.8 на рис. 3.9, які не зберігають свої статистичні характеристики у послідовних реалізаціях випадкового процесу (рис. 3.8, п.10). Подальша класифікація

нестационарних випадкових ГЕН здійснюється за особливостями їх нестационарностей.

3.3 Класифікація графіків електричних навантажень електромеханічних систем безперервної дії

Класифікація ГЕН механізмів безперервної дії (рис. 3.10, 3.11) здійснюється на підставі істотних ознак відповідних математичних моделей ГЕН [25].

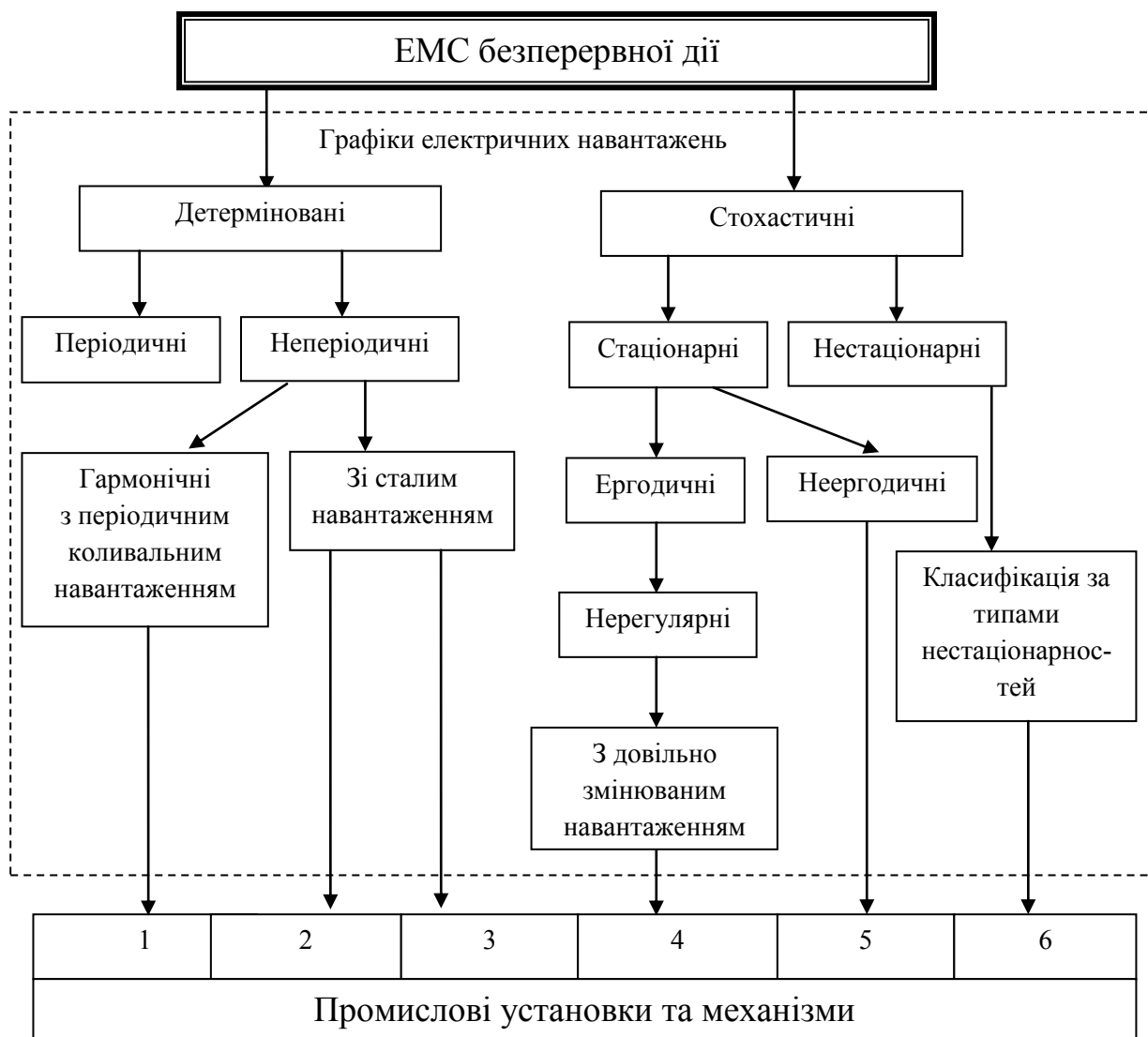


Рис. 3.10 Схема класифікації ГЕН ЕМС безперервної дії

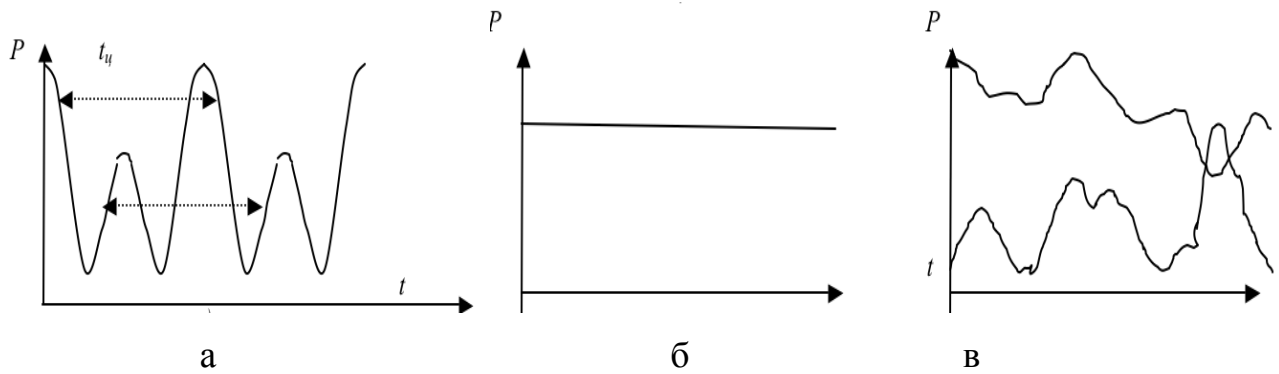


Рис. 3.11 ГЕН: а - навантаження, що періодично змінюється;
 б - стале навантаження; в - навантаження, що змінюється нерегулярно

Усі ГЕН поділяються на дві групи – детерміновані й випадкові [84,85]. До детермінованих ГЕН механізмів з безперервними характеристиками варто віднести періодичні й неперіодичні графіки.

Періодичні ГЕН із коливним навантаженням характеризуються умовою

де $i = 1, 2, 3, \dots$ – будь-яке ціле число (з множини цілих чисел від $-\infty$ до $+\infty$), T - період, що є скінченним відрізком незалежної змінної

Протягом часу T значення навантаження $X(t) > 0$, а X_{cp} за будь-який період часу T однакові за величиною (рис. 3.11,а).

Періодичний графік навантаження з гармонічно коливальним навантаженням виражається формулою [89]

де X – амплітуда, ω – циклічна частота в Гц, $x(t)$ – миттєве значення амплітуди в момент t .

Такі процеси можна відобразити математичною моделлю у вигляді залежності миттєвого значення від часу або у вигляді залежності амплітуди від частоти (частотного спектру). Періодичні графіки з гармонічно коливальним навантаженням характерні для ЕП поршневих механізмів (компресори невеликої й середньої потужності, рідше - насоси) (рис. 3.10, п.1).

Неперіодичні графіки зі сталим навантаженням мають ЕП конвеєрних установок, кільцевих канатних доріг, вертикальних ковшових елеваторів з накопичувальною ємністю з дозатором (рис. 3.10, п.2).

Стале навантаження (рис. 3.11, б) є незмінним у часі й відповідає умові

До цієї групи належать відцентрові механізми – вентилятори, компресори, насоси, димососи, газодувки газових магістралей, гребні гвинти, аеродинамічні труби та інші, зі сталим навантаженням (рис. 3.10, п.3). Незначними коливаннями навантаження можна знехтувати.

Нерегулярні ГЕН із довільно змінним навантаженням (рис. 3.11, в) мають ЕП конвеєрних установок без накопичувальної ємності, шкребкові конвеєри, конвеєри роторних екскаваторів, ескалатори, насоси систем тепlopостачання з кількісним регулюванням, каналізаційні й технологічні насоси перекачування рідини різної в'язкості (рис. 3.10, п.4).

До неергодичних ГЕН слід віднести ті самі механізми, що й для нерегулярного графіка, але в одиничній реалізації (рис. 3.10, п.5).

Нестаціонарними ГЕН бувають за несталих робочих умов. Для визначення законів розподілу випадкових нестаціонарних змін навантаження, тривалості ввімкнення, пауз і циклів повинно бути записано не менше 100 циклів роботи [83]. Визначити клас випадкового процесу можна за його АКФ [87].

До нестационарних належать ті самі графіки механізмів, що й у п. 4 на рис. 3.10, які не зберігають свої статистичні характеристики у послідовних реалізаціях випадкового процесу (рис. 3.10, п.6). Подальша класифікація нестационарних випадкових ГЕН здійснюється за особливостями їх нестационарностей.

У більшості випадків на електричне навантаження впливає багато чинників, внаслідок чого практично неможливо визначити вплив кожного з них окремо. Тому змінюється стохастично. Вищенаведені графіки найчастіш ідеалізовані, і лише за цієї умови їх можна описати за допомогою детермінованої функції.

3.4 Апроксимація автокореляційних функцій процесу електроспоживання електромеханічних систем

В індивідуальних ГЕН послідовність ординат ЕН визначається технологічним процесом. Взаємозв'язок ординат ГЕН характеризує автокореляційна функція (АКФ). Вибір моделі АКФ здійснюється на основі апріорної інформації про властивості досліджуваного процесу. Незалежно від методу апроксимації необхідним є визначення параметрів моделі АКФ, які задовольняють вибраному критерію наближення. Знання моделі АКФ і числових значень її параметрів дозволяє моделювати процес електроспоживання ЕМС.

Як модель АКФ найчастіше приймають комбінацію скінченної кількості функцій (можлива апроксимація однією функцією) або ряд деякої системи функцій (можлива апроксимація статистичними рядами, рядами за дисперсіями похідних, ортогональними поліномами й функціями, асимптотичними рядами) [90,91].

Перевага апроксимативного підходу зумовлює можливість використання аналітичного виразу для подальших досліджень і перетворень з метою одержання узагальнених характеристик. Від кількості невідомих параметрів

АКФ значною мірою залежить складність і зручність отриманої моделі для використання.

Дослідження показали, що в аналізі випадкових процесів найчастіше зустрічаються загасаючі експонентні й експонентно-косинусні АКФ [92,93]. Згідно [94] такий підхід може застосовуватися для створення інформаційно-вимірювальних комплексів.

Типові моделі нормованих АКФ, поширених на практиці, наведено в табл. 3.1 [94], де α – параметр АКФ обернений часу кореляції, ω – частота періодичної складової.

У праці [95], для стаціонарного процесу навантаження нормована АКФ апроксимується виразом

,

де $\eta, \beta, \gamma, \lambda, \delta, \mu$ – емпіричні параметри, кожен з яких для різних режимів роботи ЕП набуває різних значень, зокрема нульових.

Як критерій наближення доцільно застосувати точнісні критерії [96].

Таблиця 3.1

Типові моделі нормованих АКФ

№ з/п	Вид моделі
1	
2	
3	
4	
5	
6)
7	

Практика показує, що найдоцільніше застосовувати квадратичне наближення [94, 97]. У такий спосіб за вибраної аналітичної моделі АКФ задача зводиться до визначення невідомих параметрів, які задовольняють мінімуму квадратичної похибки

Подальшим кроком вирішення задачі апроксимації АКФ параметричними моделями є складання системи рівнянь (у випадку однопараметричних моделей - рівняння) для визначення невідомих параметрів. З урахуванням того, що вихідними даними для оброблення є масив значень ординат нормованої АКФ – y_k , критерій наближення

(3.5)

Якщо модель містить один параметр, задача зводиться до розв'язування одного рівняння. Для цього необхідно підставити y_k в (2.5), виконати диференціювання й результат прирівняти до нуля

Для розв'язання отриманого рівняння використано метод Ньютона [98].

Тоді

$$\frac{dF}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} \left(\sum_{k=0}^{N-1} (y_k - \hat{y}_k)^2 \right)$$

де

Початкове наближення — [94]. Процес обчислення закінчується, коли , де ε - будь-яке мале наперед задане число.

Аналітичний вираз застосовується для апроксимації АКФ групового ГЕН й індивідуального безперервного ГЕН ЕМС. Параметр моделі визначається в результаті розв’язування рівняння

$$\text{-----},$$

де

Аналітичний вираз застосовується в апроксимації АКФ індивідуального циклічного ГЕН ЕМС. Параметри моделі визначаються в результаті розв’язування методом Ньютона системи двох трансцендентних рівнянь

$$\begin{aligned} &\text{-----} \\ &\text{-----} \end{aligned},$$

де

;

;

;

Початкові значення α й вибираються в такий спосіб [94]

$$\text{-----}, \text{-----}.$$

де Δt - інтервал часу, що відповідає першому перетинанню τ осі абсцис.

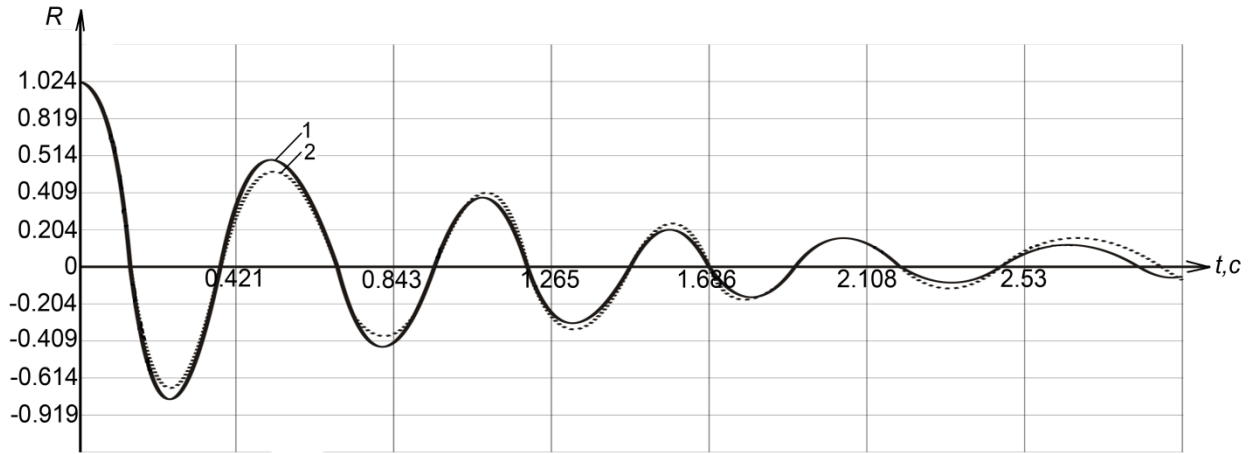
Процес обчислення закінчується у разі спільного виконання умов

Також зустрічаються ГЕН, АКФ яких відповідають моделям №2, №3, №4, №6, №7 (табл. 3.1) [100]. Наприклад, моделям №6 і №7 відповідають ЕН порталних кранів річкових і морських портів, а також ЕМС на підприємствах з виробництва будівельної кераміки.

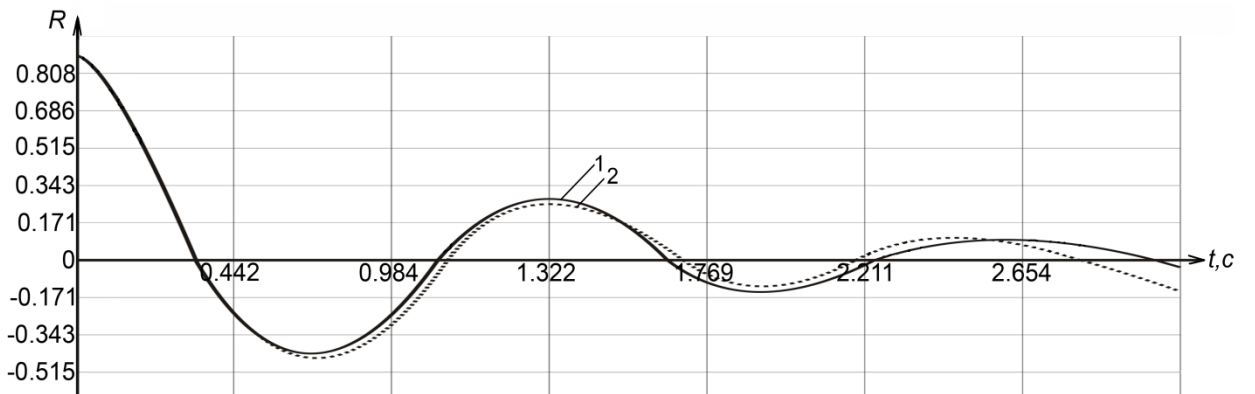
Система рівнянь із використанням методу Ньютона з аналітичним визначенням першої й другої похідних має досить складний вигляд. Для апроксимації АКФ заданого виду можна також використовувати метод Ньютона з кінцево-різницеvими похідними або метод деформованого багатогранника Нелдера й Міда [101].

У більшості випадків для однакових параметрів АКФ всі три методи забезпечують однакові похибки апроксимації. Похибка апроксимації з обсягом вибірки n , де τ - операція взяття цілої частини, Δt - максимальний інтервал кореляції, Δx - крок дискретизації, у більшості випадків забезпечує припустиму точність, що підтверджується даними, наведеними у [94].

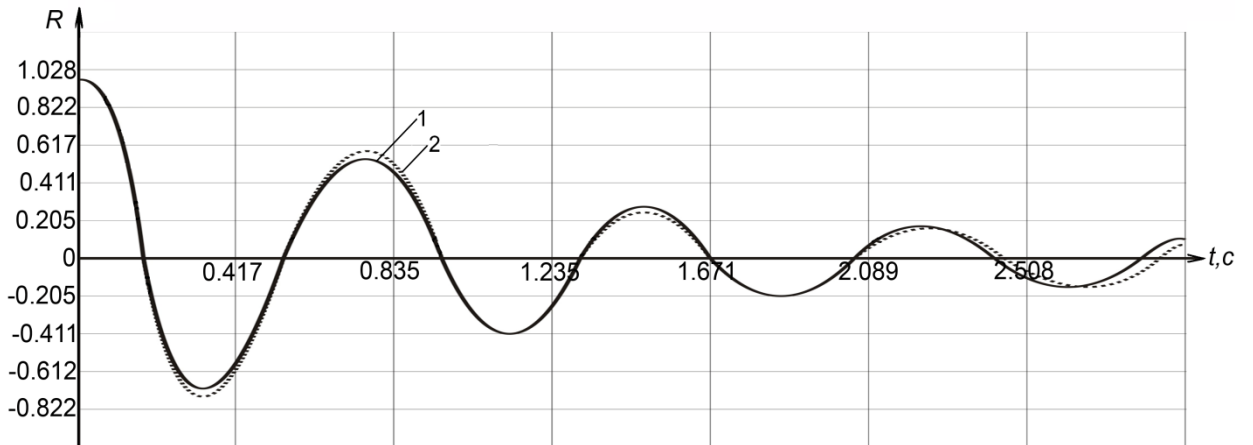
На рис. 3.12 наведено АКФ, визначені за експериментальними ГЕН насосної установки і апроксимовані виразами (табл. 3.1).



а



б



в

Рис. 3.12 Теоретичні (1) та експериментальні (2) АКФ:

- а - $\tau = 1,12$, $\omega = 12$, $\sigma = 0,0286$;
- б - $\tau = 1$, $\omega = 5$, $\sigma = 0,0496$;
- в - $\tau = 0,83$, $\omega = 8,44$, $\sigma = 0,0064$

3.5 Вибір кроку дискретизації процесу електроспоживання електромеханічних систем

Для вимірювання й подальшого оброблення даних щодо ефективності електроспоживання ЕМС за допомогою цифрових технічних засобів необхідно перетворити досліджуваний процес у дискретну форму. Виникає завдання визначення кроку дискретизації, який би задовольняв вимогам процесу діагностування. Величина кроку дискретизації повинна бути вибрана, виходячи з розумного компромісу між вимогою точності вимірюваного процесу й апаратних можливостей [102].

Для вибору методу дискретизації необхідно сформулювати критерій вибору відліків, установити процедуру відновлення за ними вихідного сигналу й мати можливість визначити виникаючу похибку [103].

Використаємо дискретизацію за критерієм середньоквадратичної похибки, відповідно до формули [24,25,103]

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \hat{x}[n])^2, \quad (3.6)$$

де σ – середньоквадратична похибка для ступінчатої апроксимації, значення кореляційної функції процесу у точці n .

Значення інтервалу дискретизації залежить від виду АКФ, її параметрів, необхідної точності обчислення АКФ і способу інтерполяції кореляційних функцій між вузлами [92].

Стаціонарність процесу електроспоживання зумовлена тим, що ЕМС працюють ритмічно, відповідно до планових завдань. Нестационарний процес, по можливості, доцільно розбивати на ділянки стаціонарності, у межах яких АКФ не залежить від часу. Для ЕМС, які працюють в стаціонарному режимі з деякою нестрогою періодичністю, АКФ може бути апроксимована виразом [104,105]

$$K(\tau) = K(0) \exp(-\alpha|\tau|), \quad (3.7)$$

де σ – дисперсія індивідуального ГЕН.

