

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

На правах рукопису

ОБОРОНОВ ТАРАС ЮРІЙОВИЧ

УДК 62-83-52.003(082)

**МОДЕЛІ І ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ
ЕНЕРГЕТИЧНОГО І ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Дисертація

на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
доцент Печеник Микола Валентинович

Київ – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ ТА ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК	13
1.1 Аналіз насосних установок з асинхронними та синхронними двигунами ...	13
1.2 Аналіз методів діагностування енергетичного та технічного стану синхронного електроприводу насосних установок	18
1.3 Аналіз засобів діагностування енергетичного та технічного стану насосних установок з синхронними двигунами	26
1.4 Постановка задачі дослідження.....	39
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК.....	41
2.1. Формування сукупності факторів впливу на енергетичний та технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами	41
2.2 Визначення ознак аварійних режимів синхронних двигунів	49
2.3 Моделювання кореляційних функцій та вибір кроку дискретизації процесу електроспоживання насосних установок з синхронними двигунами.....	54
2.4. Залишковий ресурс синхронних двигунів та його прогнозування	62
2.5. Визначення технічного стану електроприводу насосних установок з синхронними двигунами	67
Висновки до розділу 2	79
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З НАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ	80

3.1. Модель розрахунків робочих параметрів синхронного електропривода за паспортними даними.....	80
3.2. Дослідження енерговикористання синхронних двигунів за допомогою еталонної моделі.....	88
3.3. Модель діагностування параметрів процесу перетворення електроенергії електромеханічними системами з синхронними двигунами.....	91
3.3.1. Модель визначення параметрів процесу енергоспоживання синхронних двигунів	91
3.3.2. Моделі визначення параметрів схеми заміщення та енерговикористання синхронних двигунів.....	101
3.4. Перевірка на адекватність моделі діагностування енергетичного стану насосних установок з синхронними двигунами.....	105
3.5. Дослідження енергетичних характеристик синхронних двигунів з урахуванням впливу зниження якості напруги живлення	108
3.6. Дослідження енергетичних характеристик синхронних двигунів з урахуванням впливу механічного навантаження	113
3.7. Таксонометричний показник оцінювання енергетичного та технічного стану синхронного електроприводу насосних установок.....	114
Висновки до розділу 3	119

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ

ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК З СИНХРОННИМИ

ДВИГУНАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ... 121

4.1. Апаратні рішення діагностування енергетичного та технічного стану синхронних електроприводів.....	121
4.2. Алгоритм діагностування енергетичного і технічного стану електроприводу насосних установок з синхронними двигунами.....	126

4.3. Програмне забезпечення автоматизованого робочого місця діагностування енергетичного та технічного стану насосних установок з синхронними двигунами.....	129
4.4. Верифікація теоретичних положень і отриманих наукових результатів ...	133
Висновки до розділу 4	138
ВИСНОВКИ.....	140
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	142
ДОДАТКИ.....	160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

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

IE – international Efficiency;

LCC - analysis – Life Cycle Costs analysis;

АКФ – автокореляційна функція;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЕМС – електромеханічна система;

ЕН – електричне навантаження;

ЕП – електричний привод;

КЗ – коротке замикання;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НУ – насосна установка;

ОЗ – обмотка збудження;

ПЕОМ – персональна електронна обчислювальна машина;

ПФ – передатна функція;

ПЯЕ – показники якості електроенергії;

СД – синхронний електродвигун;

СЕП – синхронний електропривод;

СКВ - середньо-квадратичне відхилення.

ВСТУП

Близько 70% насосних установок на підприємствах України експлуатуються з перевищенням установленого строку служби, що призводить до низької їх якості функціонування, високої аварійності та виходу з ладу електромеханічного обладнання. Середній строк служби електропривода по галузі не перевищує 5 років. Щорічно виходять з ладу і ремонтуються до 10–15% електродвигунів та до 30% допоміжного обладнання. Переважна більшість двигунів може ремонтуватися 3-4 рази й після ремонту часто не відпрацьовує навіть одного року [4].

Експлуатація електроприводів насосних установок з синхронними двигунами, які знаходяться в незадовільному технічному стані, призводить до збільшення фінансових витрат, зумовлених зростанням електроспоживання. Вартість електроенергії, яку споживає електропривод НУ протягом строку експлуатації, значно перевищує вартість устаткування та витрати на обслуговування і більше ніж в 5 разів перевищує його власну [14]. Плата за електроенергію містить систему надбавок за додатково спожиту реактивну потужність. Плата за реактивну потужність на підприємствах становить до 10% від загальних витрат на електроенергію, і ці витрати мають тенденцію до зростання [70].

На сьогодні виникла необхідність застосування новітніх технічних рішень і наукових підходів до вирішення проблеми підвищення рівня якості функціонування синхронних електроприводів насосних установок.

Актуальність теми. Основними причинами низької якості функціонування синхронних електроприводів (СЕР) насосних установок (НУ) та виникнення аварій є порушення умов експлуатації, неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт тощо.

Синхронні електроприводи насосних установок, від надійної і безпечної роботи яких залежать технологічні та економічні показники підприємства не діагностуються постійно під час експлуатації. Особливо гостро ці вимоги пред'являються до електромеханічних систем, які є ланкою безперервного технологічного процесу.

На сьогодні рівень якості функціонування електромеханічних систем оцінюється головним чином під час проведення енергетичного аудиту, тому управління раціональним використанням енергії не поширюється на електромеханічні системи як кінцевих споживачів. У проектуванні технологічного процесу зазвичай не враховується енергетичний стан насосних установок з синхронними двигунами (НУ з СД) протягом усього строку служби. Але повинна розглядатися не тільки оцінка завантаження НУ з СД і не лише їх робочі характеристики, а слід здійснювати оцінювання енергетичного стану установок за період функціонування. Цю проблему можливо вирішити шляхом впровадження постійно діючого діагностування енергетичного і технічного стану системи для визначення рівня відхилення характеристик електроприводу від заданих значень і ознак погіршення стану і порушення технологічного режиму.

Отже, актуальним завданням є розроблення та впровадження нових підходів до вирішення проблеми підвищення якості функціонування СЕП НУ. Дієвими заходами можуть стати: розроблення засобів діагностування енергетичного і технічного стану та технологічних заходів з економії електроенергії СЕП. Вартість цих заходів незначна в порівнянні з витратами на реалізацію традиційних проектів. Програмне забезпечення та витрати на апаратну частину становлять значну частку загальних витрат, тому впровадження результатів роботи дозволить: зменшити витрати електроенергії СЕП НУ; здійснювати попереджувальне обслуговування та керування їх енергетичним і технічним станом; виявляти неефективні режими роботи установок та приймати обґрунтовані рішення щодо подальшої їх експлуатації; уникнути значних витрат

на ремонт пошкодженого устаткування шляхом своєчасного виявлення несправностей.

Чільне місце в дослідженнях з метою підвищення якості функціонування та ресурсу устаткування займає діагностування СЕП. В основу наукових досліджень дисертаційної роботи покладено результати праць: з питань якості електроенергії – І.В. Жежеленка, В.Г. Кузнецова, Г.Г. Куренного, А.К. Шидловського; з питань енергетичного менеджменту – С.П. Денисюка, В.І. Дешка, О.В. Кириленка, Г.Г. Півняка, А.В. Праховника, В.П. Розена, Б.С. Стогнія; з діагностування і дослідження характеристик електропривода – М.Г. Баширова, О.С. Бешти, О.Д. Гольдберга, А.П. Калінова, В.Б. Клепікова, М.Ф. Котеленця, В.Ю. Кучерука, А.В. Лугового, В.В. Овчарова, С.М. Пересади, М.Г. Поповича, І.В. Прахова, О.В. Садового, В.Ф. Сивокобиленка, І.А. Сиромятнікова, Д.Й. Родькіна, В.М. Чермалиха, О.П. Чорного, Conrad U. Brunner, F. Carlsson, E. O. Schweitzer; з питань енергозбереження в електроприводі - В.Г. Аракеяна, І.Я. Браславського, Н.Ф. Ільїнського, В.В. Москаленка.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконані відповідно до напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-IV від 09.10.2010 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», Комплексній програмі НТУУ «КПІ» «Енергетика сталого розвитку». Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетних НДР: 2438-П «Розроблення принципів побудови багатофакторного моніторингу та діагностування електромеханічних систем стаціонарних установок гірничовидобувних підприємств» (№ ДР 0111U000763, 2011-2012 рр.), 2640-П «Оптимізація електроспоживання шахтних стаціонарних установок із застосуванням засобів діагностування їх енергоефективності (№ ДР 0113U001637 2013-2014 рр.), де здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня якості функціонування синхронного електроприводу насосних установок

шляхом застосування засобів діагностування та оцінювання їх енергетичного і технічного стану.

Для досягнення мети поставлено й розв'язано такі задачі:

1. Аналізування методів та засобів діагностування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами.

2. Встановлення інформативних факторів впливу на енергетичний і технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами.

3. Розроблення математичного та технічного забезпечення для встановлення енергетичного і технічного стану насосних установок з синхронними двигунами та прогнозування залишкового ресурсу.

4. Верифікація наукових результатів з використанням математичного моделювання, експериментів, аналітичної перевірки та результатів впровадження.

Об'єктом досліджень є процеси перетворення енергії в електроприводі насосних установок з синхронними двигунами.

Предметом досліджень є енергетичні характеристики синхронного електроприводу насосних установок в умовах дії збурюючих впливів.

Методи дослідження. Поставлені у роботі наукові завдання вирішуються шляхом застосування теорії електропривода, теорії електричних кіл та методів: математичного аналізу, розв'язання диференціальних рівнянь для моделювання режимів роботи електроприводу насосних установок, аналізу гармонічного складу кривих струмів і напруг, теорії ймовірності, математичного і комп'ютерного моделювання та теорії вимірювань, для створення системи діагностування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розвинуто метод діагностування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами, який враховує показники якості електричної енергії, режим навантаження і поєднує метод складових втрат і спектрального аналізу струмів та напруг, що дозволяє визначати енергетичний і технічний стан досліджуваної електромеханічної системи.

2. Вперше запропоновано для комплексного оцінювання стану електроприводу насосних установок використовувати таксонометричний показник, що ґрунтується на евклідовій мірі близькості енергетичних і технічних параметрів до значень норми і дозволяє визначати інтегральний вплив цих параметрів на функціонування установки.

3. Розвинуто метод визначення залишкового ресурсу синхронного двигуна, що базується на використанні прогнозної моделі, який на відміну від існуючих враховує режим навантаження та додаткові втрати, спричинені несиметрією та несинусоїдальністю напруги живлення, що дозволяє оцінювати величину скорочення строку служби з корекцією за температурою навколишнього середовища.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Створено методики, алгоритми, програмне забезпечення та апаратні рішення діагностування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами, які дозволяють здійснювати діагностування його енергетичного та технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу, а також виявляти порушення технологічного режиму роботи.

2. На основі отриманих залежностей ККД від режиму навантаження, технічного стану та якості напруги живлення доведено можливість визначення умов ефективної роботи насосних установок з синхронними двигунами.

3. Розроблено методику та програмний комплекс для визначення еталонної моделі синхронних двигунів, яка дозволяє виявляти характер залежності ККД від величини навантаження, розраховувати параметри схеми заміщення та енергетичні характеристики для номінального режиму роботи електроприводу.

4. Визначено діагностичні ознаки електричних та механічних аварійних режимів роботи насосних установок з синхронними двигунами, які дозволяють встановити тип ушкоджень і виконати їх своєчасний ремонт без зриву технологічного процесу.

5. Розроблено мобільний комплекс для дослідження електроприводу насосних установок, що дозволяє здійснювати верифікацію отриманих методик діагностування технічного стану електромеханічних систем.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено в ТЗОВ СП «НИВА» (Дубенський цукровий завод) (м. Дубно Рівненської обл.) та ВП «Жданівський цукровий завод» (с. Жданівка Вінницької обл.), при розробці засобів діагностування синхронних електроприводів насосних установок.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматизації управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» в курсах спеціальності 7.05070204 і 8.05070204 – «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», при вивченні дисципліни «Комп'ютерне управління технологічними процесами, експериментом, обладнанням». Впровадження результатів досліджень підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать в роботах: [73, 101, 105] – аналіз сучасних методів регулювання якості електроенергії та їх вплив на СЕП НУ; [107, 121] – визначення електричних аварійних режимів електродвигунів, та ознак які на них вказують; [101, 124, 149] – діагностування енергетичного стану НУ з СД; [69, 144] – запропоновано проводити таксонометричне оцінювання енергетичного та технічного стану НУ з СД; [129, 148] – запропонована методика визначення енергетичного стану електроприводів з синхронними двигунами із використанням миттєвих значень струмів і напруг; [132, 157] – розроблена еталонна модель та методика розрахунку параметрів СД за паспортними даними; [159] – запропоновано визначення піків спектрів струмів і напруг двигуна установки при різних несправностях механізму.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові й практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XX Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого

електропривода. Теорія і практика” (сmt. Малий Маяк, АР Крим, 2013 р.), XIV Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика" (м. Кременчук, 2013 р), II науково-технічній конференції “Енергетика. Екологія. Людина” (м. Київ, 2010 р.), III науково-технічній конференції “Енергетика. Екологія. Людина” (м. Київ, 2011 р.), IV науково-технічній конференції “Енергетика. Екологія. Людина” (м. Київ, 2012 р.), V Міжнародній науково-технічній конференції “Енергетика. Екологія. Людина” (м. Київ, 2013 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в 14 друкованих працях, 7 опубліковано в наукових фахових виданнях, з них 2 в наукових виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Ulrich’s Periodical Directory та Index Copernicus, 2 свідоцтва про реєстрацію авторських прав, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (159 найменувань) і додатків. Основний зміст викладений на 141 сторінці друкованого тексту, містить 58 рисунків і 5 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 191 сторінка.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ ТА ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

1.1 Аналіз насосних установок з асинхронними та синхронними двигунами

Особливе значення має застосування насосів, насосних установок або насосних станцій у системах водопостачання та водовідведення, де вони є одним з основних вузлів. У системах водопостачання насоси забезпечують подачу води споживачам: промисловим підприємствам, тепловим електростанціям, житловим кварталам населених пунктів. У системах опалення й гарячого водопостачання за допомогою насосних установок здійснюється циркуляція гарячої води. У системах водовідведення насоси забезпечують подачу стічної рідини на очисні споруди або перекачування її зі знижених районів населених місць в основні міські або районні колектори.

Насоси являють собою гідравлічні машини, призначені для переміщення рідин під тиском. Перетворюючи механічну енергію привідного двигуна на механічну енергію рідини, що рухається, насоси піднімають рідину на певну висоту, подають її на необхідну відстань у горизонтальній площині або змушують циркулювати в будь якій замкнутій системі.

Основними параметрами насосів, що визначають діапазон зміни режимів роботи насосної станції, склад її обладнання й конструктивні особливості, є напір, подача, потужність і коефіцієнт корисної дії.

Напір являє собою збільшення питомої енергії рідини на ділянці від входу в насос до виходу з нього. Виражений у метрах напір насоса визначає висоту підйому або дальність переміщення рідини.

Подача характеризується обсягом рідини, що подається насосом у напірний трубопровід за одиницю часу, і вимірюється, звичайно, в м³/с, л/с або м³/год.