Для АКФ (2.7) індивідуального ГЕН, що відповідає граничному режиму роботи (імпульсний режим «увімкнено – вимкнено») [106]

$$K_{\text{акф}} = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{зав}}} \cdot K_{\text{вк}}, \quad (3.8)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальне навантаження, кВт; $K_{\text{вк}}$ – коефіцієнт використання, $K_{\text{зав}}$ – коефіцієнт завантаження.

Оскільки коефіцієнт використання $K_{\text{вк}} = \frac{P_{\text{акф}}}{P_{\text{ном}}}$, параметр

$$K_{\text{акф}} = \frac{P_{\text{акф}}}{P_{\text{зав}}}, \quad (3.9)$$

де $K_{\text{акф}}$ – коефіцієнт увімкнення, який характеризує використання ЕП у часі і визначається виразом $K_{\text{акф}} = \frac{P_{\text{акф}}}{P_{\text{ном}}}$, являючи собою ймовірність увімкненого стану ЕП.

Таким чином, для ЕМС, які працюють у стаціонарному режимі з певною періодичністю, вираз (2.7) набуває вигляду

$$P_{\text{акф}} = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{акф}}. \quad (3.10)$$

Рівняння (2.10) не має параметричного аналітичного розв'язку. Приймаємо середньоквадратичну похибку відновлення сигналу 5% від номінальної потужності двигуна, а дисперсію ГЕН виражаємо у вигляді

$$\sigma^2 = \frac{P_{\text{ном}}^2}{n} \cdot K_{\text{акф}}^2$$

З огляду на те, що $P_{\text{акф}} = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{акф}}$, а $P_{\text{зав}} = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{зав}}$, де $K_{\text{зав}}$ – відносна потужність у момент часу t , вираз (3.4) можна переписати у вигляді

$$P_{\text{акф}} = P_{\text{зав}} \cdot K_{\text{акф}}. \quad (3.11)$$

Позначивши відносну дисперсію ГЕН, як

– , одержимо . Таким чином, рівняння (3.10) можна представити у вигляді

$$(3.11)$$

Аналізуючи типові ГЕН ЕМС для різних технологічних процесів, наприклад, наведених в [107], а також узявши два крайніх випадки ГЕН за характером зміни потужності, а саме – стале й імпульсне навантаження в режимі ввімкнення-вимкнення – можна зробити висновок, що відносна дисперсія ГЕН може бути обмежена . У виразі враховано, що , або .

Враховуючи в (3.9), що, як правило, , а також, беручи до уваги (3.11), можна одержати графіки для вибору кроку дискретизації залежно від тривалості циклу роботи ЕМС (рис. 3.13–3.15).

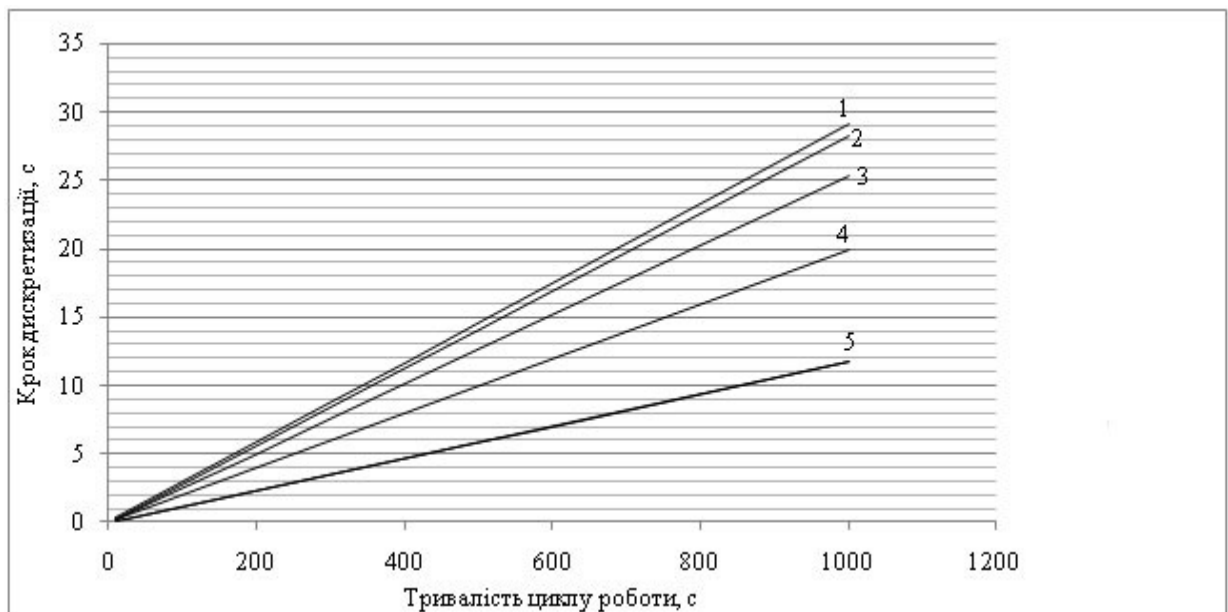


Рис. 3.13 Залежність кроку дискретизації від тривалості циклу роботи різних значень коефіцієнту ввімкнення та відносного середньоквадратичного відхилення $\sigma_p^* = 0,1$: 1 – $k_B 0,1$ або $0,9$; 2 – $k_B 0,2$ або $0,8$; 3 – $k_B 0,3$ або $0,7$; 4 – $k_B 0,4$ або $0,6$; 5 – $k_B 0,5$

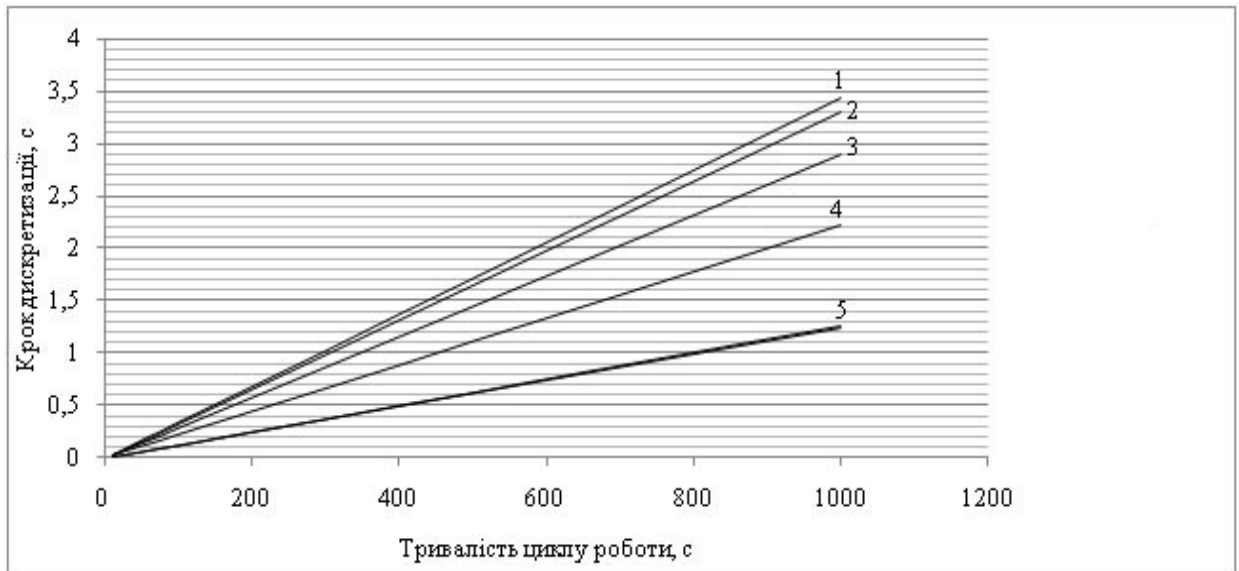


Рис. 3.14 Залежність кроку дискретизації від тривалості циклу роботи для різних значень коефіцієнту ввімкнення та відносного середньоквадратичного відхилення $\sigma_p^* = 0,3$: 1 – k_B 0,1 або 0,9; 2 – k_B 0,2 або 0,8; 3 – k_B 0,3 або 0,7; 4 – k_B 0,4 або 0,6; 5 – k_B 0,5.

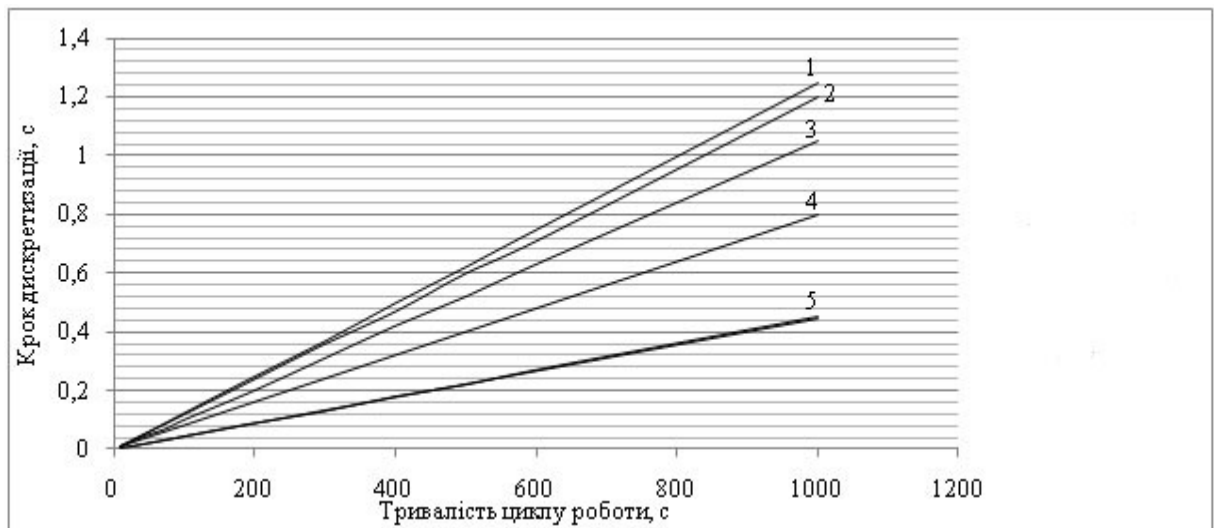


Рис. 3.15 Залежність кроку дискретизації від тривалості циклу роботи для різних значень коефіцієнту ввімкнення та відносного середньоквадратичного відхилення $\sigma_p^* = 0,5$: 1 – k_B 0,1 або 0,9; 2 – k_B 0,2 або 0,8; 3 – k_B 0,3 або 0,7; 4 – k_B 0,4 або 0,6; 5 – k_B 0,5.

Для ЕМС, які працюють у безперервному стаціонарному режимі, АКФ може бути апроксимована виразом

Вираз для кроку дискретизації ГЕН ЕМС, які працюють у безперервному режимі

$$\text{---} \quad (3.12)$$

Для визначення параметру слід безперервний процес представити як частковий випадок циклічного періодичного процесу з АКФ

. У цьому випадку параметр можна приблизно оцінити за формулою (3.5). У практичних розрахунках для безперервного режиму можна приблизно прийняти 0,99, тоді формула (3.5) набуде вигляду —.

Таким чином, вираз (3.12) має вигляд

$$\text{---} \quad (3.13)$$

Вираз (3.13) можна представити у вигляді графіків для різних значень середньоквадратичного відхилення (рис. 3.16).

На практиці оцінити значення середньоквадратичного відхилення можна за результатами попередніх випробувань або за формулою $\sigma_p^* = \text{---}$, де — відносна максимальна потужність за цикл, зміну [108].

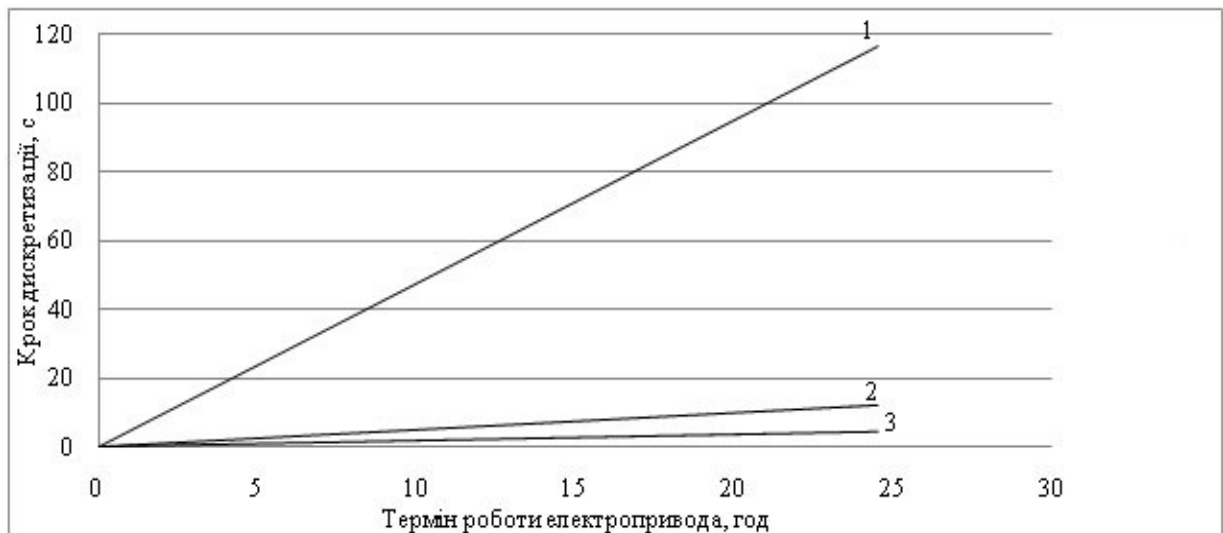


Рис. 3.16 Залежність кроку дискретизації від тривалості терміну роботи ЕМС для різних значень середньоквадратичного відхилення:

1 – ; 2 – ; 3 –

3.6 Моделювання індивідуальних графіків електричного навантаження із заданими кореляційними властивостями

Існують методи моделювання ГЕН ЕМС: за даними технології; метод статистичного моделювання; інтегральними характеристиками або показниками на підставі аналізу закономірностей їх формування; апроксимація добових графіків математичною функцією; побудова типових графіків [81,109]. Всі вони орієнтовані на моделювання групових ГЕН і не враховують або значно спрощують (усереднюють) форму індивідуальних графіків.

Серед методів моделювання стаціонарних випадкових процесів із заданими кореляційними властивостями найпоширеніші на практиці: метод канонічних розкладань, неканонічних розкладань і метод формуючого фільтра [110]. Зазначені методи моделювання випадкових процесів із заданими кореляційними властивостями різняться складністю проведення підготовчої роботи і властивостями алгоритмів моделювання.

Метод формуючого фільтра дозволяє моделювати стаціонарні стохастичні процеси заздалегідь невизначеної тривалості і заощаджувати

машинні ресурси. Перевагою застосування рекурсивних формуючих фільтрів є можливість забезпечення нульової методичної (алгоритмічної) похибки [110].

Ідея методу формуючого фільтра полягає в тому, що стаціонарний випадковий процес з АКФ $R(\tau)$ можна розглядати як реакцію на вплив білого шуму одиничної інтенсивності лінійної системи з імпульсною характеристикою $h(\tau)$, що задовольняє інтегральному рівнянню [111]

На рис. 3.17,а зображено схему формування з білого шуму $x(t)$ стохастичного процесу електроспоживання ЕМС за допомогою фільтра з передатною функцією $K(p)$. У цифровому моделюванні схемі формування процесу $y(t)$ відповідає схема формування відліків процесу $y(nT)$ з дискретного білого шуму $u(nT)$ (рис. 3.17, б).

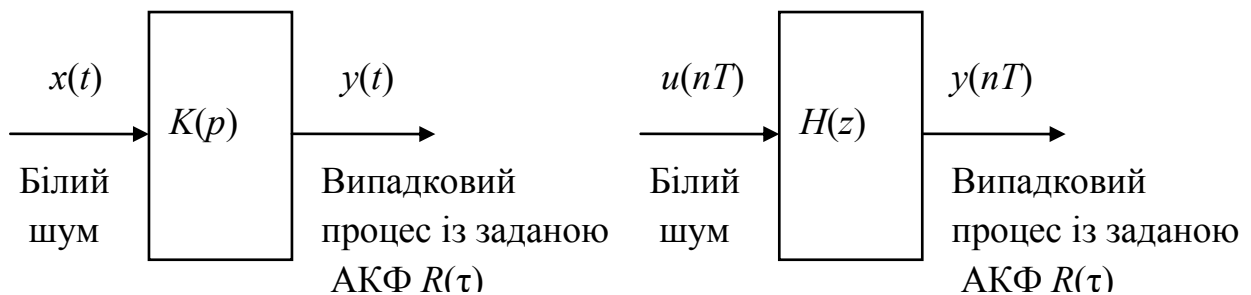


Рис. 3.17 Схема моделювання ГЕН:

а – аналоговий формуючий фільтр; б – цифровий формуючий фільтр

Виділяються дві задачі: одержання стаціонарного білого шуму та створення математичної моделі формуючого фільтра [112].

Програмний спосіб генерування білого шуму вважається найбільш раціональним із практичної точки зору. Щільність ймовірності дискретного білого шуму на вході формуючого фільтра може бути будь-якою, якщо для модельованого випадкового процесу щільність ймовірності не задана. У разі

моделювання нормального випадкового процесу необхідно для імітації дискретного білого шуму використовувати датчик випадкових чисел з нормальним розподілом [110].

Для нерекурсивного фільтра поточне значення $y(nT)$

$$y(nT) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) x(nT - kT) + v(nT), \quad (3.14)$$

де $h(k)$ – коефіцієнти цифрового фільтра, N – порядок цифрового фільтра.

Для рекурсивних фільтрів значення $y(nT)$

$$y(nT) = \sum_{k=0}^{L-1} h(k) x(nT - kT) + v(nT), \quad (3.15)$$

де $h(k)$, L – коефіцієнти цифрового фільтра; L – порядок рекурсивного фільтра.

Розрахунок формуючого фільтра зводиться до визначення коефіцієнтів або $h(k)$, за заданими кореляційними властивостями. Для знаходження коефіцієнтів (тобто параметрів фільтра) застосовують три класи методів: методи перетворення аналогових фільтрів у цифрові, прямі методи розрахунку цифрових фільтрів у z -площині й методи, які використовують алгоритми оптимізації. У загальному випадку неможливо віддати перевагу будь-якому з них, однак більшість цифрових фільтрів у задачах статистичного моделювання розраховуються методом білінійного перетворення стандартних аналогових фільтрів [113].

Цифрові фільтри (3.14) і (3.15) прийнято описувати за допомогою передатних функцій. Для нерекурсивного фільтра (3.14) передатна функція має вигляд

Рекурсивний фільтр (2.15) має передатну функцію [114]

Розробимо математичну модель формуючого фільтру для розрахунку випадкового процесу електроспоживання ЕМС циклічної дії із АКФ виду

Спектральна щільність потужності S_{ω} , відповідна цій АКФ [110]

Час кореляції модельованого випадкового процесу

Енергетична смуга спектру

Якщо ЕМС у своєму складі має фільтрокомпенсуючий пристрій, то випадковий процес електроспоживання з такою спектральною щільністю й АКФ формується на виході LRC -кола з високою добротністю, на вході якого діє білий шум зі спектральною щільністю потужності — [26].

Параметри кола: — – резонансна частота контуру;
— загасання контуру; — добротність контуру; —.

Випадковий процес із такими кореляційними властивостями може формуватися також з білого шуму, що діє на вході паралельного контуру або однокаскадного резонансного підсилювача з параметрами , , , .

Для обчислень $y(nT)$ за $u(nT)$ використовується вираз

де

Передатна функція фільтра

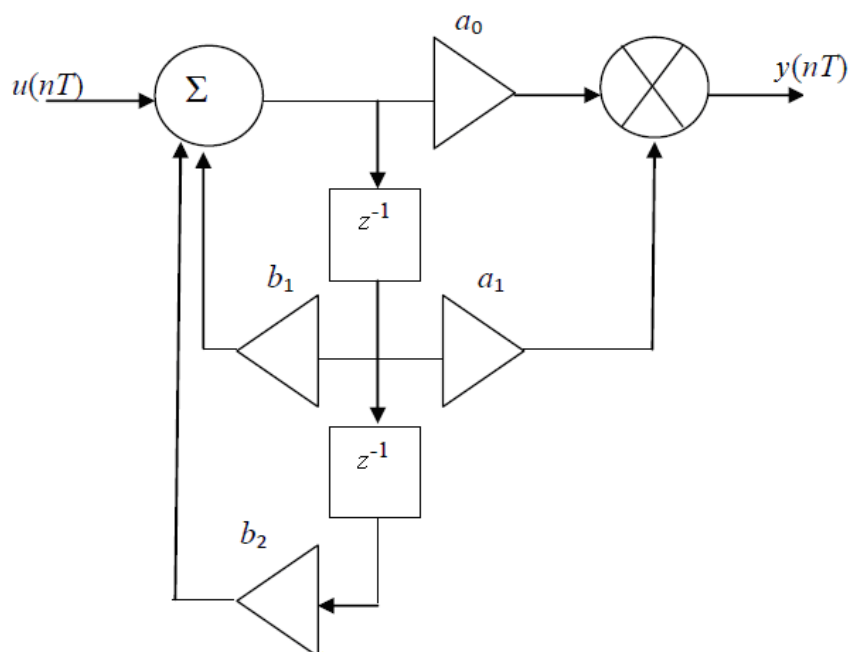


Рис. 3.18 Структурна схема моделі цифрового формуючого фільтра для розрахунку випадкового процесу електроспоживання ЕМС циклічної дії із АКФ виду

Розробимо математичну модель формуючого фільтру для розрахунку випадкового процесу електроспоживання ЕМС безперервної дії із АКФ виду

Час кореляції для модельованого процесу

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---}$$

Спектральна щільність потужності, що відповідає цій АКФ

$$\text{---}$$

Енергетична смуга спектру

$$\text{---} \quad \text{---}$$

Випадковий процес із такими характеристиками формується, наприклад, RC – колом з передатною функцією K на вході якого діє білий шум зі спектральною щільністю $-$, при цьому

Застосуємо метод білінійного z -перетворення для одержання передатної функції рекурсивного формуючого фільтра.