Потужність, витрачена насосом, потрібна для створення напору й подолання всіх видів втрат, неминучих при перетворенні механічної енергії на енергію руху рідини по трубопроводах. Вимірювана у кВт потужність насоса визначає потужність привідного двигуна й сумарну потужність насосної станції.

Коефіцієнт корисної дії враховує всі види втрат, пов'язаних з перетворенням насосом механічної енергії двигуна в енергію рідини, що рухається. ККД визначає економічну доцільність експлуатації насоса зі зміною інших його робочих параметрів (напору, подачі, потужності). [1]

Більш логічною є класифікація, заснована на особливостях у принципі дії. Із цього погляду всі існуючі насоси можуть бути поділені на два види: динамічні й об'ємні.

У динамічних насосах рідина рухається під силовим впливом у камері постійного об'єму, що поєднана із підводними і відводними пристроями. Залежно від виду силового впливу на рідину динамічні насоси, у свою чергу, розподіляються на лопатеві насоси й насоси тертя.

Об'ємні насоси працюють за принципом витиснення рідини з камери за рахунок зменшення її обсягу. Періодична зміна обсягу камери відбувається за рахунок зворотно – поступального або обертового руху робочого органу насоса. Позмінне заповнення камери перекачуваною рідиною та її спорожнювання забезпечуються клапанними пристроями вхідного й вихідного патрубків насоса. [2]

Вибір типу насоса в кожному конкретному випадку відбувається з урахуванням його експлуатаційних і конструктивних якостей, що найбільш повно задовольняють технологічному призначенню насосної станції. [1]

Порівняно з іншими видами динамічні насоси відрізняються простотою конструкції, високим ступенем уніфікації вузлів насосів одного типу, невеликими габаритними розмірами, низькою вартістю. Перевага динамічних насосів полягає також у можливості безпосереднього з'єднання валів насосів з валами електродвигунів, швидкохідних турбін і регулювання подачі насосів у широких межах.

Динамічні насоси підрозділяються на відцентрові та вихрові.

Переваги відцентрових насосів перед поршневими:

- висока продуктивність і рівномірна подача;
- компактність і швидкість (можливість безпосереднього приєднання до електродвигуна);
- простота пристрою, що дозволяє виготовляти їх з хімічно стійких, що важко піддаються механічній обробці матеріалів;
- можливість перекачування рідин, що містять тверді зважені частки, завдяки більшим зазорам між лопатками й відсутності клапанів;
- можливість встановлення на легких фундаментах.

До недоліків відцентрових насосів варто віднести досить низький напір, а також зменшення продуктивності при збільшенні опору мережі й різке зниження ККД при зменшенні продуктивності.

У рух насосні установки приводять синхронні та асинхронні двигуни. Електроприводи установок поділяються на регульовані та нерегульовані. Зміна обертів насосу є найбільш ефективним способом регулювання його параметрів [1,2,5,15,16]. Якщо не змінюється гідравлічний опір мережі, регулювання практично здійснюється зі сталою величиною ККД насосу. Відомо [1,2], що зменшення швидкості лише на 10% призводить до економії близько 27% енергії. Можливі технічні рішення для зміни обертів насосних установок представлені на рис.1.1

Для зміни швидкості можливе використання нерегульованих електроприводів з асинхронними чи синхронними двигунами, під'єднаних до насосів через муфти [17]. Гасіння зайвої енергії для зменшення швидкості відбувається у муфті (гідравлічній, електричній).

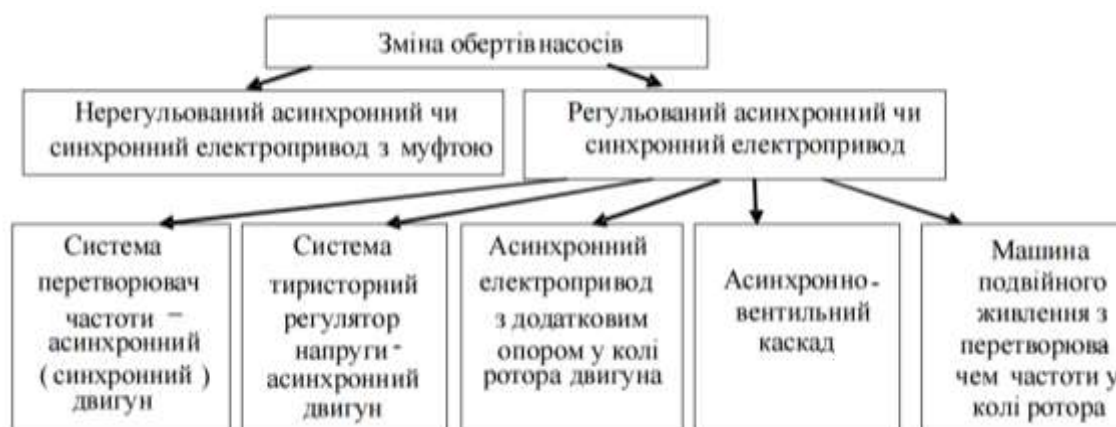


Рис. 1.1 Технічні рішення для зміни обертів насосу

Більш ефективним є використання керованих електроприводів як з асинхронними, так і з синхронними двигунами. У цьому випадку з мережі живлення за допомогою перетворювача для приводу насосу подається лише енергія, достатня для забезпечення робочого режиму. Найбільшого поширення на даний момент для насосів набувають електроприводи системи перетворювач частоти – асинхронний (синхронний) двигун [4,18-25]. Сучасні перетворювачі частоти окрім регулювання параметрів напруги живлення двигунів надають можливість замкненого регулювання технологічних параметрів насосу та формування “насосних” ($u/f^2 = \text{const}$) механічних характеристик, які сприяють плавності їх пуску [26]. Більшість з перетворювачів також реалізує алгоритми векторного керування координатами електропривода, що суттєво покращує його статичні та динамічні характеристики та полегшує інтеграцію електроприводів в складні, багатоконтурні, багатовимірні, розподілені, нестационарні системи керування водопостачанням [27].

Система тиристорний регулятор напруги (ТРН) – асинхронний двигун має дуже обмежений діапазон регулювання швидкості [17,28-30]. Для його розширення необхідне використання спеціальних двигунів з підвищеним ковзанням або двигунів з фазним ротором, що збільшує втрати активної потужності. Таку систему часто використовують лише для забезпечення плавного пуску насосу, розглядаючи ТРН, як пристрій плавного пуску (soft starter) [13].

Є декілька варіантів реалізації електроприводів з додатковим опором у колі ротора асинхронного двигуна. Це релейно-контакторні схеми, які забезпечують поступове дискретне регулювання швидкості [28], а також схеми з випрямлячем і широтно-імпульсними транзисторними чи тиристорними модуляторами (ключами), які надають можливість плавного регулювання швидкості [31]. Загальним недоліком обох схем є гасіння зайвої енергії на додатковому опорі роторного кола. Підвищити ККД таких систем можливо при поверненні зайвої енергії в мережу живлення. Таку задачу вирішує асинхронно-вентильний каскад, який передбачає ввімкнення в роторне коло паралельно з некерованим випрямлячем керованого інвертора, з'єднаного з мережею через узгоджуючий трансформатор [17,28,31,32].

У випадку високих потужностей насосних установок знаходять використання нерегульовані електроприводи з синхронними двигунами (рис.1.2), та машини подвійного живлення, статорна обмотка яких під'єднується до високовольтової мережі безпосередньо, а роторна до низьковольтової через порівняно дешевий низьковольтний перетворювач

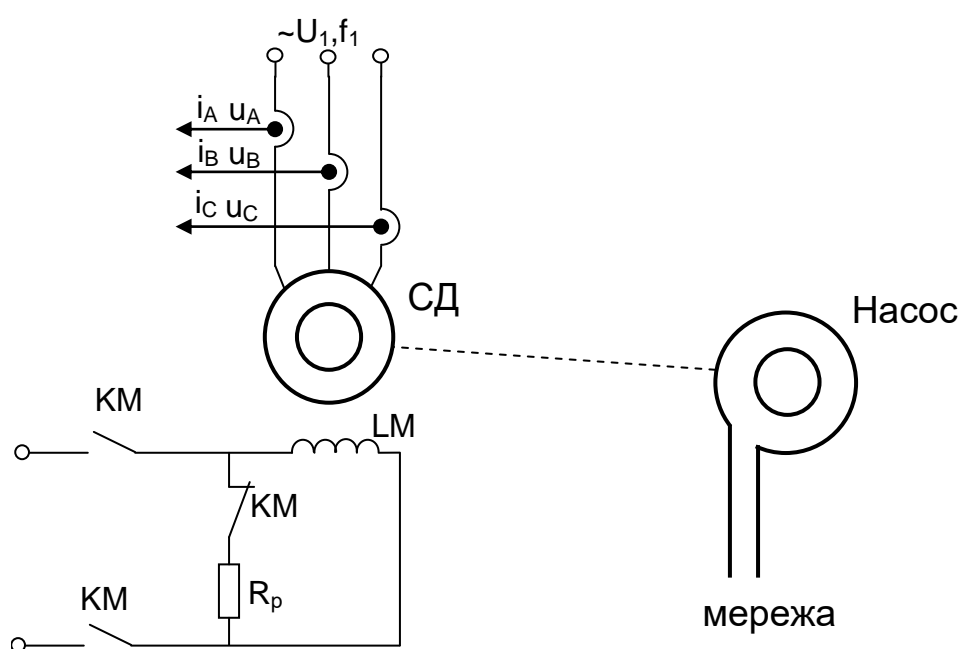


Рис. 1.2 Нерегульований синхронний електропривод насосних установок

частоти [4,28]. Використання принципів векторного керування у цьому випадку дозволяє додатково покращувати коефіцієнт потужності двигуна [33-36]. Для високопотужних систем, які працюють у протяжних режимах роботи (S1) найбільшого використання набули саме нерегульовані синхронні електроприводи.

Основними підприємствами, які використовують НУ на Україні є підприємства житлово-комунального господарства, гірничо-металургійного комплексу, нафто-газового комплексу, агропромислового комплексу та ін.

На насосні установки потужністю до 150 кВт у більшості випадків як приводний механізм встановлюють АД до більш потужних СД, тобто на підприємствах України близько 80% НУ монтують з АД, а лише 20% з СД. Проте сумарна потужність НУ з СД в 2 рази більше ніж в НУ з АД і так як близько 70% цих установок експлуатуються з перевищенням установленого строку служби, а їх ремонт потребує колосальних капіталовкладень. Тому важливим питанням є розробка нових моделей та методик для діагностування ЕП НУ з СД

1.2 Аналіз методів діагностування енергетичного та технічного стану синхронного електроприводу насосних установок

Енергетичний та технічний стан ЕП НУ з СД залежить від різноманітних чинників, про що вказує досвід експлуатації промислових установок [31]. Найбільший вплив на енергетичний та технічний стан ЕП НУ спричиняють: якість виготовлення деталей установок, активних та конструкційних матеріалів двигунів; їх технічне обслуговування і ремонти; якість напруги живлення; режим навантаження; умови експлуатації; відповідність застосування виконанню.

Якість електричної енергії регламентується такими стандартами: Міждержавний стандарт на електроенергію ДСТУ EN 50160:2014 “Норми якості електричної енергії в системах енергопостачання загального значення”; 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 [127, 128].

Зростання опору обмоток струмам вищих гармонік призводить несинусоїдальність напруги. Це призводить до підвищення нагрівання та викликає в двигуні суттєві втрати активної потужності.

До зниження енергетичних показників СД та працездатності устаткування призводить робота НУ в умовах постачання неякісної електроенергії. Так, при відхиленнях ПЯЕ, які перевищують нормовані стандартами значення, нормальна робота СД або може бути забезпечена лише у випадку значного зменшення навантаження, або взагалі неможлива. Зниження енергетичного та технічного стану НУ має місце навіть у випадку, коли ПЯЕ змінюються у межах припустимих стандартами значень.

Пропонується два варіанти вирішення проблеми, а саме – використання сучасних методів регулювання якості електроенергії шляхом використання новітніх силових електронних компонентів або робота зі зниженим ККД й потребою частіших ремонтів та заміни устаткування [18].

За умови роботи в номінальному режимі НУ з СД має задовільні значення ККД. Через недосконалу експлуатацію коефіцієнт завантаження багатьох установок не перевищує 50% [11,35], наприклад ЕП насосів комунального водопостачання завантажено на 30-40% від їх встановленої потужності [11]. Для порівняння в країнах Західної Європи середнє завантаження ЕП перевищує 60%.

До значних втрат та зниження ККД призводить робота НУ з СД в недовантаженому режимі. Також встановлюється неефективний баланс складових потужності (з підвищеним рівнем реактивної), що підвищує втрати в живильних мережах. Фактичні питомі реактивні навантаження на окремих підприємствах сягають 1,5–1,8 квар/кВт, тобто питомі реактивні навантаження майже вдвічі вищі від номінальних значень [34]. Потужність холостого ходу СД може сягати 60% його реактивної потужності при 100% завантаженні [16].

Інвестиції у підвищення ККД швидко окуплюються за рахунок зниження експлуатаційних витрат через зменшення споживання електроенергії, тому підвищення ККД СД на 1-3% є актуальним [39]. Приблизно 10% вартості самого

двигуна коштує вартість реалізації можливостей енергозбереження стосовно підвищення ККД на 1% [36].

Енергетичний і технічний стан НУ з СД значною мірою залежить від умов експлуатації. До них належать вібрації, вологість, температура довкілля, тиск, удари тощо. Наслідком цього у двигунах можуть бути руйнування окремих елементів і спаїв, замикання проводів з ушкодженою ізоляцією, порушення контактів, механічний резонанс, який часто призводить до руйнування конструкції тощо.

Насамперед технічний стан СД можна визначити за рахунок дефектів ізоляції [59, 109]. До механічної системи входить міжвиткова ізоляція, яка складається з різнорідних елементів: міді провідників і полімерних ізоляційних матеріалів. До утворення дефектів призводять деформації, спричинені змінами температури, впливом електродинамічних зусиль та вібрації обмотки.

Поширеним явищем є підвищена зношуваність ізоляції, яка зумовлена порушенням режиму експлуатації СД. Основні чинники, які впливають на зношуваність, – це дія хімічно активних середовищ, теплові дефекти ізоляції, вологість та пил. В залежності від габариту СД мінімальна тривалість неробочого періоду, під час якого починається зволоження, може становити від 3 до 6 год., [34]. Енергетичні й технічні характеристики СД, що випускаються, відрізняються в негативну сторону від паспортних даних. Це пояснюється тим, що використовуються матеріали низької якості, проводиться лише вибірковий контроль якості двигунів, та існують значні допуски на їх технічні параметри.

Якість обслуговування та ремонту є важливим чинником впливу на енергетичний та технічний стан синхронного електроприводу. Проведення ремонтів після відмови двигуна, вимушена заміна його деталей та елементів є економічно невиправданими через значні витрати [41]. Якість ремонту двигунів за технологічними показниками не відповідає рівню їх виробництва [42].