Передатна функція цифрового формуючого фільтра

$$\text{---}, \text{ де } \text{---},$$

Для обчислень $y(nT)$ за $u(nT)$ використовується вираз

Структурну схему моделі формуючого фільтра наведено на рис. 3.19.

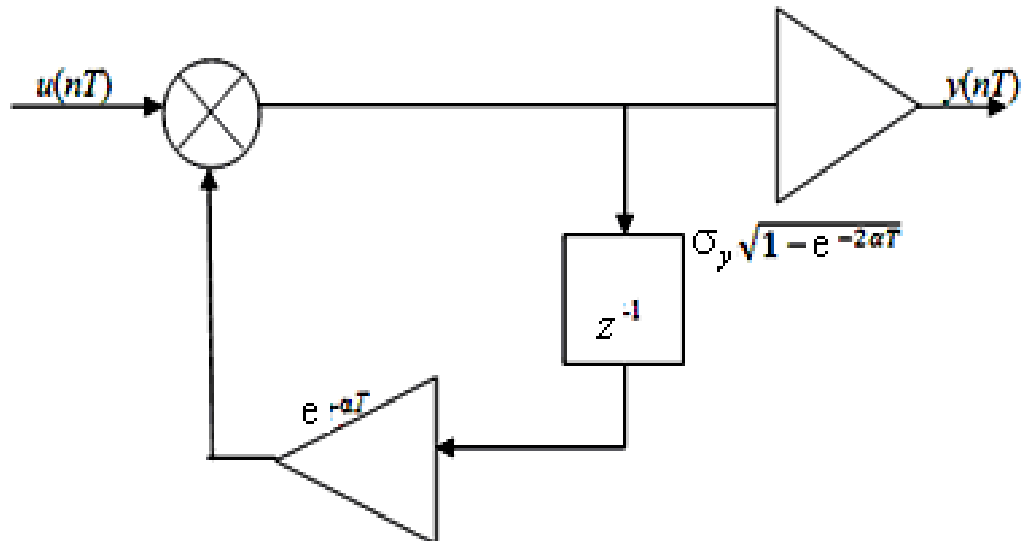


Рис. 3.19 Структурна схема моделі формуючого фільтра для розрахунку випадкового процесу електроспоживання ЕМС безперервної дії із АКФ виду

За аналогією можуть бути знайдені параметри фільтра й моделюючий алгоритм для інших моделей АКФ електроспоживання [26,27].

Приклади реалізацій ГЕН ЕМС із заданою АКФ, одержані шляхом моделювання за допомогою методу цифрового рекурсивного фільтра, наведено на рис. 3.20.

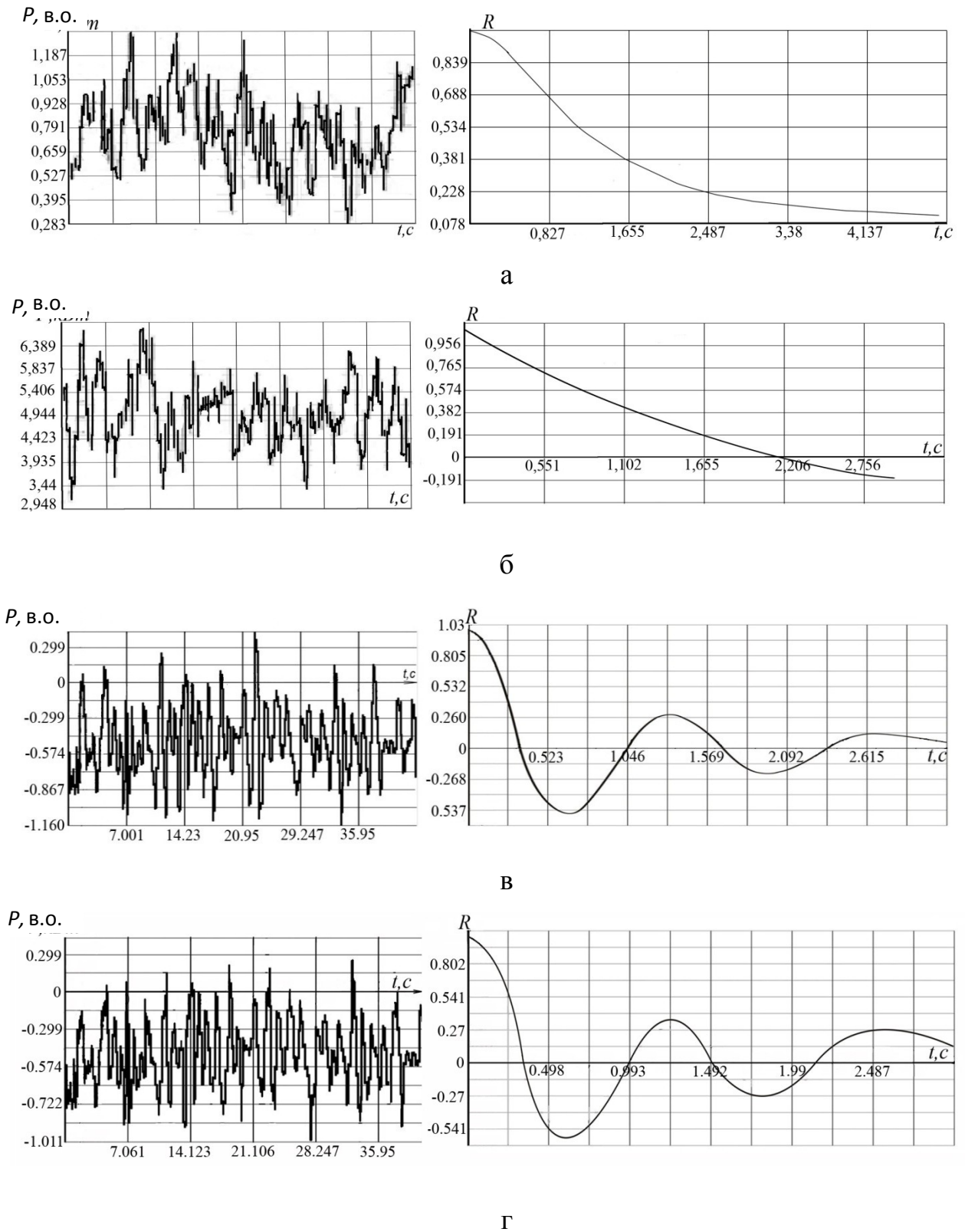


Рис. 3.20 Реалізації ГЕН та їх АКФ:

- а – $N = 500, \Delta = 0,4, \quad 1, J = 9;$
- б – $N = 500, \Delta = 0,4, \quad 1, J = 13;$
- в – $N = 1000, \Delta = 0,082, \quad 1, \quad 5, J = 38;$
- г – $N = 1000, \Delta = 0,078, \quad 1, \quad 5, J = 38$

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.

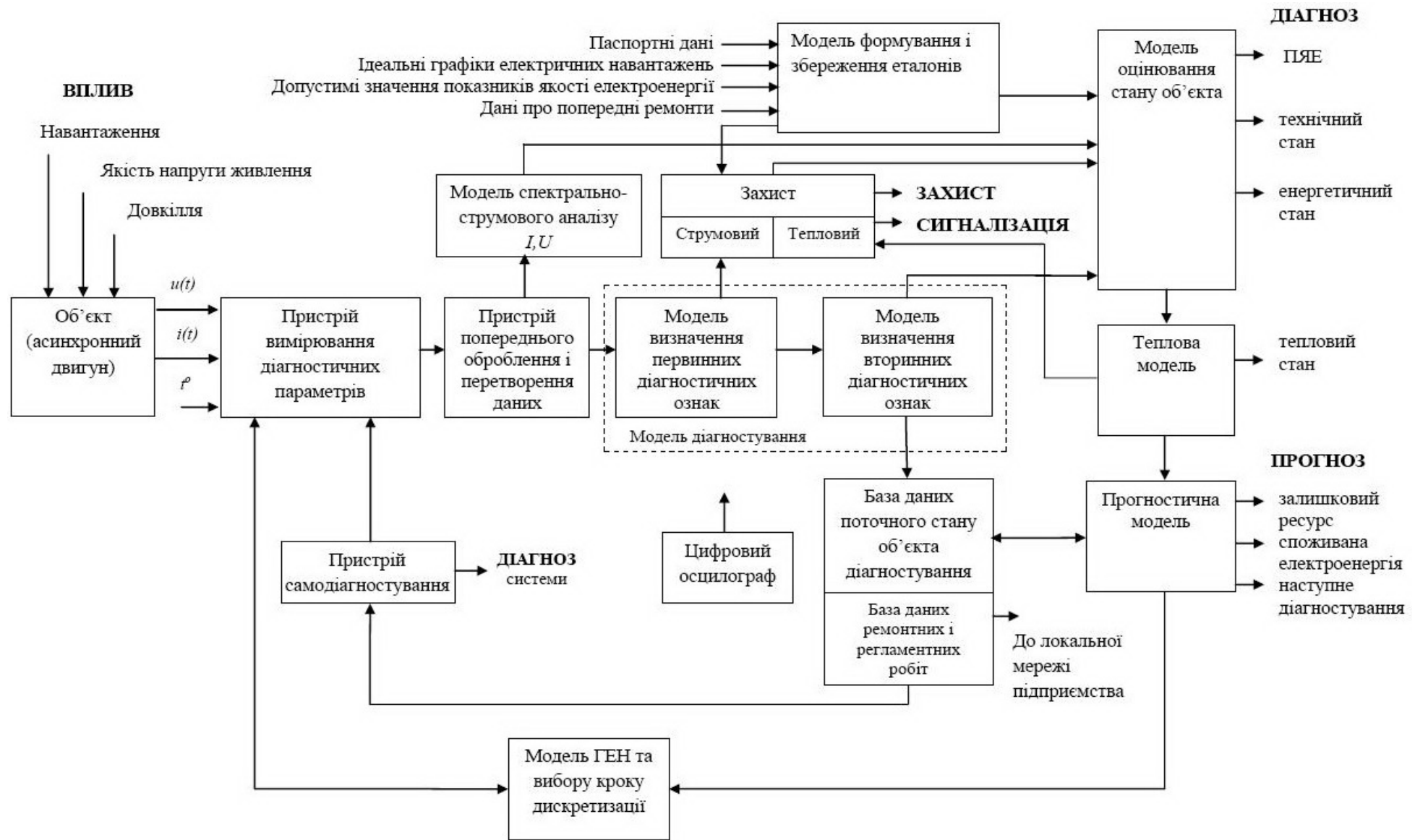


Рис. 4.1 Структурна схема функціонального діагностування енергоефективності ЕМС



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 [150]. 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 перетворення 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.

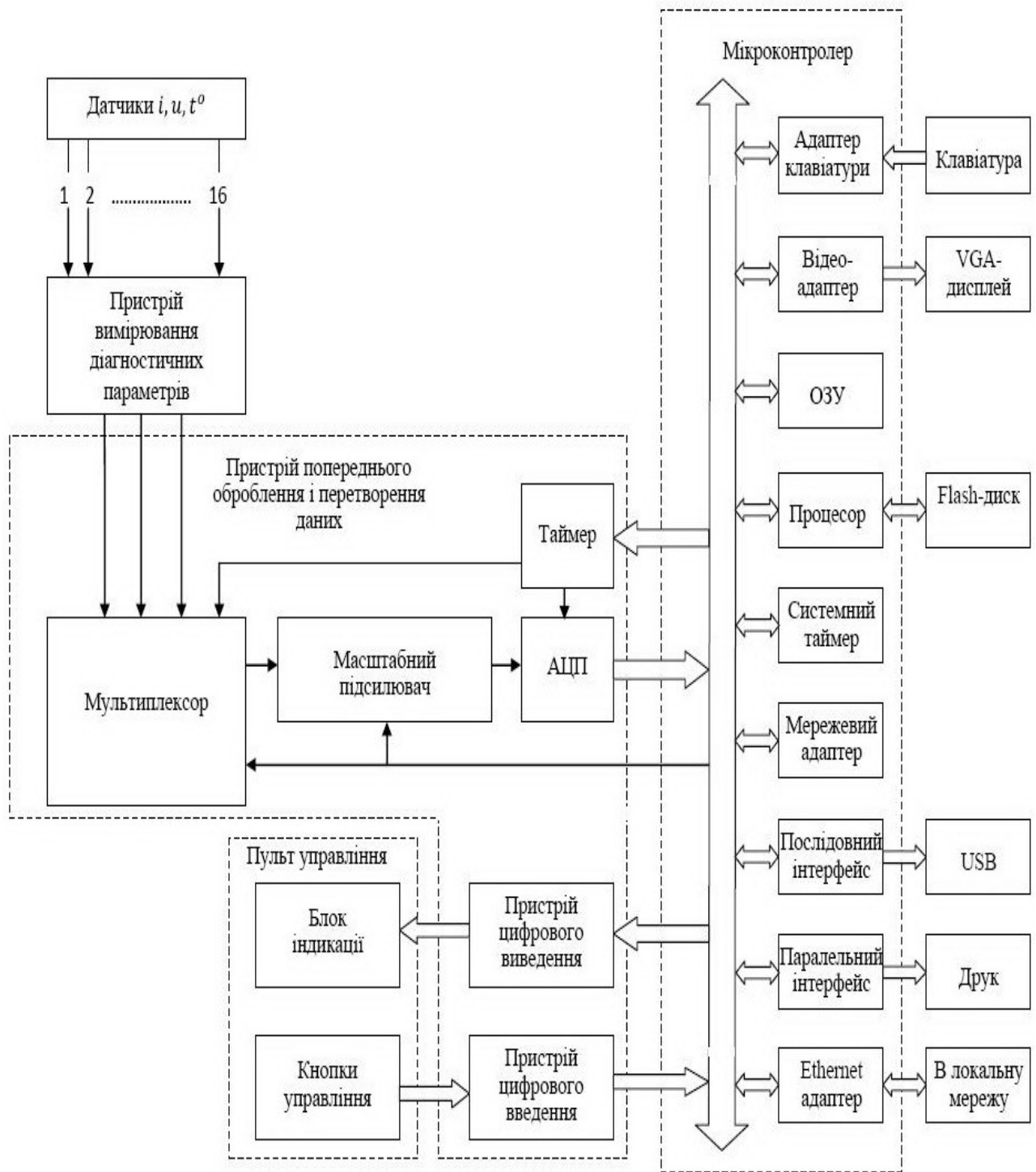


Рис. 4.3 Структурна схема діагностування на основі промислового автономного мікропроцесорного пристрою

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 NXP 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) [36,156]. 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 [157]. 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 [158], 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.

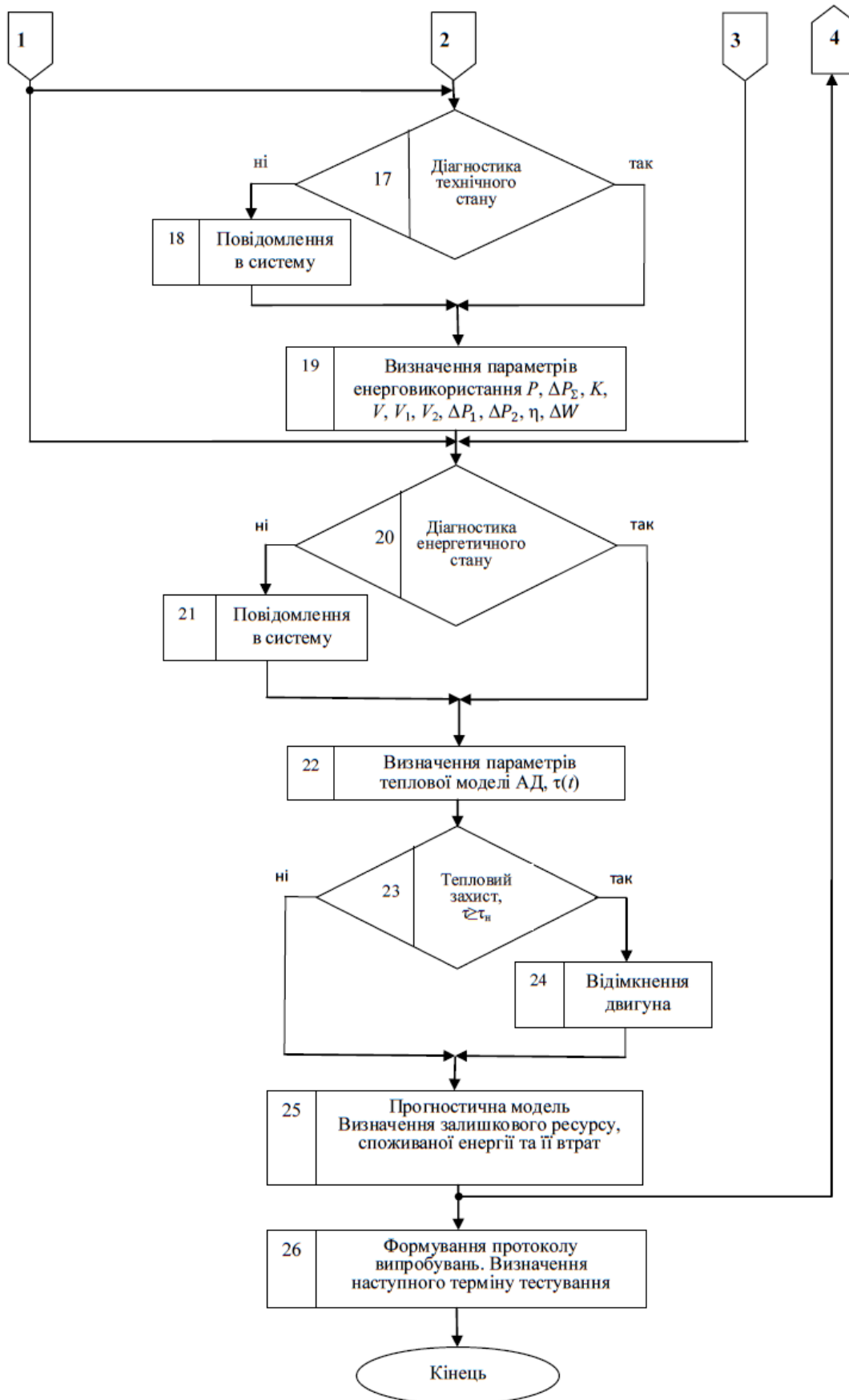


Рис. 4.4 Алгоритм функціонального діагностування енергоефективності
ЕМС з АД

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 нагріваючі 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.

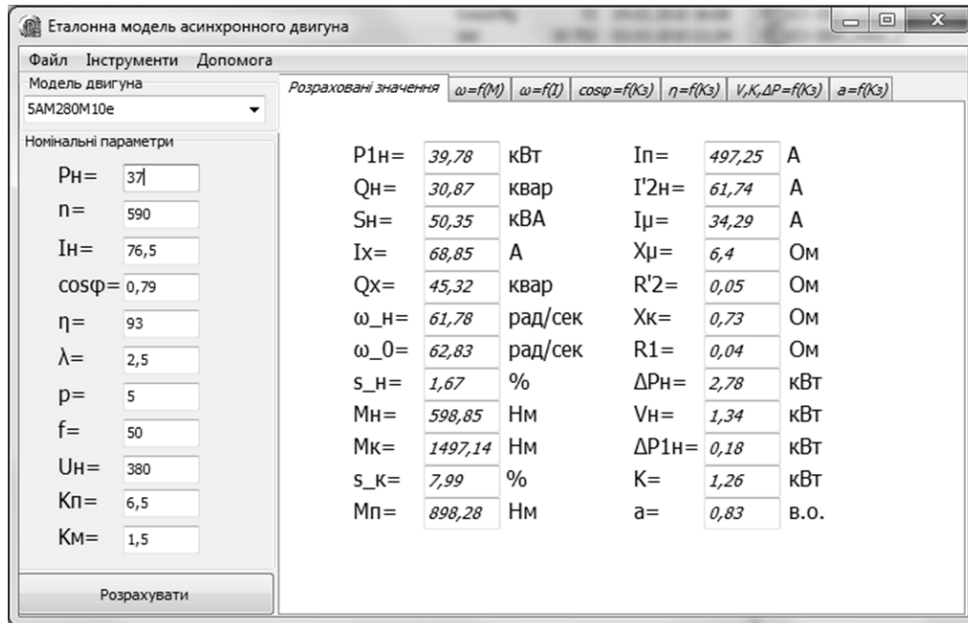
Вторинні діагностичні параметри (ПЯЕ, параметри процесу енергоспоживання, робочі, процесу енерговикористання) розраховуються за енергетичними моделями АД. Процедура діагностування містить операцію порівняння поточних значень діагностичних параметрів з їх еталонними значеннями, отриманими під час попереднього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

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

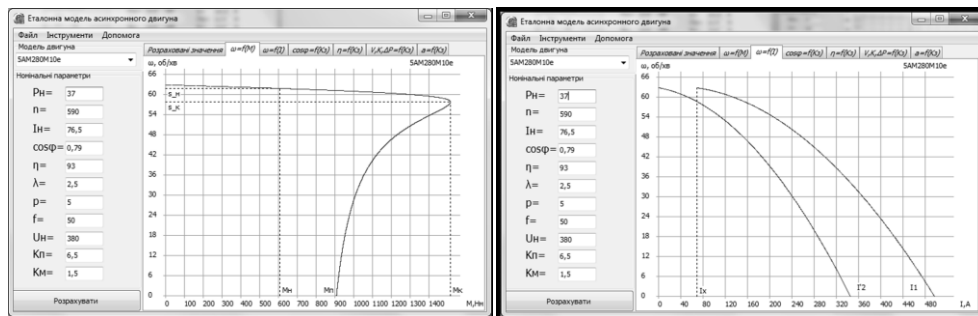
4.3 Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами

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].