У відремонтованих СД характеристики відрізняються від нових через те, що характеристики конструкційних матеріалів після експлуатації та ремонту змінюються. Після ремонту сталь насичується, та зростає струм намагнічування,

який стає несинусоїдальним, оскільки містить крім першої також непарні гармоніки 5,7,11... порядків [43]. Під час ремонтів у СД до різкого підвищення густини магнітного потоку у сталі статора призводить зменшення кількості витків на 5%, унаслідок чого струм холостого ходу збільшується до 20%, а ККД знижується [31].

Виявити можливості зростання рівня якості функціонування ЕП НУ з СД та знизити витрати на експлуатацію можна на основі аналізування складників витрат та вартості життєвого циклу. Дослідження кожного з складників шляхом реалізації відповідних рішень дозволить врахувати їх вплив на подальше зменшення витрат [49]. Сума всіх витрат на придбання, монтування, обслуговування, експлуатацію, електроенергію, втрати від простоїв, утилізацію і формують вартість життєвого циклу. Основні витрати складаються з витрат на придбання, обслуговування, спожиту електроенергію [39,41]. Основну увагу слід приділити визначенню ресурсу устаткування(через значну вартість утилізації).

Одним із інструментів моніторингу та діагностування установок є аналізування вартості життєвого циклу, що дозволяє знайти найефективніше рішення, підвищити енергетичні показники, або технічний стан НУ з СД, та зменшити величину витрат [53,56].

В літературних джерелах, присвячених діагностуванню, розглядаються питання пошуку несправностей, тобто діагностування технічного стану. Проблеми енергетичного стану НУ з СД практично не висвітлюються.

Аналіз літературних джерел дозволив розробити класифікаційну схему методів діагностування НУ з СД які використовуються в теперішній час (рис 1.3). Методи діагностування поділено на 4 групи: методи рекомендовані

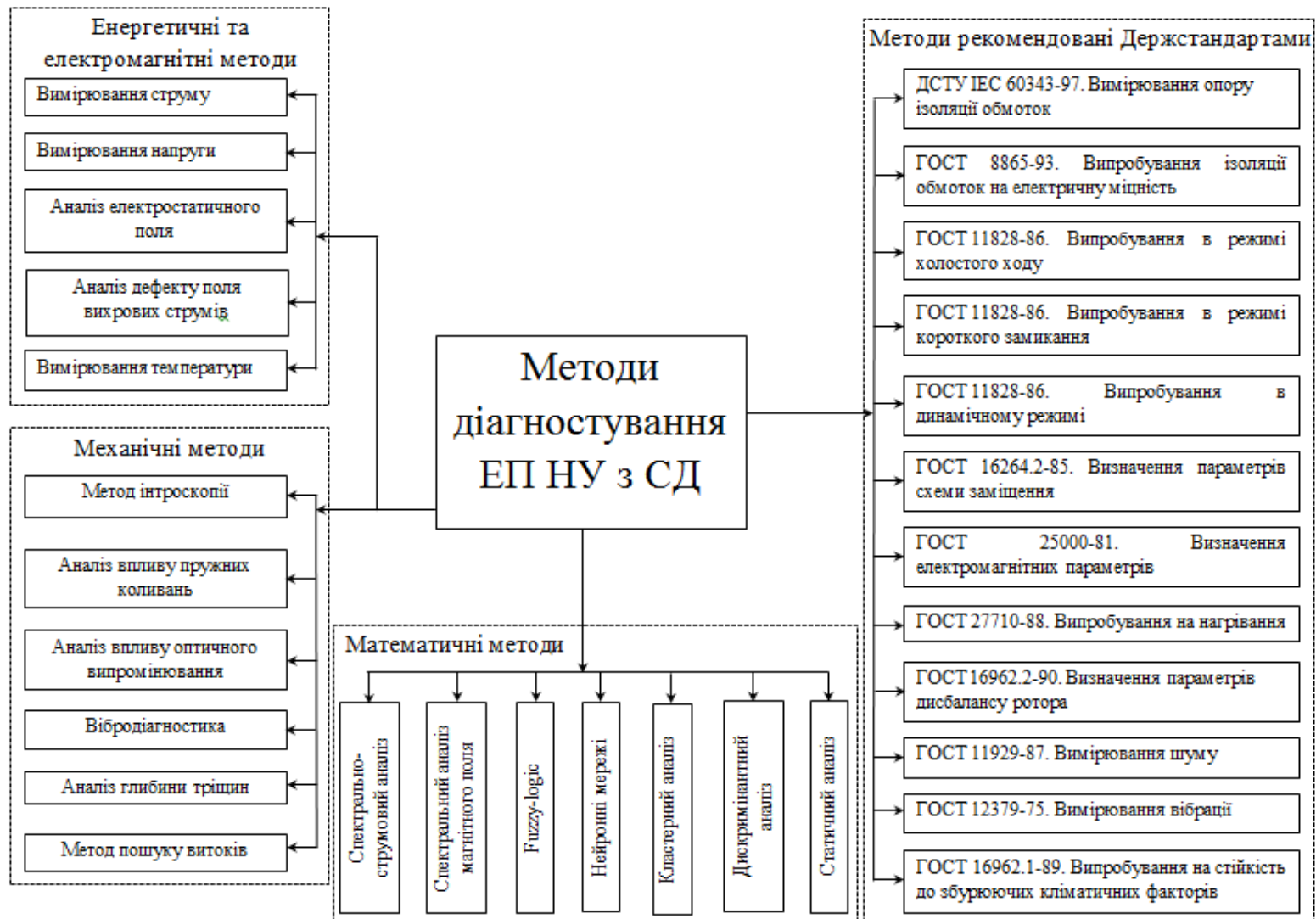


Рис. 1.3 Класифікаційна схема методів діагностування ЕП НУ з СД

Держстандартами (регламентовані); енергетичні та електромагнітні методи; механічні методи; математичні методи.[31,34,42].

Докладну інформацію про стан СД дають методи рекомендовані Держстандартами (тестове діагностування), але вони вимагають технологічної зупинки механізму [63]. В ГОСТ 25941-83, ГОСТ 11828-86, ГОСТ 8865-93, ГОСТ 27710-88, ГОСТ 16264.2-85, ГОСТ 11929-87, ГОСТ 12379-75, ГОСТ 25000-81, ГОСТ 16962.1-89, ГОСТ 16962.2-90, ДСТУ 3886-99, ДСТУ ІЕС 60343-97, ПУЕ, та публікаціях [33, 61-67, 74] висвітлено методи й вимоги до тестового діагностування та випробувань.

Тестові методи вимагають безпосереднього з'єднання СД з навантажувальними пристроями, його демонтажу, або наявності додаткових вимірювальних обмоток [89]. Оскільки такі методи вимагають спеціальної підготовки двигуна до експерименту, процес вимірювання ускладнюється та потребує тривалого часу для підготовки експерименту[86].

На визначення окремого параметру СД або їх набору орієнтовані методики і комплекси тестового діагностування [21, 22, 75, 77]. Більша частина засобів діагностування, які випускаються у світі (Electric Power Research Institute; Schleich GmbH; Adwel International ltd; VJM Corporation;), дають змогу розв'язувати окремі задачі пов'язані з випробуванням та діагностуванням обмоток СД, при цьому його енергетичний стан не визначається [63].

Функціональне діагностування ЕМС являє собою систему збирання накопичення, оброблення та аналізування інформації, необхідної для оцінки поточного стану і прогнозування тенденцій його розвитку. Для запобігання зменшення ресурсу двигуна та можливості виконання ЕМС її робочих функцій під час діагностування використовуються неруйнівні методи контролю. Результати вимірювань заносяться в базу даних, на основі якої планується виведення обладнання в ремонт [20].

Енергетичні методи діагностування також є перспективними. Під час цього діагностування використовуються миттєві значення струмів, напруг та температура середовища навколо СД [50].

Спектральні методи діагностування засновані на виділенні з сигналу його частотних складників та подальшому їх аналізуванні. Найчастіше використовується метод вібродіагностики [55-57]. Визначити технічний стан НУ з СД та прогнозувати виникнення ушкоджень та аварій дозволяє комплекс параметрів вібрації [54]. Метод не дозволяє контролювати енергетичний і тепловий стан СД та потребує зупинки устаткування для забезпечення доступу до елементів НУ з СД, що є основними недоліками цього методу.

Діагностування за спектральним аналізом магнітного поля потребує встановлення датчиків у повітряний зазор та складних вимірювань сигналу, що є істотним недоліком цього методу [57-58].

Широке застосування наведених методів ускладнюється тим, що нестандартизовано діагностичні параметри, які характеризують вібраційні, електромагнітні та акустичні процеси, та недостатньо досліджено окремі типи несправності СД [60].

З високою достовірністю визначити технічний стан НУ з СД (особливо механічні ушкодження) дозволяє метод спектрально-струмового аналізу за допомогою швидкого перетворення Фур'є та модулів векторів Парка. Дослідження СД в різних режимах стосовно гармонічного складу струмів показують, що сукупність гармонічних складових струму з певними значеннями параметрів гармонік індивідуальна, а отже її можна використати для визначення технічного стану НУ [58].

Для визначення технічного стану насосної установки з СД застосовуються методи розпізнавання станів, такі як fuzzy-logic, нейронні мережі, а також системи розпізнавання форм, експертні, що використовують елементи штучного інтелекту. Автономно розв'язувати завдання класифікації змінних об'єкту та їх форм дозволяють штучні нейронні мережі. Параметричні моделі, які можуть

відтворювати будь-який справний або несправний стан СД та апроксимувати ідентифікацію на інші приклади також розроблюються за допомогою штучних нейронних мереж [71, 79].

Методи, рекомендовані Держстандартами, – система планово-попереджувальних ремонтів і випробувань. На підставі аналізу показань контрольньо-вимірювальних приладів під час періодичних регламентних робіт і за результатами випробувань після ремонтів СД виконується поточне обслуговування устаткування.

Основні властивості цих методів: без фактичної необхідності виконуються щонайменше 50% випробувань, обслуговувань і ремонтів; значні терміни між випробуваннями й ремонтами не дозволяють своєчасно виявляти ушкодження; через низьку якість і надійність робіт з обслуговування частота виходу НУ з СД з ладу у більшості випадків також не зменшується; заміна вузлів і деталей з більшим залишковим ресурсом не обґрунтована фактичним станом устаткування.

Під час обслуговування за регламентом основними контрольованими параметрами є температура обмоток і підшипникового вузла, опір ізоляції та зазор у підшипниках. Енергетичні показники НУ з СД при цьому не визначаються [34]. Таке обслуговування не дозволяє своєчасно виявляти дефекти, а отже запобігти ушкодженню електрообладнання до настання аварійної ситуації.

Енергетичні та електромагнітні методи діагностування НУ з СД дозволяють визначати енергетичні показники лише приводного механізму (двигуна). Їх можна проводити не зупиняючи технологічний процес. За енергетичними методами можливо керувати рівнем енергетичним станом електроприводу НУ, та проводити прогнозування несправностей в двигуні.

Механічні методи дозволяють визначити технічні несправності як в СД так і в НУ. Недоліками цих методів в тому що кожен із них показує лише один або два параметри від діагностованої установки, а також те, що на їх використання

потрібно розбирати установку (тобто зупиняти технологічний процес, витратити додатковий час та значні капіталовкладення).

Тому є ще одна група методів – математичні. Ці методи використовуються для оброблення та перетворення отриманої інформації і прогнозування роботи досліджуваної установки. А також для моделювання поведінки того чи іншого процесу в апараті. На ці методи затрачується менше часу та вони економічно доцільні.

Виходячи з вище сказаного, запропоновано поєднати енергетичні та математичні методи для того щоб можна було проводити обслуговування й ремонт, які будуть виконуватись залежно від реального поточного стану устаткування, контрольованого в процесі експлуатації без втручання в конструкції НУ з СД.

Основні переваги цих методів: нормальна робота механізму через необґрунтоване втручання не порушується; підприємство має об'єктивні дані про реальний поточний стан устаткування; в робочому режимі відбувається діагностика стану СД; рівень раптових поломок устаткування й зупинок виробництва знижується; заздалегідь визначаються необхідні терміни й обсяги ремонтних робіт; витрати на технічне обслуговування знижуються у порівнянні з обслуговуванням «за регламентом»; ресурс роботи СД зростає (за експертними оцінками – до 2 разів), а обсяги робіт електротехнічної служби підприємства, зменшуються на 30% [29].

1.3 Аналіз засобів діагностування енергетичного та технічного стану насосних установок з синхронними двигунами

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[22]. 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 НУ з СД показує, що на даний час контроль технічного стану в більшості випадків відбувається під час проведення планових регламентних робіт і ремонтів за допомогою тестового діагностування[11, 22]. Це не дозволяє виявити дефекти, що зароджуються, і запобігти ушкодженню ЕП аж до створення аварійної ситуації.

Стенд універсальний для випробування високовольтних електродвигунів [31]. 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. 1.4) [37].



Рис.1.4 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. Він 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 $\cos\varphi$, $\text{ККД} = f(P_2)$.

Серія комп'ютеризованих стендів для діагностики електродвигунів ELMOTE XX[51]. 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.

Діагностичний стенд електродвигунів для лабораторій і виробництва[47]. Стенд розроблено у Німеччині, в лабораторії доктора Штайгера Мохило (рис. 1.6). До складу стенда входять: ящик з піднімальним пристроєм; кріпильна пластина, гальмо двигуна; датчик обертального моменту/швидкості; механізм утримування зразка; універсальне джерело живлення; коробка для

контрольного зразка й датчика температури; кліматична камера; апаратура активації для двигунів і вимірювання сигналів стану; апаратура для обміну даних з комп'ютером; аналізатор потужності; ПК із принтером та мережевим доступом; необхідне програмне забезпечення.

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



Рис. 1.6 – Діагностичний стенд Штайгера Мохило електродвигунів для лабораторій і виробництва

Стенд для випробування синхронних електродвигунів розроблений компанією «AviaOk International» [67]. Устаткування: LabVIEW; NI PXI-1042; NI PXI-8175; NI PXI-4070; NI PXI-6527; NI PXI-8422/2; мегомметр М4122В.

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 двигунів зображено на рис. 1.7.

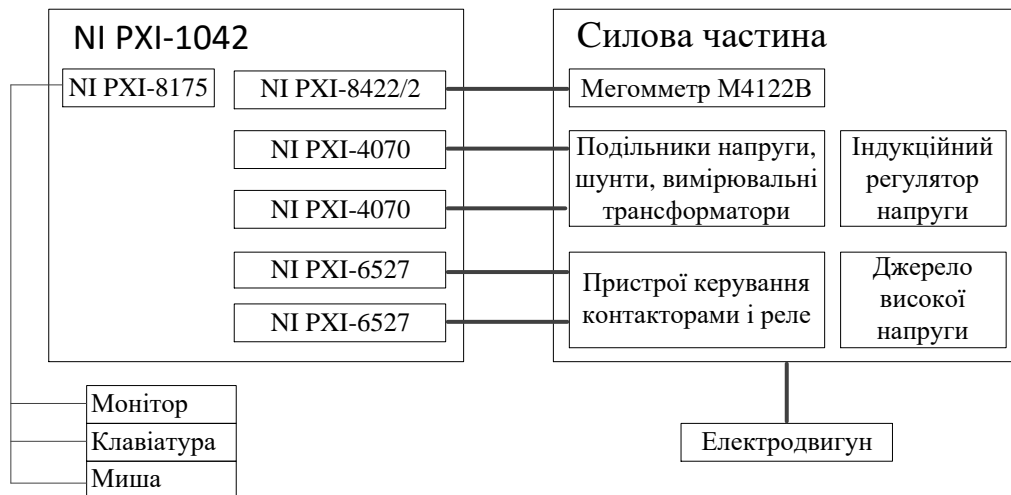


Рис. 1.7 – Стенд для випробування СД компанії «AviaOk International»