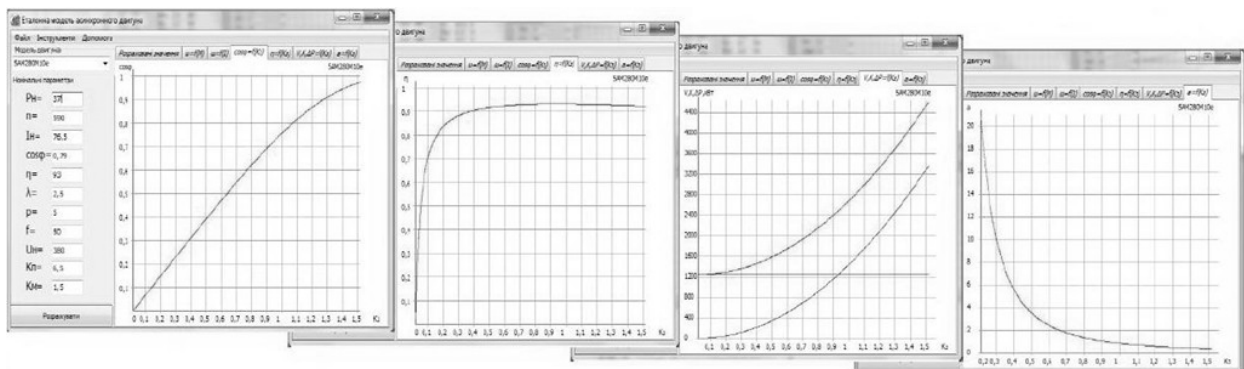
На основі моделі формування і збереження еталонів та методики розрахунків робочих параметрів АД за паспортними даними в середовищі DELPHI-2009 розроблено програму розрахунків параметрів еталонної моделі “Еталонна модель АД” [123]. На рис. 4.5 наведено фрагменти цієї програми - головний інтерфейс користувача 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: $n_H = 590\text{об/хв}$,



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. А). Роботу програми можна представити як послідовність виконання чотирьох етапів (рис. 4.6).

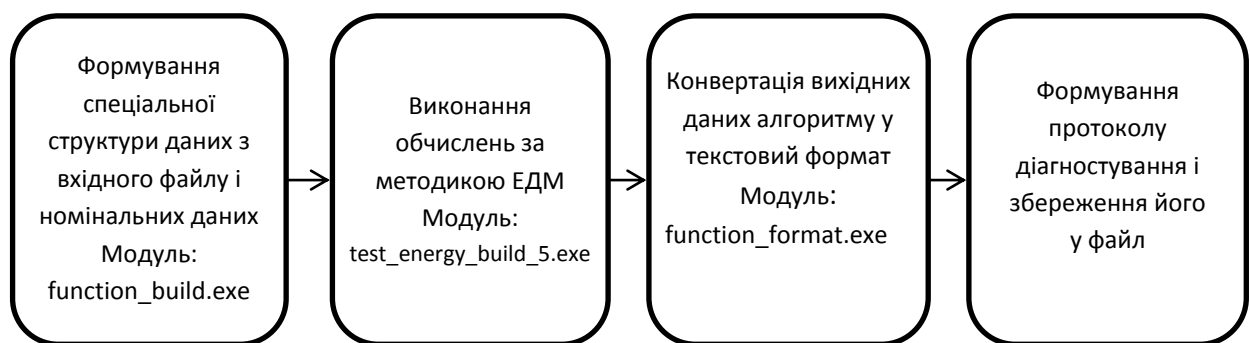


Рис. 4.6 Етапи роботи програми “Діагностування параметрів АД”

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.

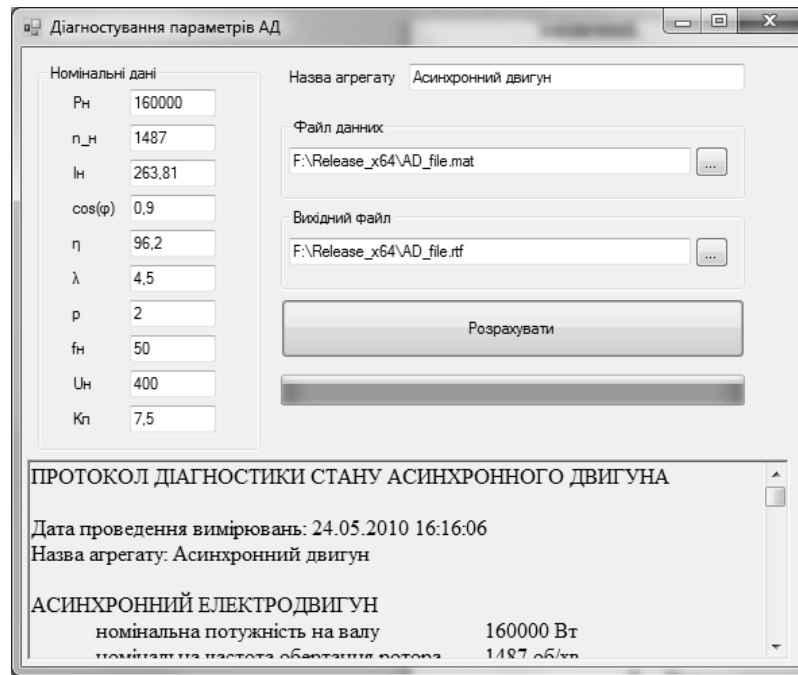


Рис. 4.7 Інтерфейс користувача програми “Діагностування параметрів АД”

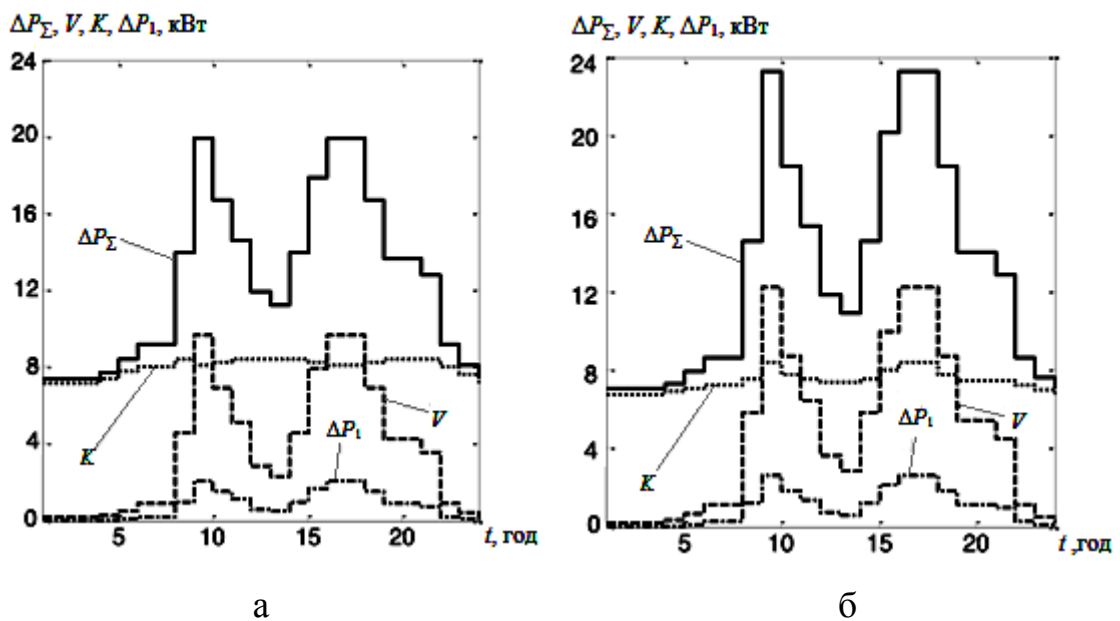


Рис. 4.8 Добові графіки втрат АД (повні, змінні, постійні та додані) в умовах зміни навантаження у випадку: а – відсутності відхилень ПЯЕ; б – впливу граничних значень ПЯЕ (відхилення, несиметрії та несинусоїдальності напруги)

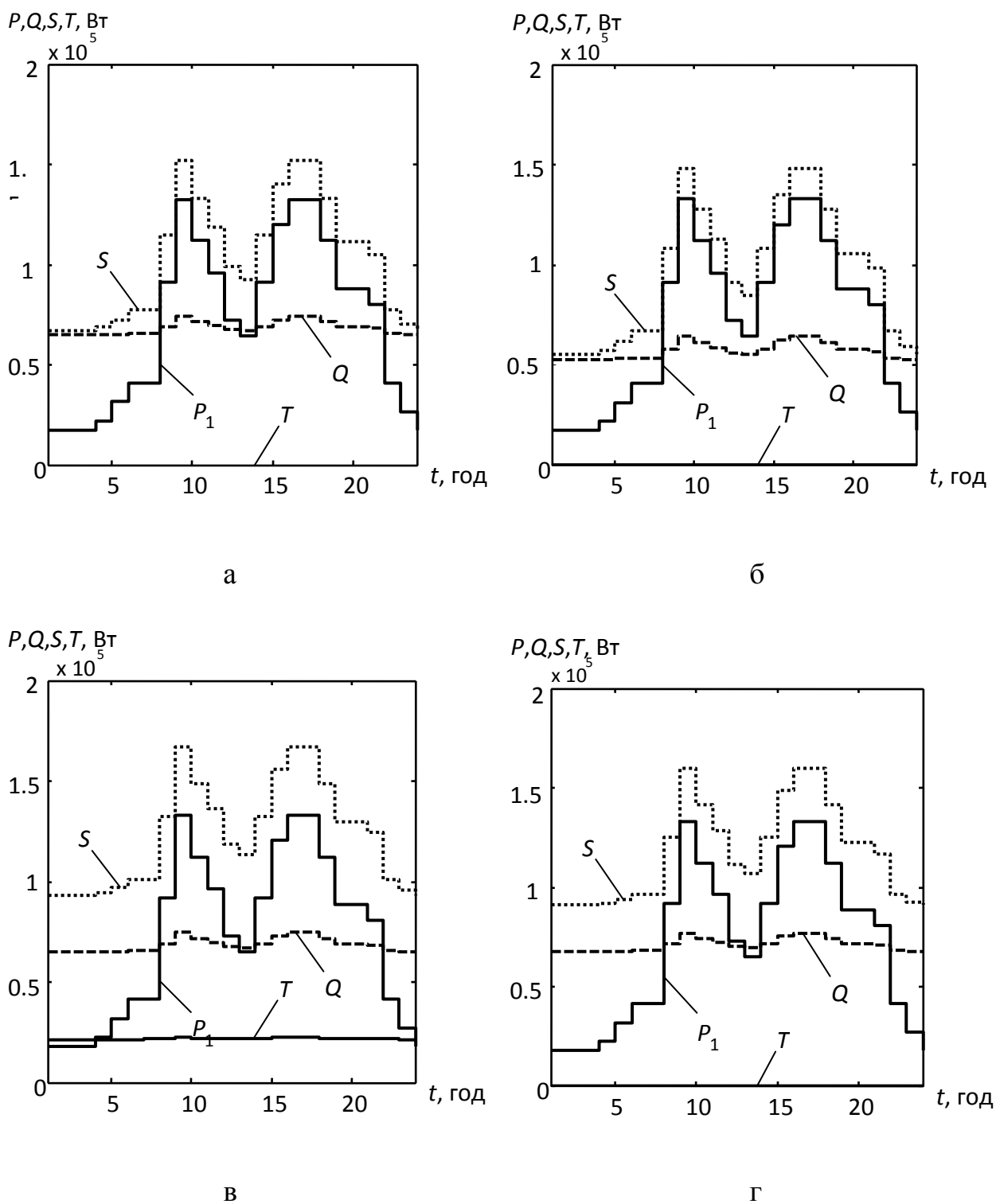


Рис. 4.9 Добові графіки споживаних з мережі потужностей (активної, реактивної, повної та потужності спотворення) при зміні навантаження у випадку: а - відсутності відхилень ПЯЕ; б - відхилення напруги від номінальної на 10%; в - впливу граничних показників несинусоїдальності; г - впливу граничних показників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

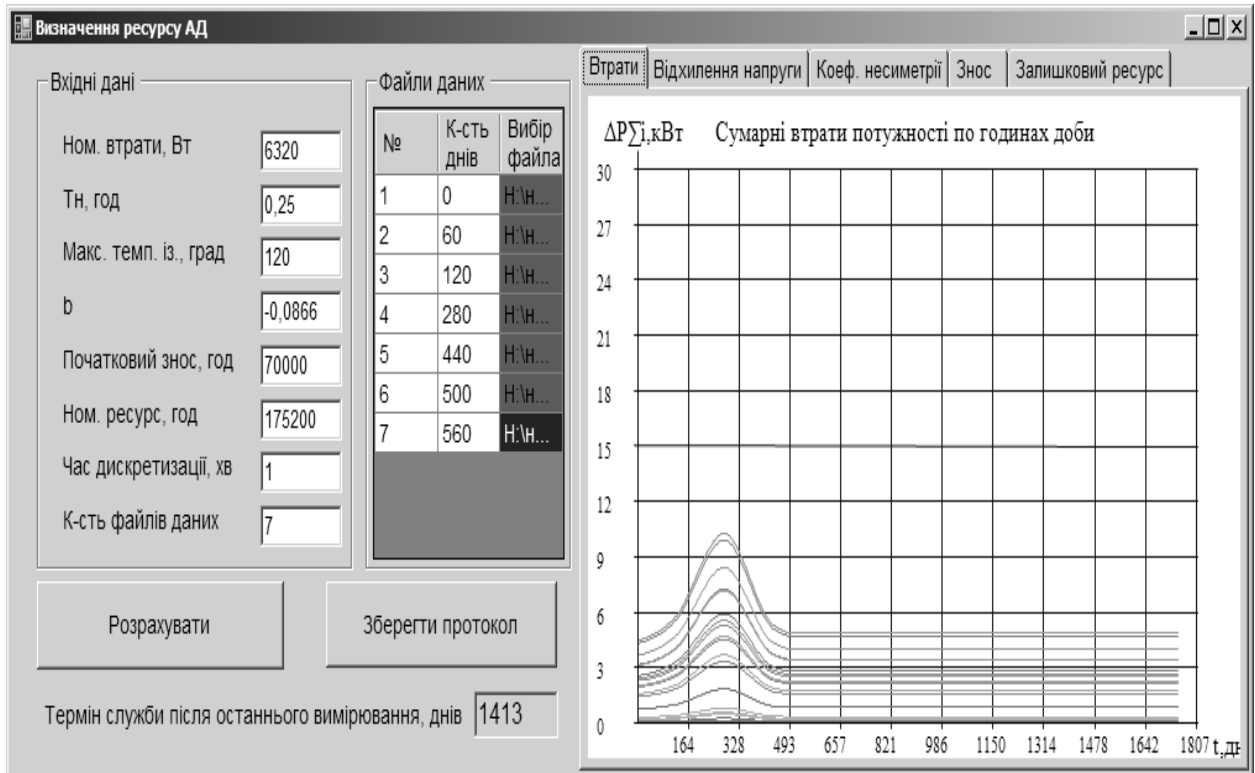
Вхідними даними програми “Визначення залишкового ресурсу АД” є значення повних втрат у двигуні, які отримуються з програми “Діагностування АД”, номінальних втрат – з програми “Еталонна модель АД”, сталої нагрівання двигуна, параметрів ізоляції (припустимої температури, коефіцієнта b), попередньої зношеності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

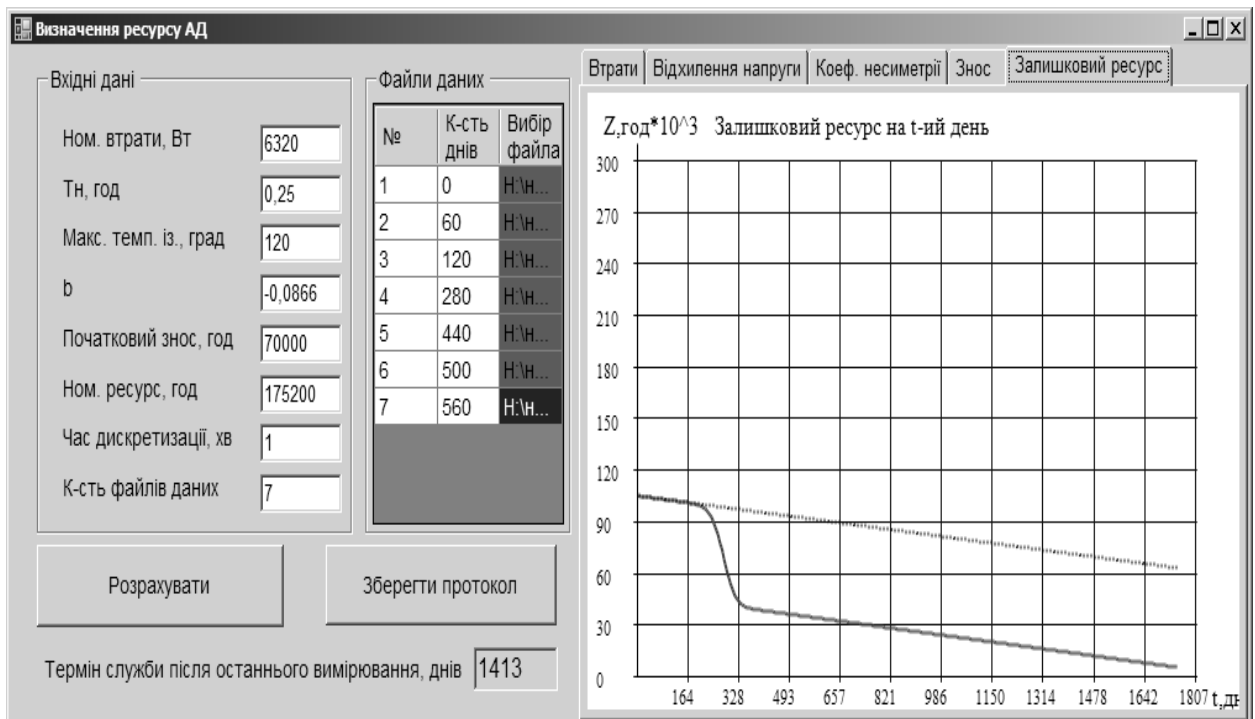
Програмне забезпечення “Визначення залишкового ресурсу АД” розраховує його залишковий ресурс у залежності від дії сукупності експлуатаційних факторів, формує протокол з графіками зміни зношеності та прогнозованого і номінального залишкових ресурсів у часі (дод. Б). Програмне забезпечення дозволяє визначати 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) [30,160].