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 ІВЗ фірми «ТЕХПРИБОРСЕРВІС» Санкт-Петербург (Росія) застосовуються для виявлення обривів, виткових замикань обмоток та опору корпусної ізоляції електричних машин всіх типів змінного і постійного струму. Прилади забезпечують випробування: виткової і корпусної ізоляції, визначення наявності й місця замикання, обриву проводу обмотки, перевірку правильності міжсекційних з'єднань; випробування виткової і корпусної ізоляції обмоток роторів турбогенераторів (без бандажів) і визначення місця ушкодження;

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

котушок без осердя електричних апаратів і машин;

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

виткової ізоляції статорів електричних машин із всипною обмоткою;

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

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

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

Принцип дії приладів – імпульсний. Імпульсна напруга, що створюється приладом, залежно від об'єкта випробувань або індукується в обмотці (за

допомогою електромагнітних скоб або електромагнітів) – індуктивний метод, або безпосередньо подається на виводи обмотки, що випробовується, за допомогою щупів або кабелю – кондуктивний метод.

Програмно-апаратний комплекс для діагностування різних видів двигунів призначено для післяремонтних випробувань, дослідження, аналізування та експериментальної оцінки технічного стану електродвигунів і видачі рекомендацій щодо умов експлуатації діагностованої машини [21]. Комплекс визначає номінальну 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. 1.8.

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 двигуна. 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

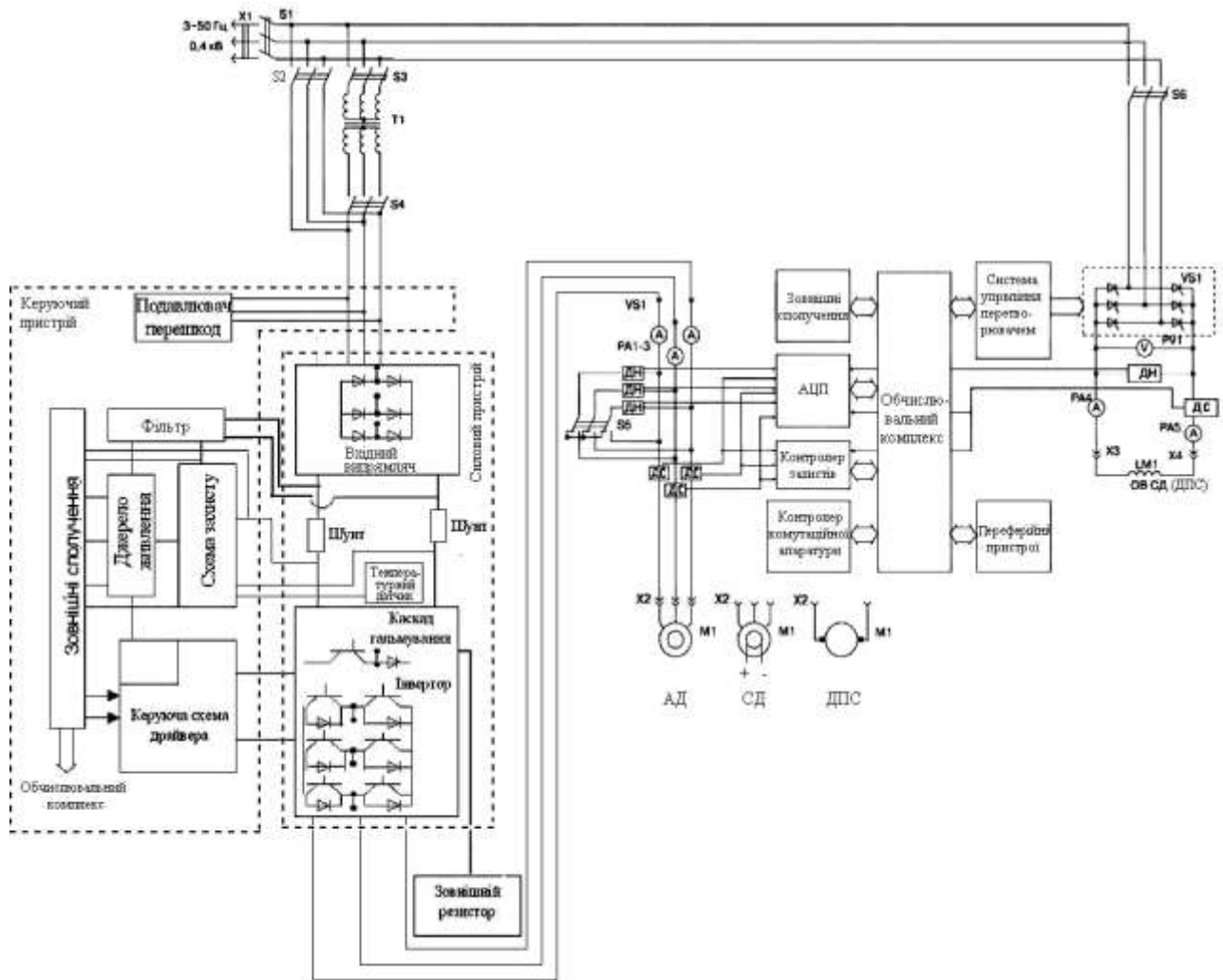


Рис. 1.8 – Функціональна схема програмно-апаратного комплексу діагностування електричних машин

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 двигуна 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 [74]. 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») [80]. 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 [81]. «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[85]. 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.

Реле REM620 IEC для захисту і управління синхронним двигуном. REM620 це спеціалізоване реле управління двигуном для його захисту, контролювання параметрів, які вимірюються і контролю середніх і великих синхронних двигунів, що вимагають диференціальної захисту в промисловості (рис. 1.9). Крім того, даним реле проводиться перевірка фазного струму і напруги на основі датчиків які під'єднані до нього.



Рис. 1.9 Реле REM620 IEC

Реле управління двигуном зазвичай використовується у середніх і великих автоматичного вимикачах або контакторах управлінням електроприводів АД та СД. Приводи можуть працювати як безперервно так і переривчасто, зі змінним навантаженням так із постійним, таким як у насосах та конвеєрах, дробарках і чоперах, змішувачах та агітаторах, вентиляторах і аераторах.

REM620 повністю підтримує стандарти IEC 61850 і IEC 61850-9-2 LE для зв'язку і взаємодії пристроїв автоматизації підстанцій, в тому числі швидкими повідомленнями через GPS, надаючи істотні переваги з точки зору розширеної сумісності з іншими пристроями. REM620 також підтримує обидва протоколи паралельного резервування і протокол високої доступності. Також може бути використаний з різними адаптерами які підтримують протокол SPA-ZC 302, Profibus DVP1.

Контролери Motor management System. Системи захисту двигунів серії ММ забезпечують всебічний захист і рішення для управління трифазних двигунів середніх і великих розмірів (рис. 1.10). М60 забезпечує чудовий захист, і контроль, які включають теплову модель з RTD і струм дисбалансу, диференціал статора, низьку потужність, прямий та зовнішній модуль RRTD, пуск двигуна від зниженої напруги і багато іншого.