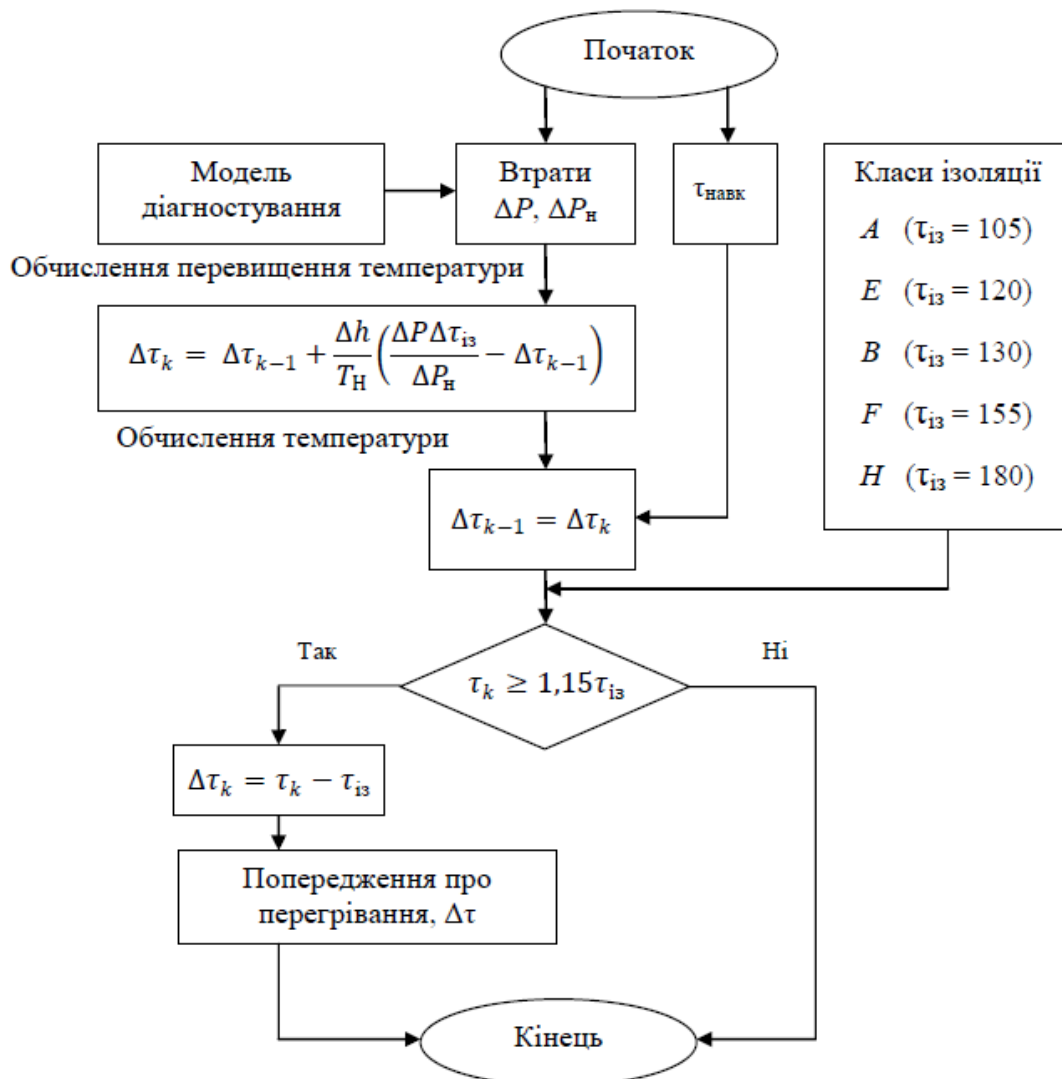


Рис. 4.11 Алгоритм роботи теплового захисту АД

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

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

де t - початкове перевищення температури двигуна [141].

Спрощено формула (4.1) має вигляд

$$\frac{t}{T} \approx \frac{1}{k_1} - 1$$

де $k_{поч}$ - початковий коефіцієнт кратності струму; k_1 - коефіцієнт, який змінюється в межах 1–1,5 [120].

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

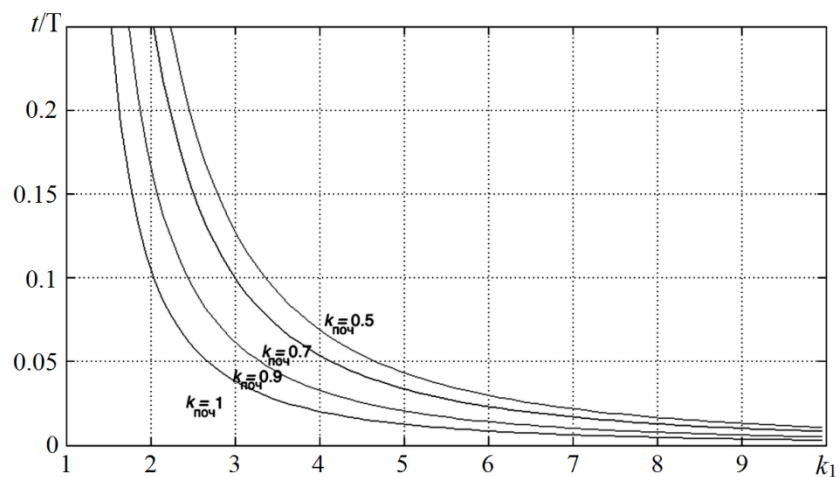


Рис. 4.12 Перевантажувальна характеристика АД з різними початковими режимами

В [142,161] наведено кілька варіантів часострумової характеристики захисту:

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

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

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

де , , - сталі величини, які вибираються меншими

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

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 B. 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*).

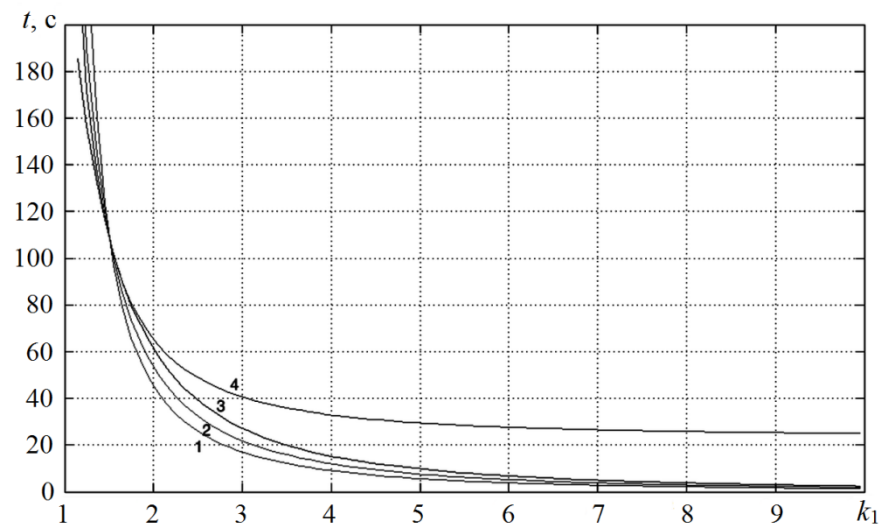


Рис. 4.13 Часоструміві характеристики спрацювання захисту:

- 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 урахувати струм зворотної послідовності.

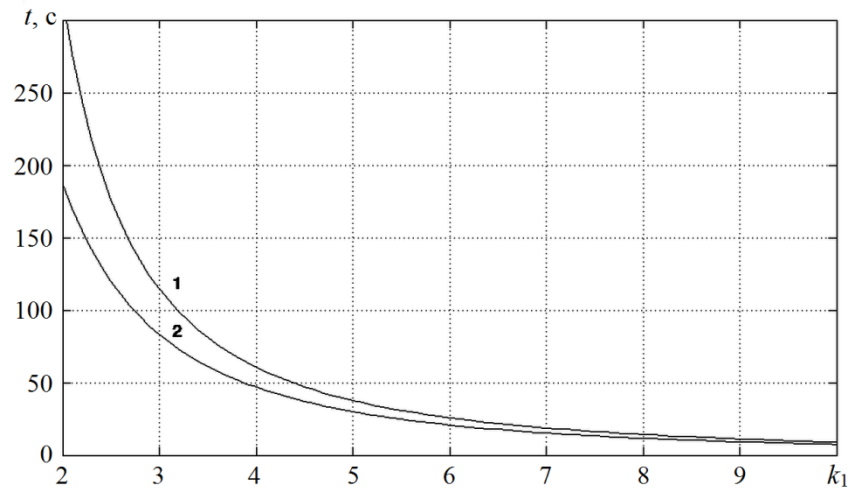


Рис. 4.14 Характеристики: 1 - перевантажувальна двигуна АД 4А280S2У3;
2 - часострумова захисту

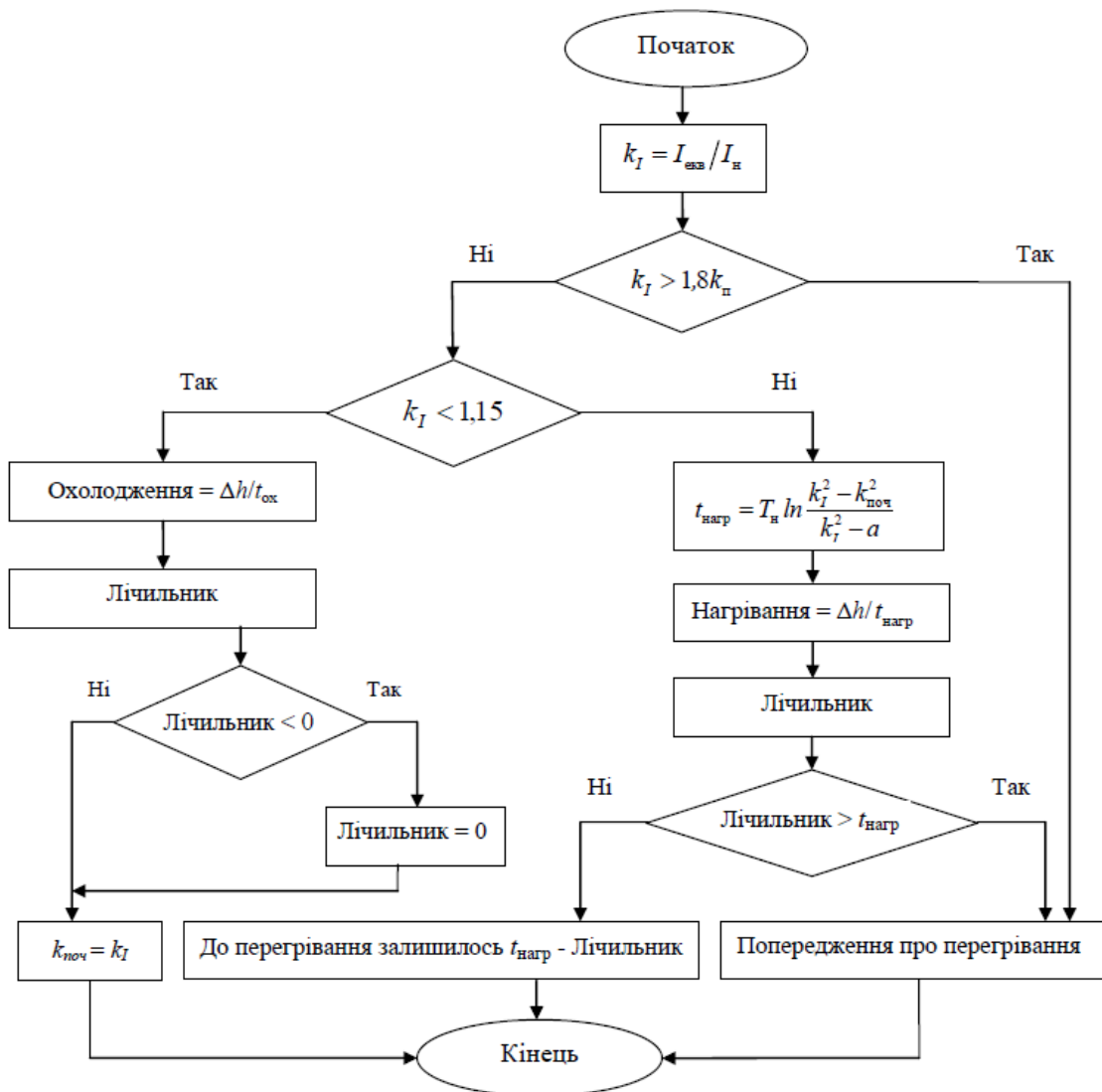


Рис. 4.15 Алгоритм роботи струмового захисту АД

Еквівалентний фазний струм з урахуванням струму зворотної послідовності

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

де $I_{\text{ф}}$ - діюче значення найбільшого фазного струму; k - ваговий коефіцієнт струму [162,163].

Для АД ваговий коефіцієнт струму

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

Згідно ГОСТ 13109-97 дозволяється розраховувати напруги зворотної послідовності за спрощеною формулою $U_{\text{зп}} = k U_{\text{ф}}$, де $U_{\text{ф}}$,

- 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 $I_{\text{ф}}$ - 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

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

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 технологічно

Критична
напруга

—
—

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

- -

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.

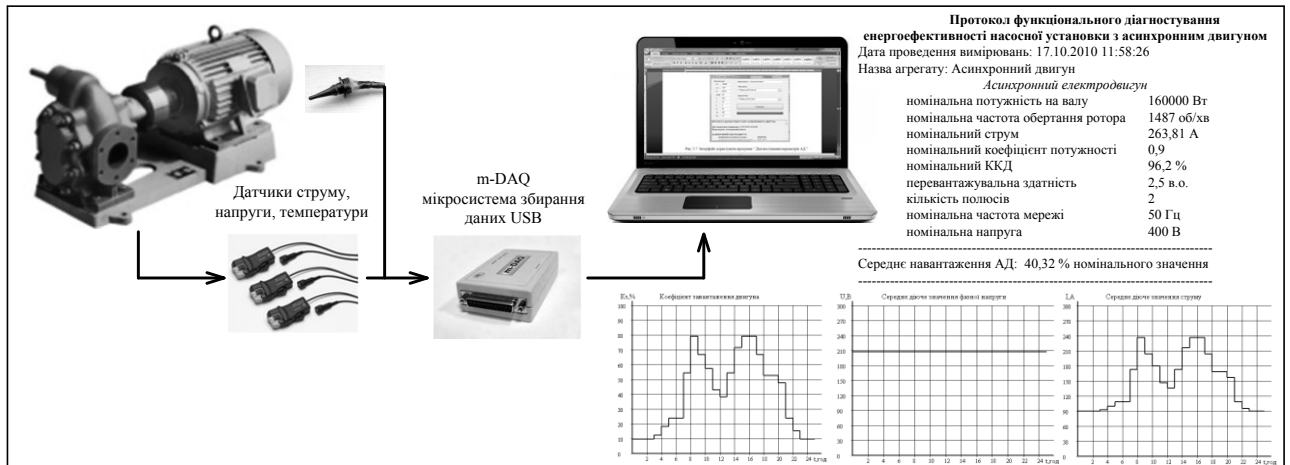
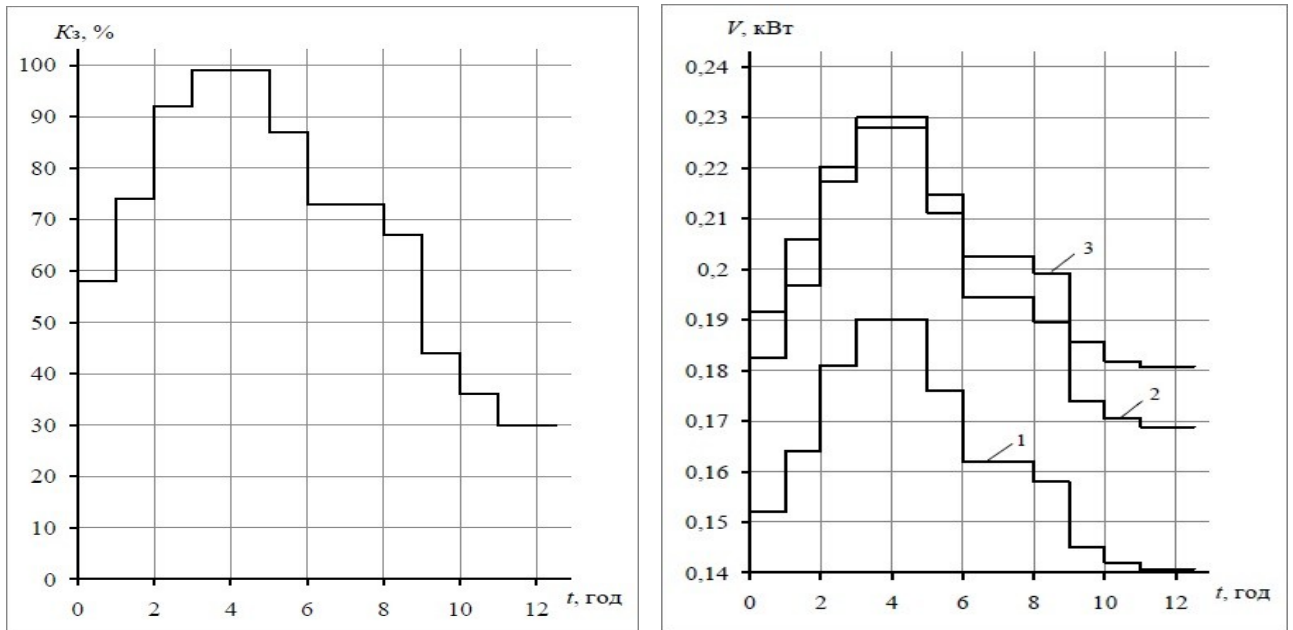


Рис. 4.16 Структурна схема мобільного програмно-апаратного комплексу для функціонального діагностування енергоефективності ЕМС з АД

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 4А80В4У3 ($n_H=1500$ 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)

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 4A90LB8УЗ ($n_H=750\text{об/хв}$,

, 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).

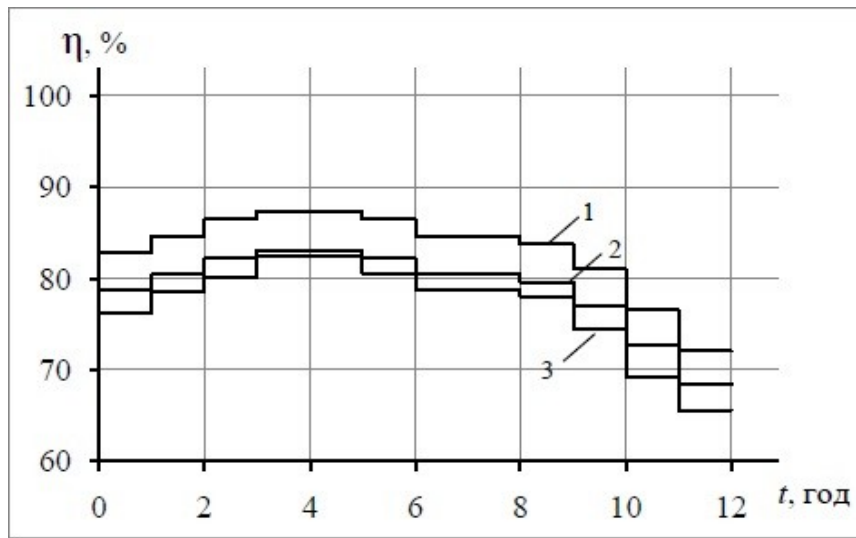
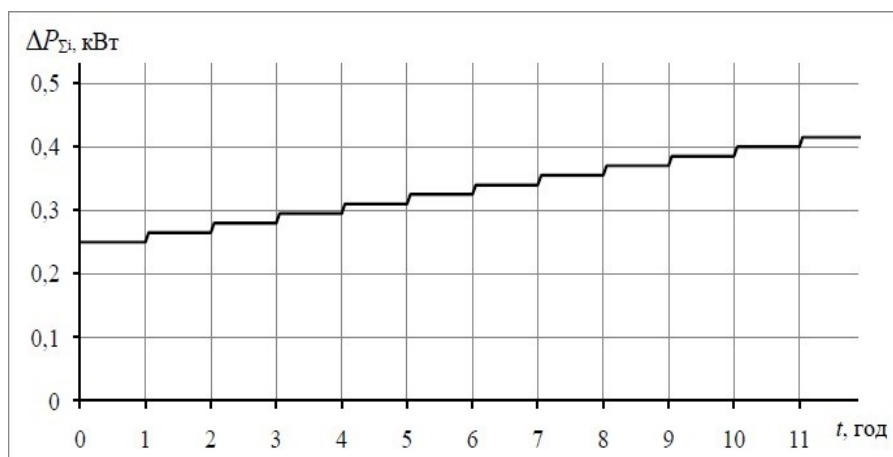


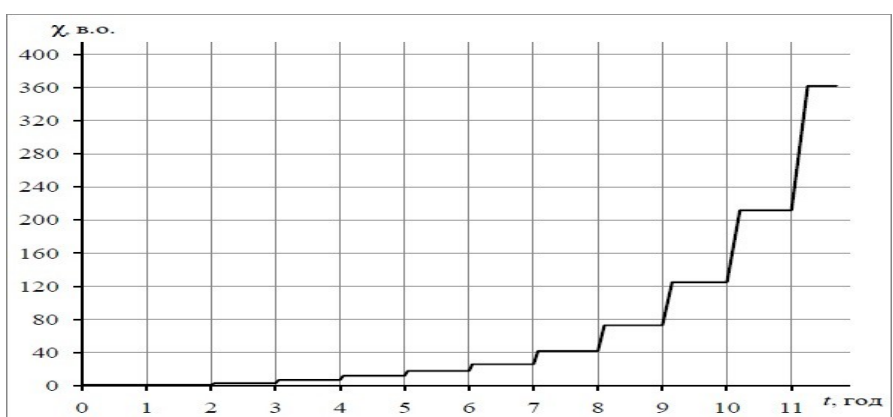
Рис. 4.18 Графіки зміни ККД у часі: 1 – неушкодженого двигуна; 2 – ушкодженого двигуна, визначені за методом тарованої допоміжної машини; 3 – ушкодженого двигуна, за допомогою комплексу діагностування

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%.

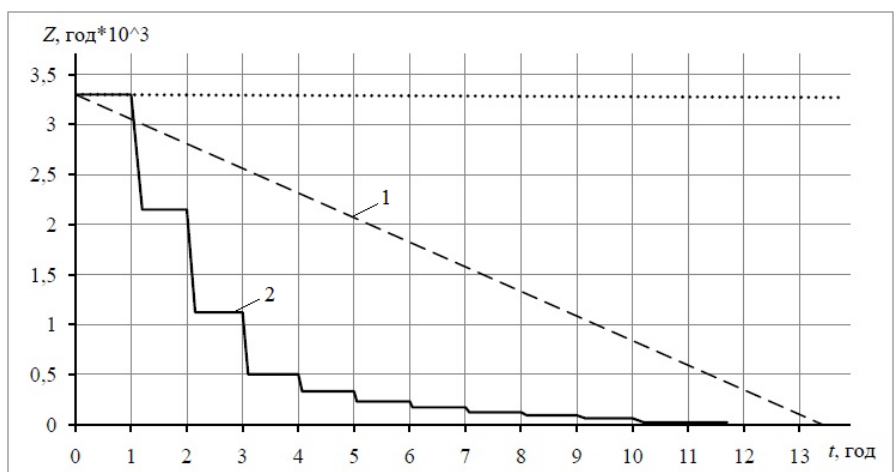
Експериментальна перевірка моделей, методик і програм на розробленому мобільному програмно-апаратному комплексі підтвердила високу точність визначення енергетичних показників ЕМС з АД, адекватність енергетичного підходу до визначення несправностей та достатню точність прогнозування залишкового ресурсу.



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.

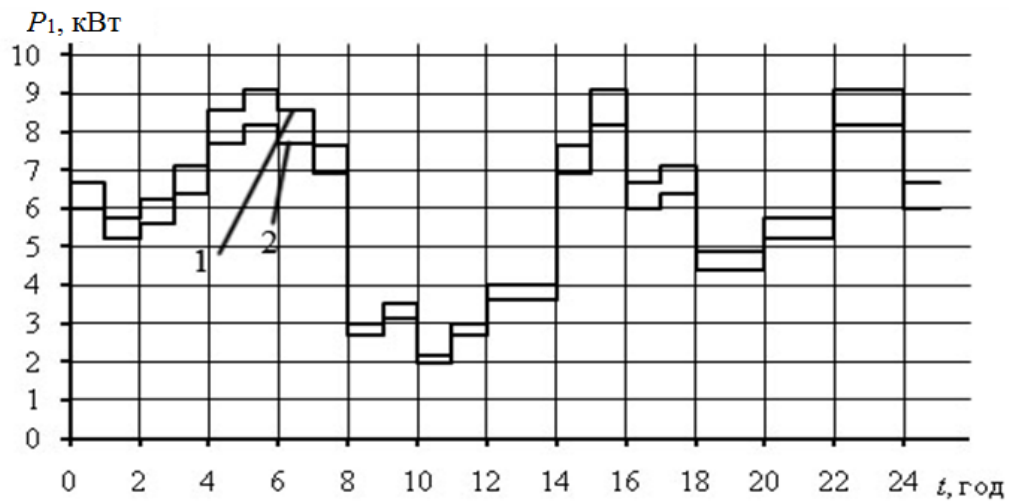


Рис. 4.20 ГЕН насосної установки: 1 – експериментально знятий; 2 – еталонний

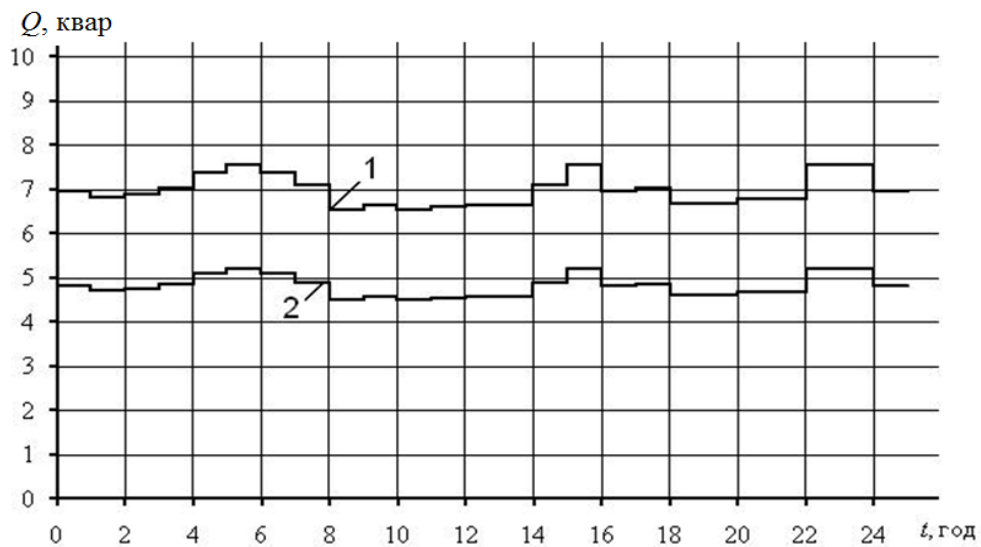


Рис. 4.21 Реактивна потужність насосної установки:
1 – фактична; 2 – еталонна

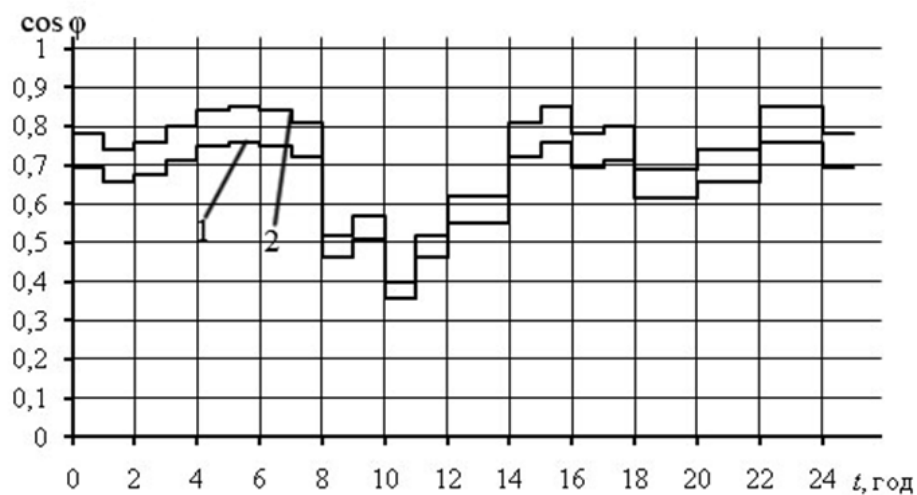


Рис. 4.22 Коефіцієнт потужності насосної установки:
1 – фактичний; 2 – еталонний

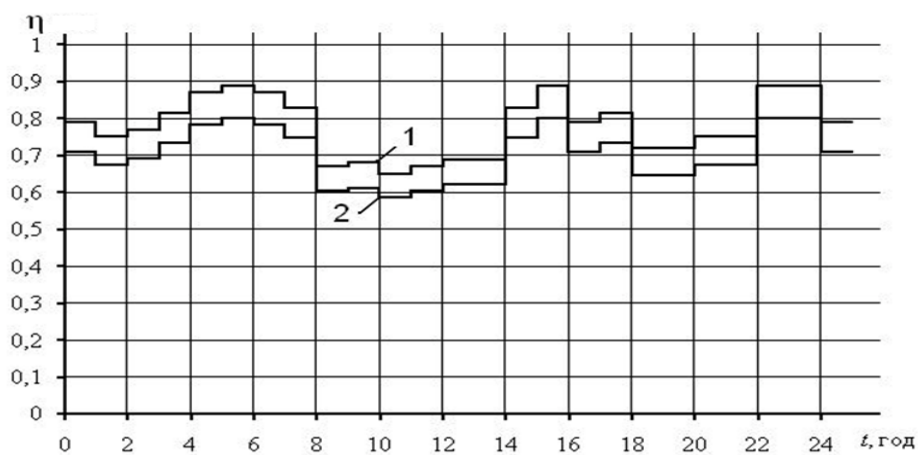


Рис. 4.23 ККД насосної установки: 1 – еталонний; 2 – фактичний

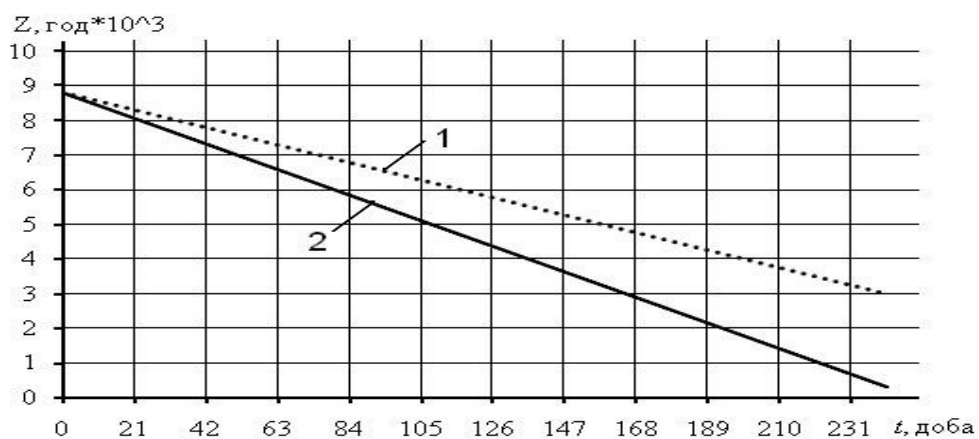


Рис. 4.24 Залишковий ресурс насосної установки:
1 – еталонний; 2 – фактичний

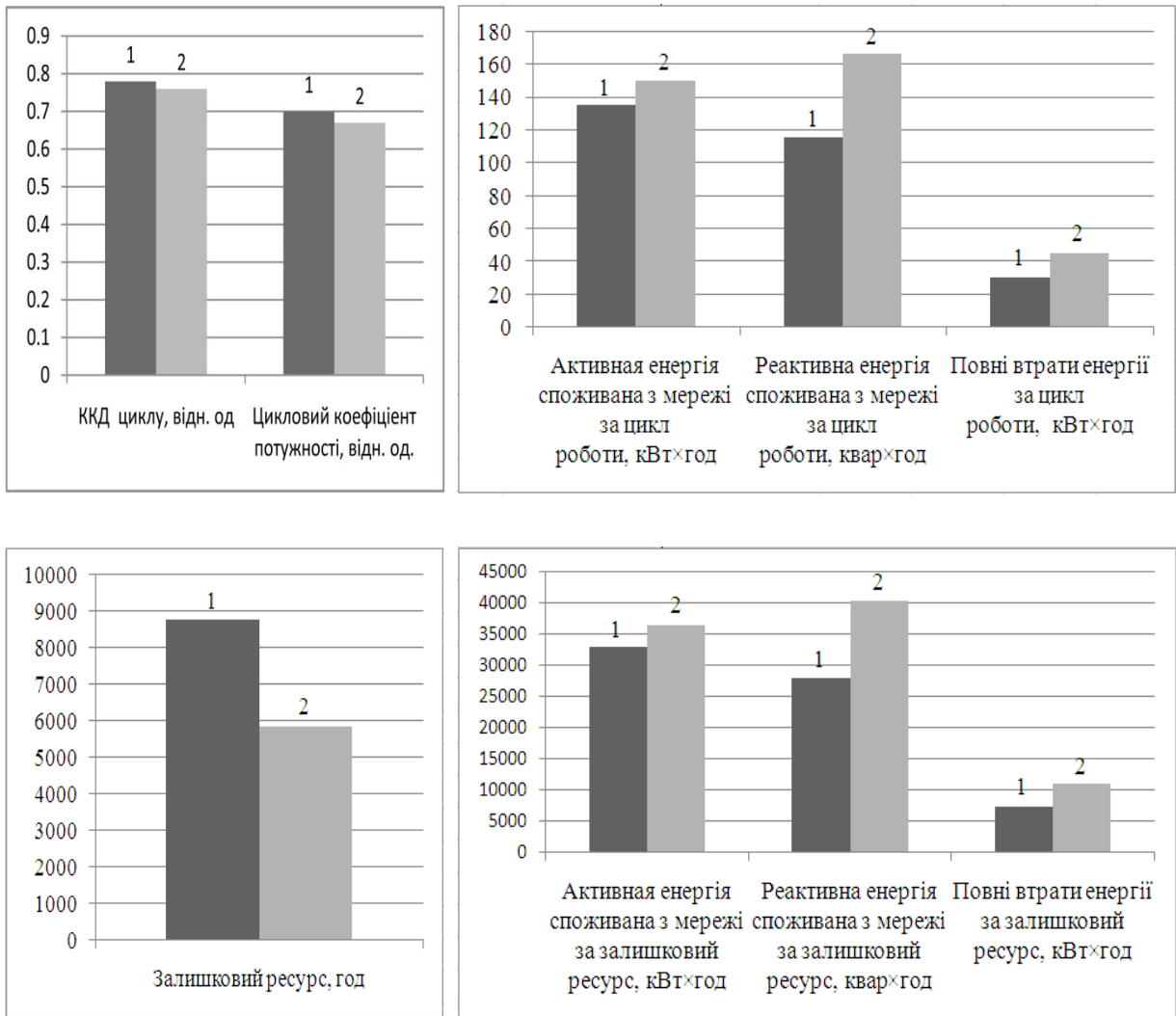


Рис. 4.25 Результати моделювання параметрів насосної установки:

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.: Асадема, 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 «Тірицтво»: Збірник наукових праць. - 2008. - №16. - С. 90-97.

24. Праховник А.В. Класифікація та вибір кроку дискретизації графіків навантажень електропривода механізмів циклічної дії / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. - 2009. - №4. - С. 20-27.

25. Праховник А.В. Класифікація та вибір кроку дискретизації графіків навантажень механізмів безперервної дії / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. - 2009. - № 3/2009 (56), ч. 2. - С. 48-52.

26. Праховник А.В. Моделювання індивідуальних графіків навантаження електропривода / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «Електроінформ». - 2009. - С. 343-344.

27. Закладний О.О. Моделювання індивідуальних графіків електричного навантаження промислового електропривода з заданими кореляційними властивостями / О.О. Закладний, О.М. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. - 2010. - №2. - С. 51-55.

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. Электропривод: 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. Элементи 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. Партс Р.Р. О способе вынутаго ротора/ Р.Р. Партс // 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. Енергетичний менеджмент: Навчальний посібник/ [Праховник 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 автоматизации 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, К.П. Бочаров и др. – М.: Недра, 1976. – 320с.

81. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев. - М.: Недра, 1985. – 232 с.

82. Шидловский А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный - М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

83. Борисов Б.П. Электроснабжение электротехнологических установок / Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин; под ред. А.К. Шидловского. – К.: Наукова думка, 1985. – 248 с.

84. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

85. Купер Дж. Вероятностные методы анализа сигналов и систем / Дж. Купер, А. Макгиллем. – М.: Мир, 1989. – 376 с.

86. Прохоренков А.М. Определение классификационных характеристик случайных процессов /А.М. Прохоренков, Н.М. Качала // Измерительная техника. - 2008. - №4. – С. 7-10.

87. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол.– М.: Мир, 1989. – 540 с.

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. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электронабжения / Ю.А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 240 с.

90. Денисенко Н. А. Автокорреляционные функции тока и напряжения в системах электроснабжения / Н. А. Денисенко, И. Хофман // Электричество. – 1985. – № 1. – С. 42–45.
91. Романенко А. Ф. Вопросы прикладного анализа случайных процессов / А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. – М.: Сов. радио, 1968. - 256 с.
92. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов / Г. Я. Мирский. – М.: Энергия, 1972. - 456 с.
93. Мидлтон Д. Введение в статистическую теорию связи / Д. Мидлтон. - М.: Сов. Радио, 1961, т.1. - 160с.
94. Прохоров С. А. Аппроксимативный анализ случайных процессов / С. А. Прохоров. – Самара: Гос. аэрокосм. ун-т, 2001.- 380 с.
95. Денисенко М. А. Спеціальні питання електропостачання : навч. посіб. / М.А. Денисенко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Ч. I.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. – 288 с.
96. Горбацевич Е.Д. Коррелометры с аппроксимацией / Е.Д. Горбацевич. – М.: Энергия, 1971. -125 с.
97. Романенко А.Ф. Аппроксимативные методы анализа случайных процессов / А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. – М.: Энергия, 1974. - 176 с.
98. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. - М.: Наука, 1970. - 688 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. Жежеленко И.В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей /

И.В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, В. П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.

101. Закладний О.О. Апроксимація автокореляційних функцій процесу електроспоживання електропривода / О.О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. - 2010.- №1. - С. 60-64.

102. Лазареєв Ю.Ф. Моделювання на ЕОМ: Навчальний посібник / Ю. Ф. Лазареєв. – К.: Корнійчук, 2007. – 290 с.

103. Кавчук С.В. Руководство по временной дискретизации сигналов / С.В. Кавчук. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. - 38 с.

104. Погребняк Н.Н. Решение задач электроснабжения путем имитации ансамбля реализаций случайных процессов / Н.Н. Погребняк // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. – 1998. - №2. - С.67-73.

105. Шидловский А.К. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения / А.К. Шидловский, Э.Г. Куренный. – К.: Наук. думка, 1984. – 273 с.

106. Погребняк Н.Н. Анализ режимов сетей электроснабжения имитационными методами / Н.Н. Погребняк // Энергетика и электрификация. – 1999. - №2. – С. 22-24.

107. Электротехнический справочник. Т.2 / Под общ. ред. П.Г. Грудинского и др. - [5-е изд.]. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.

108. Довгалюк О.Н. Учет влияния вероятностного характера нагрузок электрических сетей на величину показателей качества электроэнергии / О.Н. Довгалюк // Світлотехніка та електроенергетика. – 2006. - №7-8. - С.54-64.

109. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н.П Бусленко. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1968. – 356 с.

110. Бакалов В.П. Цифровое моделирование случайных процессов / В.П. Бакалов. — М.: МАИ, 2002. — 88 с. — (Серия «Конспекты лекций по радиотехническим дисциплинам»).

111. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. — [3-е изд.]. — М.: Радио и связь, 1989. — 656 с.

112. Белоконов И.В. Статистический анализ динамических систем: Учебное пособие /И.В. Белоконов. — Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. — 256 с.

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

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

123. Свідоцтво 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. 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.

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

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

129. Луговой А.В., Родькін Д.Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин // ЕЛЕКТРОінформ. – 2001. – №1. – С.14-16.

130. Чорний О.П., Курбанова І.Г. Компьютеризовані комплекси для діагностики машин // ЕЛЕКТРОінформ. – 2004. – №1. – С.19-22

131. <http://www.icpe.ro>

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. <http://www.dr-staiger-mohilo.de>

135. <http://www.aviaok.com>

136. <http://www.zaonipo.perm.ru>

137. <http://www.markos.ukrbiz.net/production/device5.htm>

138. 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.

139. 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.

140. 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.

141. 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.

142. Соловьев А.Л. Защита асинхронных электрических двигателей напряжением 0,4 кВ. Учебное пособие / А.Л. Соловьев. – СПб.: ПЭИПК, 2007. – 72 с.

143. Півняк Г.Г. Експериментальні дослідження завантаженості електромережного обладнання з метою підвищення ефективності систем підземного електропостачання. [Текст] / Півняк Г.Г., Заїка В.Т. // Вісник ВТУ. Вінниця. 1999. № 6. С. 26-32.

144. Закіров Д.Г. Концептуальні основи енергозбереження у вугільній промисловості Росії. [Текст] / Вугілля. 2000. № 4. С. 13-16.

145. Волотковский С.А. Электрификация стационарных установок шахт: Справочное пособие. [Текст] / С.А. Волотковский, Д.К. Крюков, Ю.Т. Разумный и др. // Под общей ред. Г.Г. Пивняка – М.: 1990 – 399с.

146. Півняк Г.Г. Цифрова обробка інформації для контролю енерговикористання гірничих машин і комплексів з програмною імітацією схем включення первинних перетворювачів. [Текст] / Півняк Г.Г., Заїка В.Т., Розумний Ю.Т., Рибалко А.Я. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. 2000. Вип. 65. С. 27-31.

147. Стариков Б.Я. Асинхронный электропривод очистных комбайнов. [Текст] / Б.Я. Стариков, В.Л. Азарх, З.М. Рабинович. // М., Недра, 1981. 288с.

148. Авилов-Карнаухов Б.Н. Нормирование электроэнергии для угольных шахт. [Текст] / - М.: Углетехиздат, 1958, - 199 с.

149. Гофман И.В. Организация и планирование энергохозяйства промышленных предприятий. [Текст] / Гофман И. В., Госпитальник Г. Л. - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1954.—440 с.

150. 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>.

151. 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.

152. 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.

153. 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.

154. 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.

155. 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.

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

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

160 с.

158. 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.

159. 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.

160. 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.

161. Коваленский И.В. Релейная защита электродвигателей высокого напряжения / И.В. Коваленский. - Л.: Энергия, 1964. – 81 с.

162. 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>.

163. Подстанция. Трансформатор. Двигатель. Сборные шины. Защита и контроль : каталог Schneider Electric. Серия Sepam. – 2001. – 74 с.

Додаток А

Протокол програми “Діагностування параметрів АД”

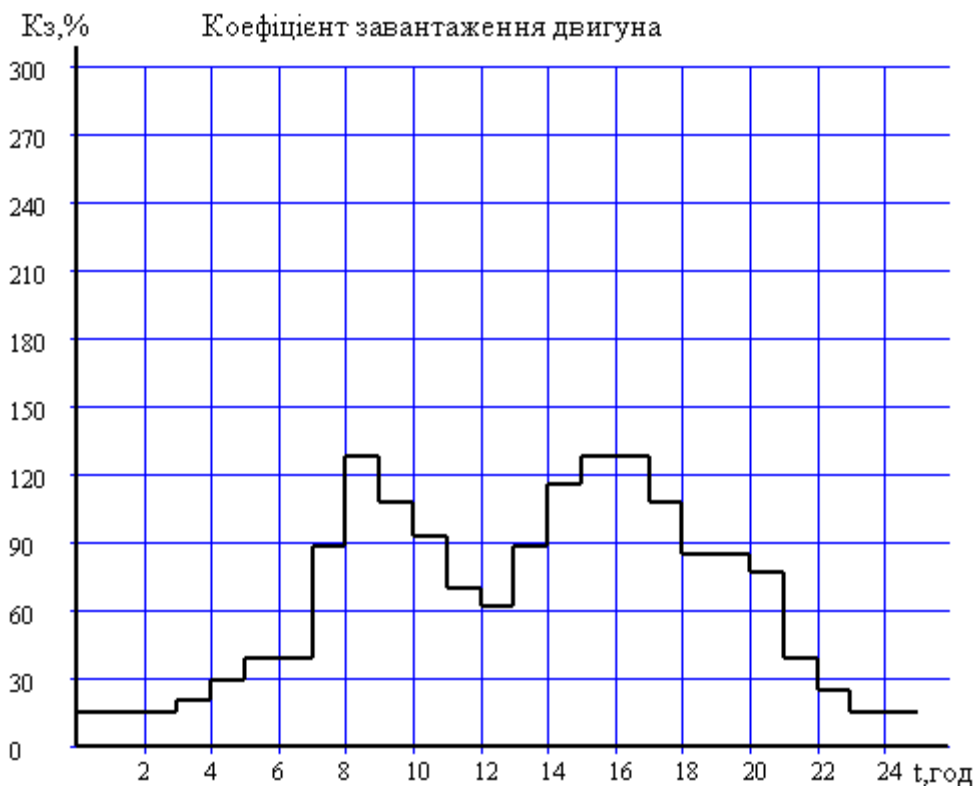
Дата проведення вимірювань: 25.10.2012 11:32:26

Назва агрегату: Асинхронний двигун

АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН

номінальна потужність на валу	160000 Вт
номінальна частота обертання ротора	1487 об/хв
номінальний струм	263,81 А
номінальний коефіцієнт потужності	0,9 А
номінальний ККД	96,2 %
перевантажувальна здатність	4,5 в.о.
кількість полюсів	2
номінальна частота мережі	50 Гц
номінальна напруга	400 В

Середнє навантаження АД: 65,08 % номінального значення



АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ АД

Середнє діюче значення фазної напруги	230,2 В
номінальне значення	230,94 В
відхилення	-0,32 %

Діючі значення напруги в фазах			
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, В	221,34	221,35	221,35
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,84

Середнє діюче значення струму	196,35 А
Діючі значення струму в фазах	

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, А	188,79	188,79	188,8
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,84

Середня активна потужність	108398,35 Вт
Активна потужність в кожній фазі двигуна	

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, кВт	34,74	34,74	34,75
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,84

Середня повна потужність	135595,65 ВА
Повна потужність в кожній фазі двигуна	

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, кВА	43,46	43,46	43,46
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,84

Середня реактивна потужність	73829,75 вар
Реактивна потужність в кожній фазі двигуна	

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, квар	23,66	23,66	23,66
Відхилення, %	-3,84	-3,85	-3,85

Середнє значення коефіцієнта потужності	0,72 в.о.
Коефіцієнт потужності в кожній фазі двигуна	

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, в.о.	0,69	0,69	0,69
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,84

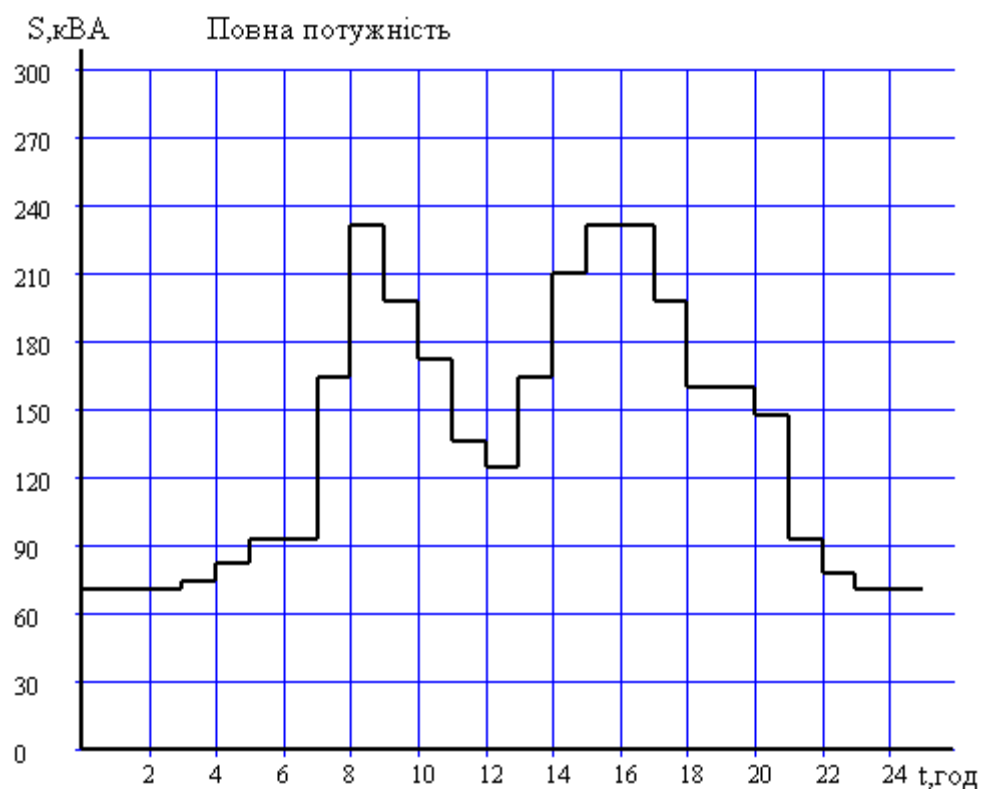
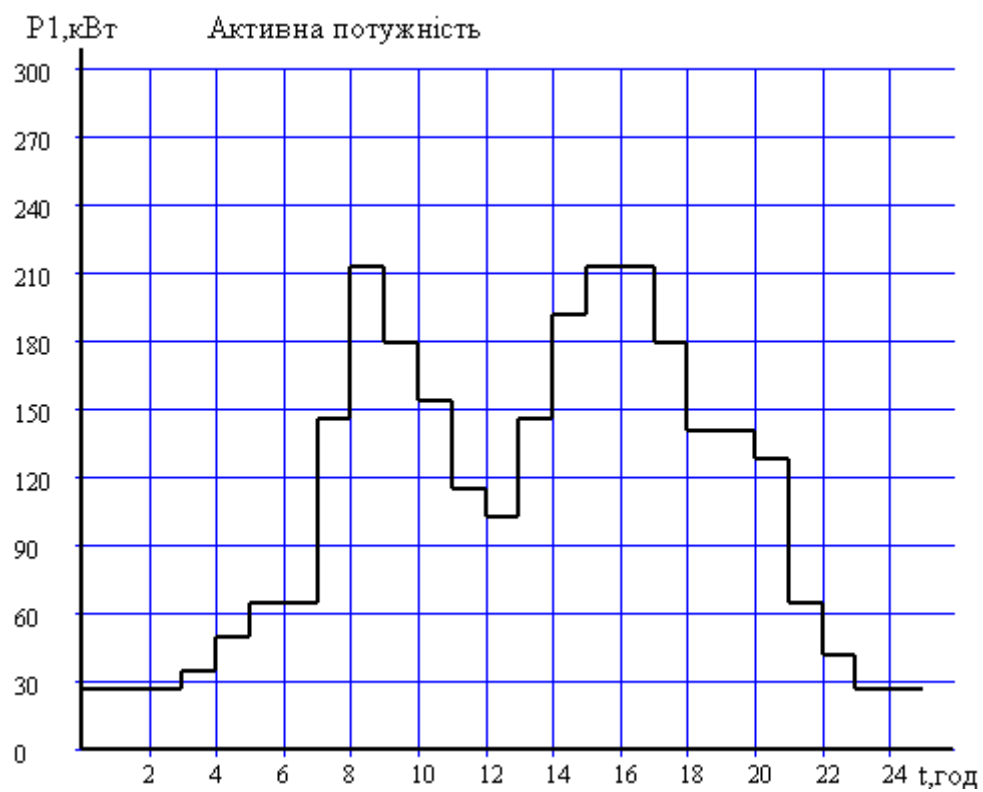
Середня потужність спотворення

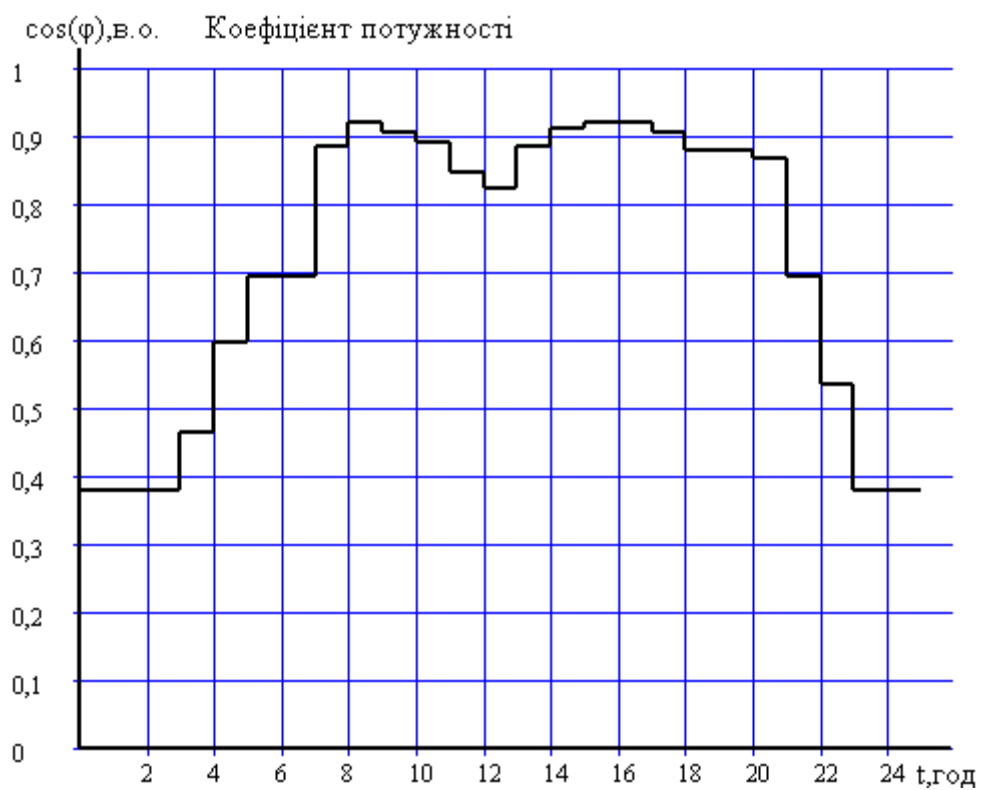
94,44 ВА

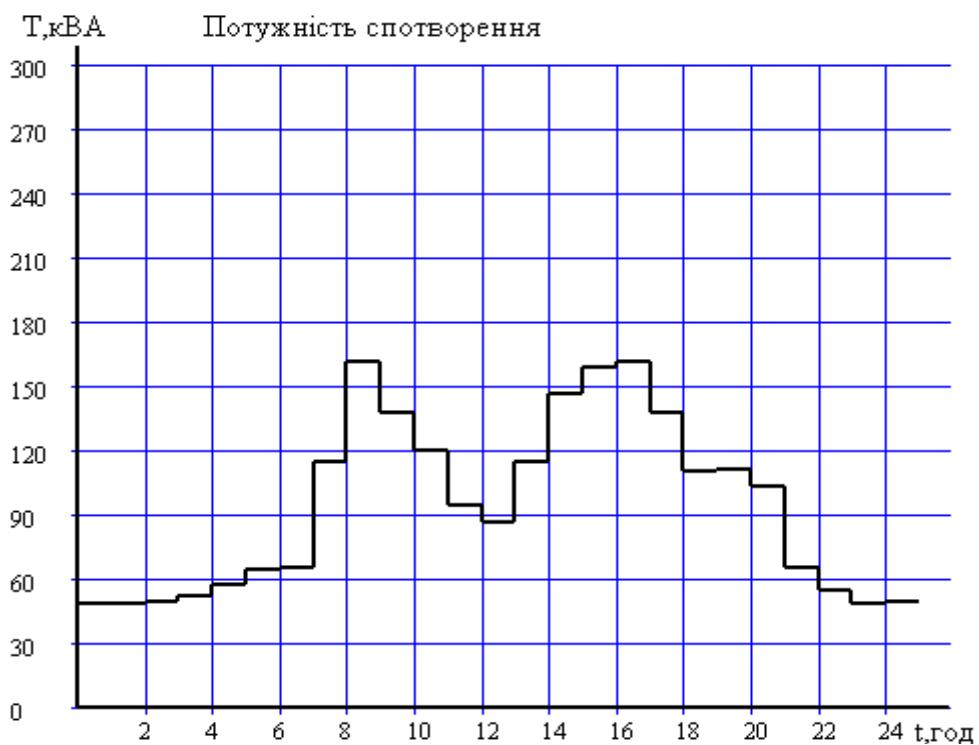
Потужність спотворення кожної фази двигуна

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, ВА	90,61	90,28	91,53
Відхилення, %	187,84	186,78	190,76



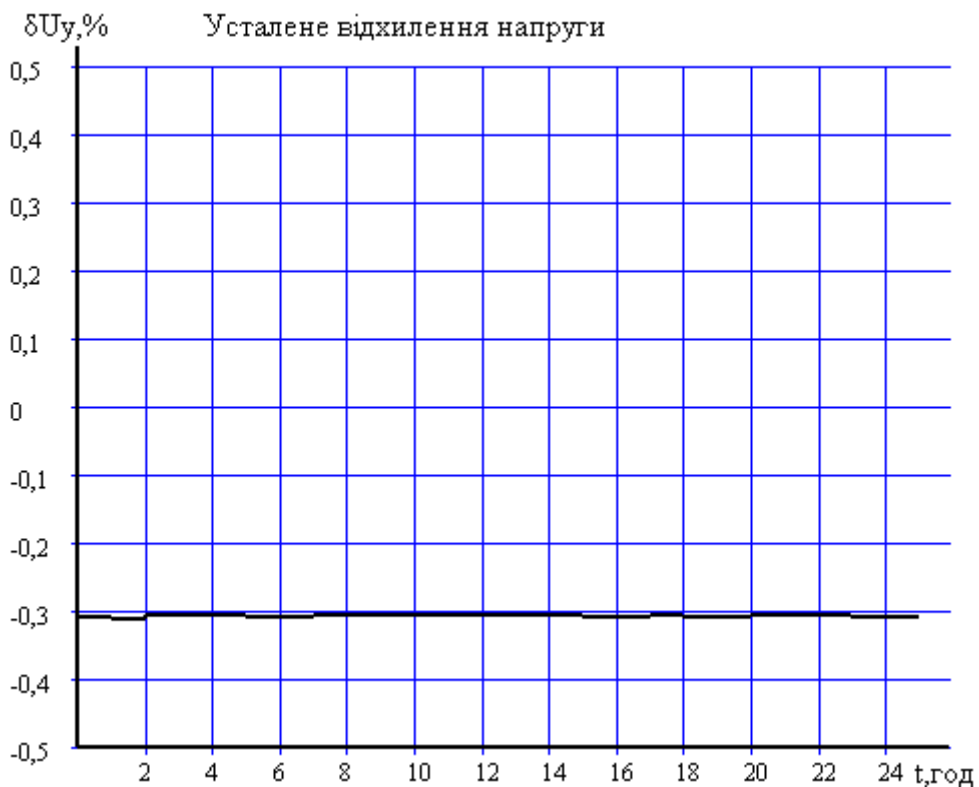


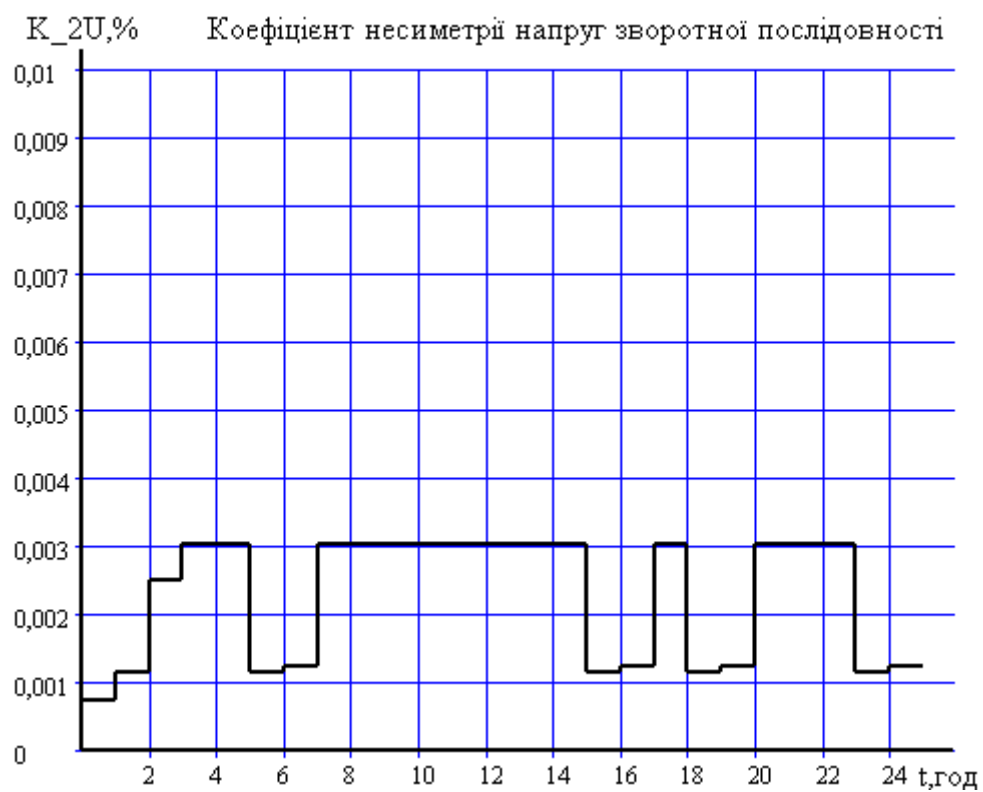




АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Середнє усталене відхилення напруги	-0,32 %
Середній коефіцієнт несиметрії напруг зворотної послідовності	0 %
Середній коефіцієнт несиметрії напруг нульової послідовності	0 %





АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АД

Приведений струм ротора АД 157,97 А

Приведений струм ротора в кожній фазі АД

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, А	151,89	151,89	151,9
Відхилення, %	-3,85	-3,85	-3,84

Середнє значення струму намагнічування 90,83 А
 номінальне значення 88,28 А
 відхилення 2,89 %

Струм намагнічування кожної фази

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, А	87,34	87,34	87,33
Відхилення, %	-3,84	-3,85	-3,85

Ковзання двигуна 0,006 в.о.
 номінальне значення 0,009 в.о.
 відхилення -33,67 %

Момент двигуна від струмів прямої послідовності 668,66 Нм
 Гальмівний момент двигуна 0 Нм







ОПОРИ

Середнє значення загального опору 2,518 Ом

Загальний опір фаз статора АД

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	2,42	2,42	2,42
Відхилення, %	-3,85	-3,84	-3,85

Середнє значення сумарного активного опору 2,514 Ом

Сумарний активний опір фази обмоток двигуна

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	2,42	2,42	2,42
Відхилення, %	-3,85	-3,84	-3,85

Середнє значення індуктивного опору намагнічування 2,536 Ом

номінальне значення 2,616 Ом

відхилення -3,05 %

Індуктивний опір кола намагнічування фаз

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	2,44	2,44	2,44
Відхилення, %	-3,85	-3,84	-3,84

Середнє значення активного опору фази АД 0,013 Ом

номінальне значення 0,013 Ом

відхилення 0,06 %

Активний опір фаз статора

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	0,01	0,01	0,01
Відхилення, %	-3,88	-3,87	-3,78

Середнє значення приведенного активного опору фази ротора
 номінальне значення 0,008 Ом
 відхилення 0,008 Ом
 1,23 %

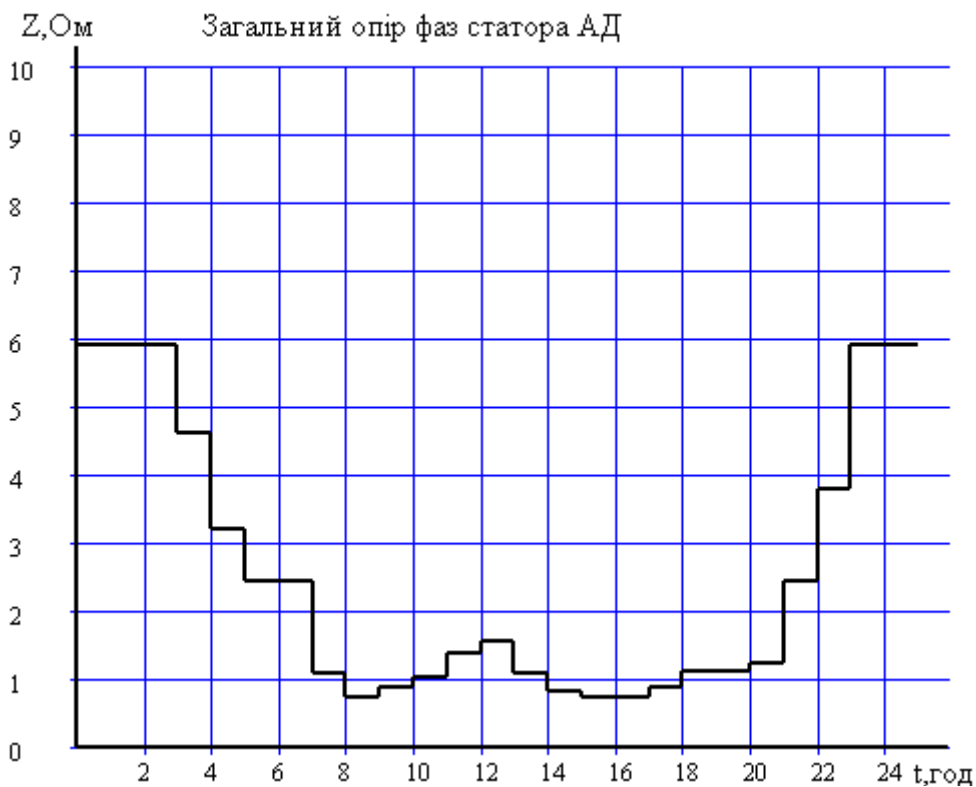
Приведений активний опір фаз ротора

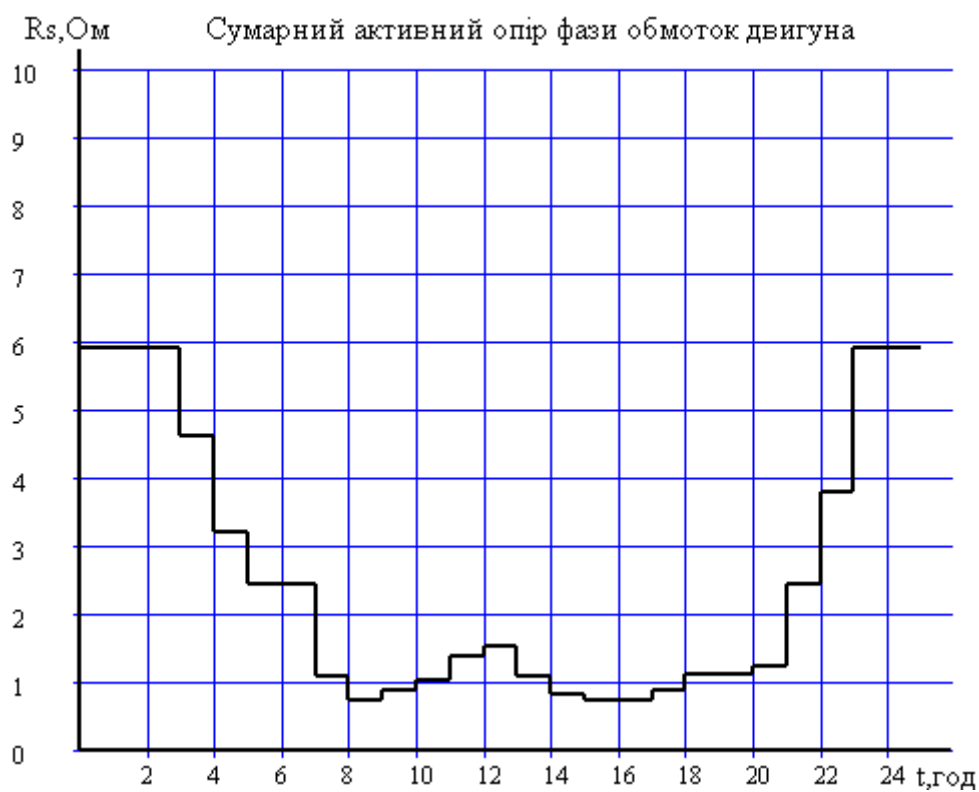
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	0,01	0,01	0,01
Відхилення, %	-3,85	-3,84	-3,85

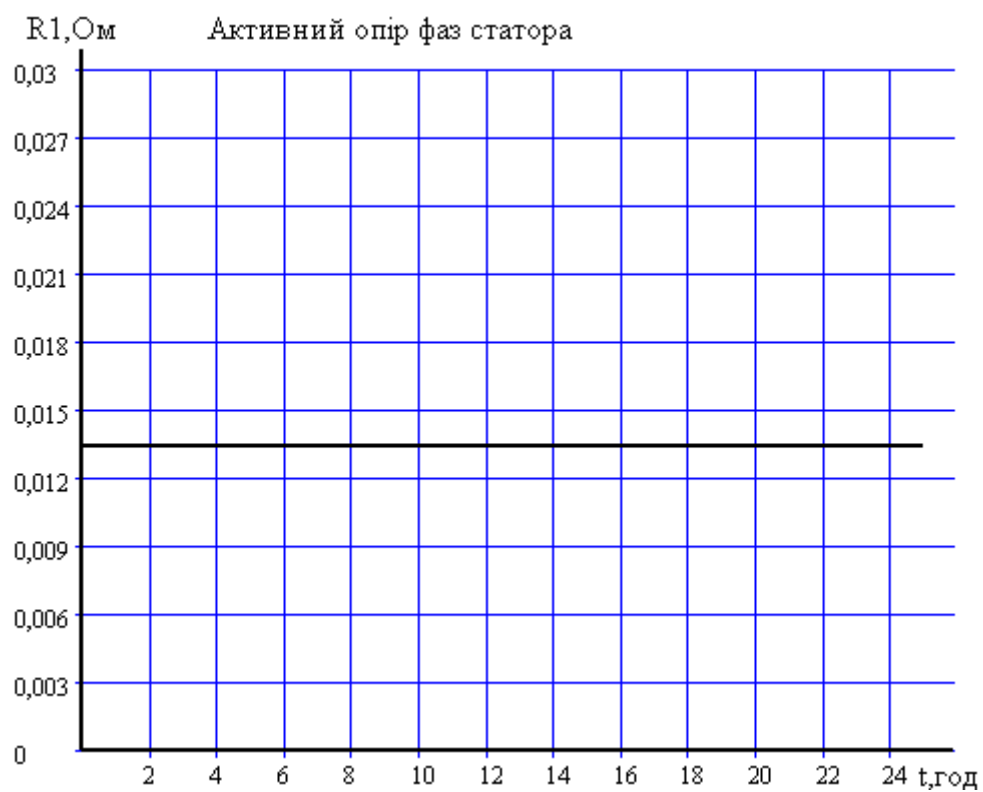
Середнє значення індуктивного опору фази АД
 номінальне значення 0,108 Ом
 відхилення 0,108 Ом
 -0,01 %

Індуктивні опори короткого замикання фаз

	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Значення, Ом	0,1	0,1	0,1
Відхилення, %	-3,85	-3,84	-3,85



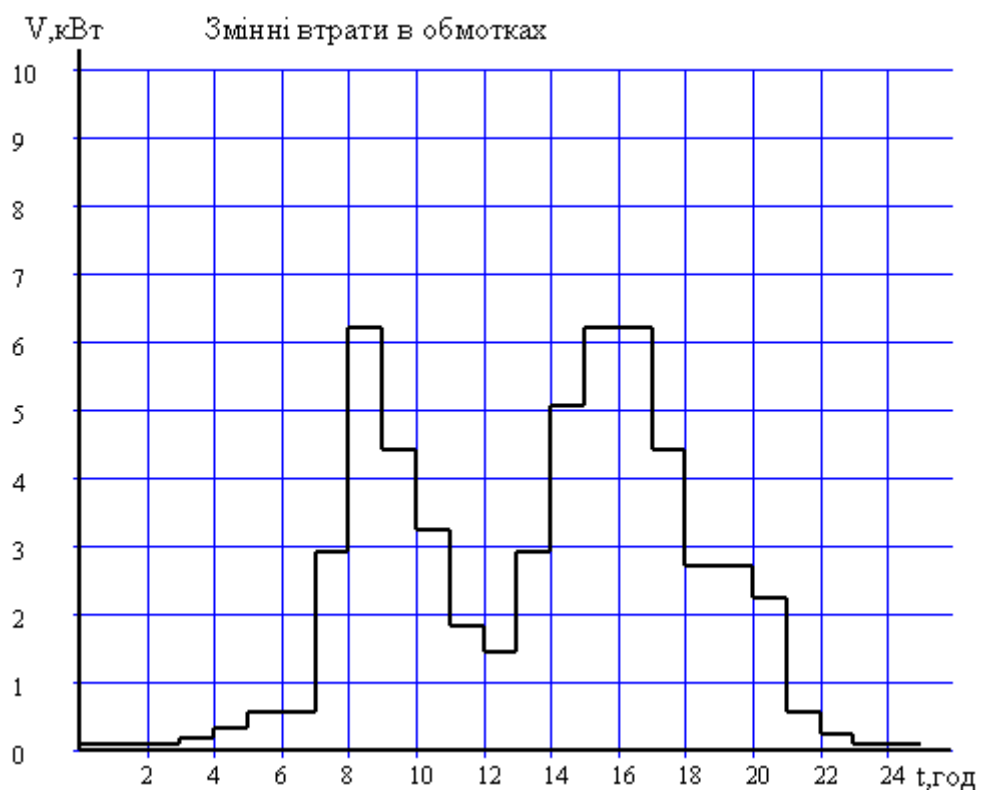


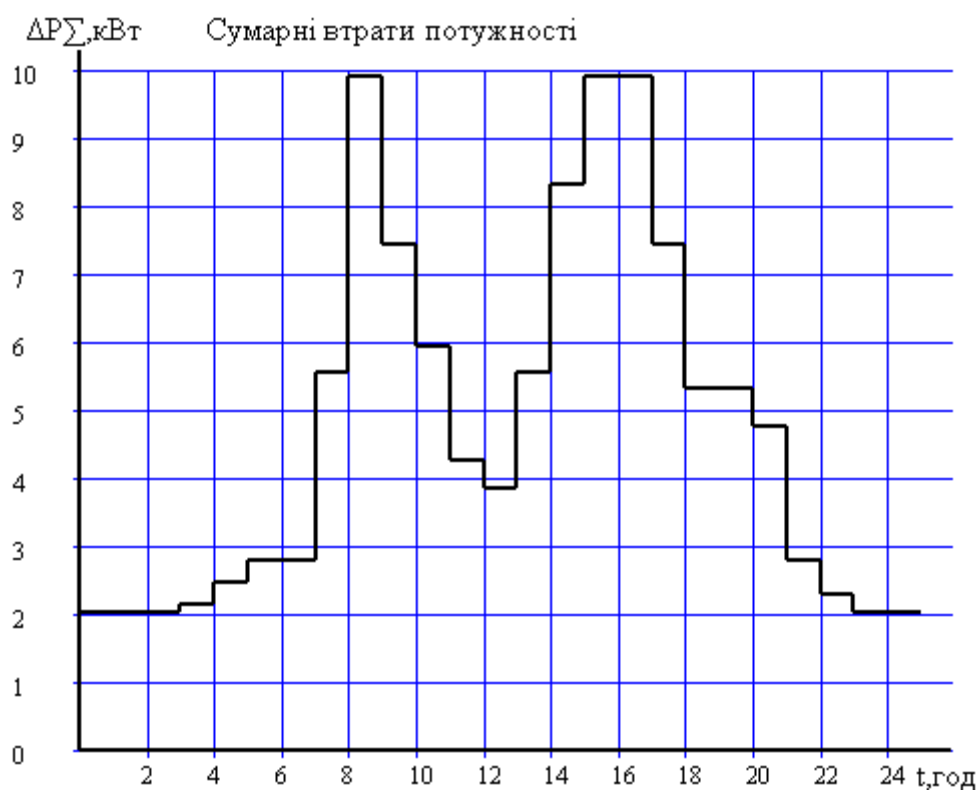


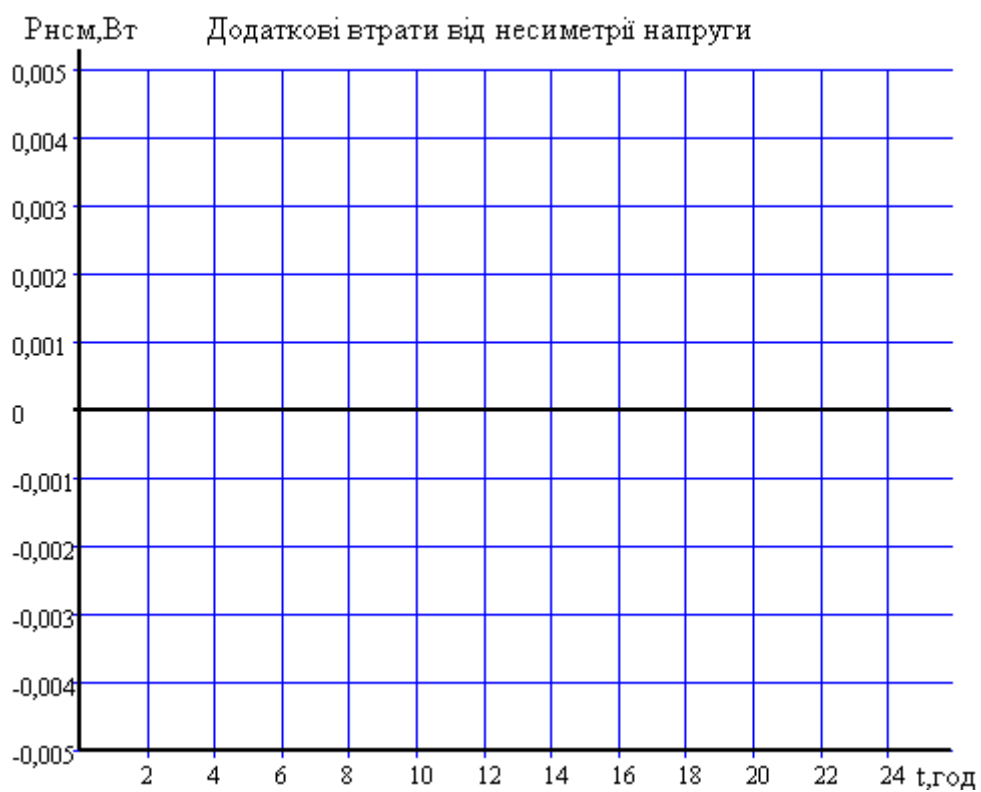


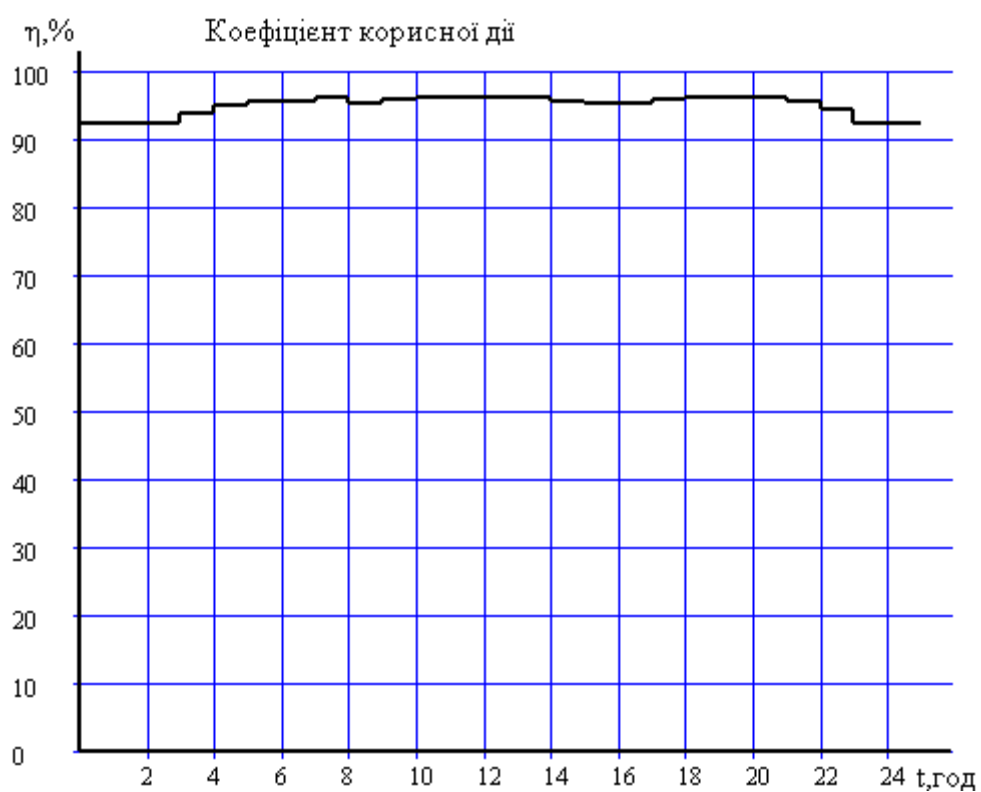
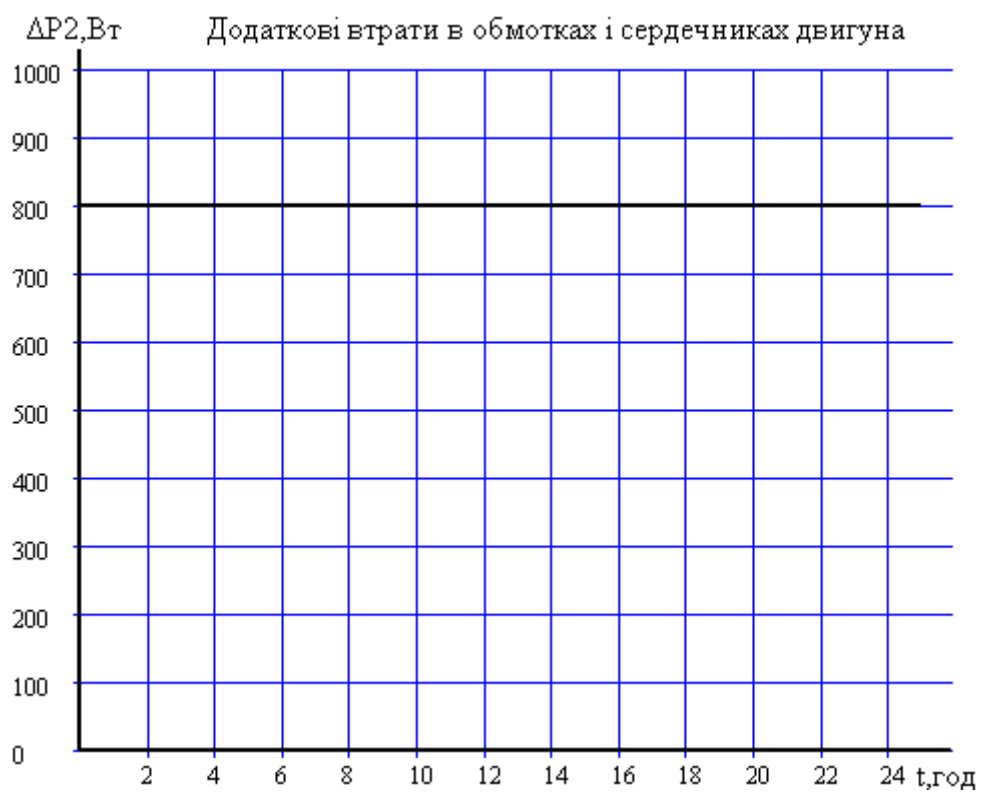
АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ СПОЖИВАНОЇ ЕНЕРГІЇ АД

Змінні втрати в обмотках	2216,36 Вт
Постійні втрати потужності	2063,59 Вт
номінальне значення	1832,24 Вт
відхилення	12,63 %
Додані (паразитні) втрати	479,97 Вт
Сумарні втрати потужності	4759,93 Вт
Додаткові втрати	
від несиметрії напруги	0 Вт
від несинусоїдальності напруги	0 Вт
в обмотках і сердечниках двигуна	800 Вт
Коефіцієнт корисної дії	95,03 %
номінальне значення	96,2 %
відхилення	-1,22 %
Електромагнітна потужність на валу АД	104118,39 Вт











ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ АД ЗА ЦИКЛ РОБОТИ

Активна енергія споживана з мережі	2683,25 кВт*год
Реактивна енергія споживана з мережі	1780,59 квар*год
Сумарні втрати енергії	116,98 кВт*год
Змінні втрати енергії в обмотках	55,31 кВт*год
Постійні втрати енергії	49,69 кВт*год
Додані (паразитні) втрати енергії	11,98 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 Б

Протокол програми “Визначення залишкового ресурсу АД”

Протокол розрахунку залишкового ресурсу АД

Дата проведення розрахунку: 25.10.2012 21:34:57

ВХІДНІ ДАНІ

номінальні втрати	6320 Вт
максимальна температура ізоляції	120 град.
b	-0,09
початковий знос	0 год
номінальний ресурс	175200 год
час дискретизації	1 хв

Кількість вхідних файлів: 7

- 0 C:\Program срока служби\Program\Дані несиметрія\resurs_res1.mat
- 1 C:\Program срока служби\Program\Дані несиметрія\resurs_res2.mat
- 2 C:\Program срока служби\Program\Дані несиметрія\resurs_res3.mat
- 3 C:\Program срока служби\Program\Дані несиметрія\resurs_res4.mat
- 4 C:\Program срока служби\Program\Дані несиметрія\resurs_res5.mat
- 5 C:\Program срока служби\Program\Дані несиметрія\resurs_res6.mat
- 6 C:\Program срока служби\Program\Дані несиметрія\resurs_res7.mat