Рис. 1.10 Контролери Motor management System

Контроллер для управления двигуном та керування пристроїв SIMOCODE Pro компанії Siemens. Основні його характеристики:

- в одній системі об'єднано функції захисту, моніторингу, безпеки і контролю між пускачем і системою автоматизації;

- всі функції зберігаються у базі даних незалежно від контролера;

- виконуються будь які масштабування, гнучкі рішення для будь-яких змін системи;

- підключення до систем управління технологічними процесами на виробництві з використанням найбільш важливих комунікаційних протоколів які використовуються у світі: PROFIBUS, PROFINET, Modbus RTU і OPC UA;

- проста конфігурація і швидке введення в експлуатацію.

Вищевказані засоби дозволяють виконувати перевірку двигунів і зв'язані з ними установки на предмет пошуку відмови, або шукати лише певні параметри установки. Також деякі з них виконують захисні функції, але ні один з комплексів не робить комплексного діагностування електротехнічного обладнання не відриваючи установку від виробництва. Сутність запропонованої автором концепції розвитку методів діагностування полягає в контролюванні енергетичного та технічного стану ЕП НУ з СД засобами діагностування та обслуговуванні за фактичним станом. Мається на увазі постійний або ж періодичний контроль енергетичних показників установки без відриву від виробництва та пошук причини і місця відмови на стадії зародження використовуючи поєднання енергетичних та математичних методів діагностування, тобто розробити комплекс заходів які дозволяють визначати поточний стан обладнання з метою його найбільш раціонального і безпечного його використання без відриву від виробництва[41]. Ці заходи здійснюються за допомогою візуального спостереження, діагностування та моніторингу.

1.4 Постановка задачі дослідження

Проведений вище аналіз питання по дослідженню і діагностуванню електромеханічних систем насосних комплексів показав, що їх використання не повній мірі дозволяє своєчасно визначити залишковий ресурс роботи

електроприводів. Останнє як правило приводить до експлуатації частково несправних елементів силового контура, в тому числі і синхронних електроприводів потужних насосних установок, що приводить до різкого зниження якісних енергетичних і експлуатаційних показників. Отже актуальною є задача підвищення рівня якості функціонування електроприводу насосних установок шляхом застосування засобів діагностування й оцінювання їх енергетичного і технічного стану.

Для її реалізації потрібно вирішити ряд наступних питань:

1. На основі аналізу існуючих методів діагностування синхронних електроприводів насосних установок визначити необхідну їх сукупність, яка дозволить проводити на високому рівні діагностування енергетичного і технічного стану електромеханічних систем з синхронними електроприводами не порушуючи неперервний технологічний процес.

2. На основі досліджень факторів впливу на енергетичний та технічний стан електроприводів насосних установок з синхронними двигунами встановити, які з них спричиняють найбільший негативний вплив на електропривода і їх режими роботи. Відхилення яких параметрів спричиняє погіршення енергетичного й технічного стану та зменшує ресурс електротехнічного комплексу.

3. Використовуючи досвід провідних вчених у даній галузі розробити моделі, методики, алгоритми, апаратні рішення та програмне забезпечення, які дозволяють здійснювати діагностування енергетичного та технічного стану синхронного електроприводу насосних установок та виконувати прогнозування залишкового ресурсу, а також виявляти порушення технологічного режиму.

4. На основі лабораторних і промислових експериментів оцінити ступінь достовірності отриманих в роботі результатів теоретичних досліджень.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

2.1. Формування сукупності факторів впливу на енергетичний та технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами

Якість функціонування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами залежить від кількох різноманітних чинників, про що вказує досвід експлуатації промислових установок [31]. У процесі аналізу показників впливу серед всієї їх сукупності, які формулюються та надаються для розгляду та аналізу, виникає потреба вибрати найбільш впливові з точки зору досягнення кінцевого якісного результату - впливу та можливості контролю та аналізу ефективності енерговикористання. Вирішення поставленої задачі та досягнення потрібних результатів - виявлення найбільш важливих для аналізування показників впливу, визначення якісної складової по результатам впливу на енергетичний та технічний стан насосних установок з СД дозволяє зробити комплексне використання емпіричних підходів аналізу.

Математичне формулювання задачі

Нехай досліджувана система об'єктів (НУ з СД) складається зі скінченної множини A_0 показників A_n , $A_0 = \{ A_n \mid n=1, N \}$. Кожний з показників $A_n \in A_0$ всієї скінченної множини A_0 , розподіляється до групи E_0 найвпливовіших підгруп E_k , $E_k, E_0 = \{ E_k \mid k=1, K \}$. Необхідно сформулювати кількість найвпливовіших підгруп E_k показників A_n , $A_0 = \{ A_n \mid n=1, N \}$, $E_k \in E_0$ піддається аналізу з метою вирішення поставленого завдання S . Де під завданням розуміється дослідження показників, що впливають на енергетичний та технічний стан ЕП НУ з СД та оптимальний їх розподіл та групування, з метою визначення показників які найбільшим чином відображають вплив на насосні установки з синхронними двигунами на виробництві.

Точність і адекватність оцінювання факторів впливу на насосні установки з синхронними двигунами на виробництві залежить від повноти врахування усіх

важливих показників, які на цю ефективність мають вплив та відображають повну картину стосовно діагностування під час роботи устаткування на виробництві. Тому визначення достатньо повного складу вихідних показників є принципово важливим і відповідальним етапом для подальшого діагностування енергетичного і технічного стану НУ з СД.

Згідно ДСТУ EN 50006:2016 для аналізування енергоспоживання електротехнічних комплексів рекомендовано використовувати діаграми Ісікава та Парето та задається об'єм групи експертів від 15 до 25 чоловік (спеціалістів енергетичного відділу підприємств та науковців в даній галузі). Під час аналізу показників були задіяні експерти, які компетентні у цій сфері, а саме співробітники, енергетики, механіки, заступники директора з технічних питань на підприємствах України, які пройшли стажування та навчання у сфері енергозбереження. За результатами експертного оцінювання ними була визначена сукупність показників, які найбільшим чином відповідають поставленому завданню – визначення факторів впливу на енергетичний та технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами.

Використовуючи експертне оцінювання залучивши до нього 17-ох спеціалістів у сфері енергозбереження та енергоефективності було проведено аналіз показників за 12-ти бальною шкалою, з метою визначення “ваги” кожного у вирішенні завдання оцінювання поточного стану насосних установок з синхронними двигунами під час їх роботи на підприємстві. Показникам було приписано номери (ранги), що характеризують їх роль під час оцінювання поточного енергетичного та технічного стану електротехнічного комплексу і (більш важливим показникам приписуються перші номери). З метою визначення узгодженості оцінок експертів щодо важливості кожного з показників для задачі оцінювання поточного енергетичного та технічного стану, проведено аналіз оцінок з використанням коефіцієнта конкордації, запропонованого Кендаллом.

$$W = \frac{12 \cdot D}{m^2(k^3 - k)},$$

де $D = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{1}{2} \cdot m(k + 1) \right\}^2$ сума квадратів різниць (відхилень);

m - кількість експертів;

n - кількість показників.

Після визначення коефіцієнта конкордації проведено оцінення його значимості використовуючи критерій χ^2 . Враховуючи, що деякі експерти давали однакові оцінки показникам, то розрахунок здійснюємо у вигляді:

$$W = \frac{12 \cdot D}{m^2(k^3 - k) - m \cdot \sum_{i=1}^e T_i} \quad (2.1)$$

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{v=1}^n (t_v^3 - t_v) \quad (2.2)$$

Якщо $\chi_{\text{розр.}}^2 = m(k - 1)W > \chi_{\text{кр.}}^2$, то вважаємо, що думки експертів узгоджені за умов вибраного рівня значущості.

Критичне значення $\chi_{\text{кр.}}^2$ для одновідсоткового рівня значущості та ступеня свободи, що дорівнює 11, становить $\chi_{\text{кр.}}^2 = 25,8$. Оскільки $\chi_{\text{розр.}}^2 > \chi_{\text{кр.}}^2$ $189,25 > 25,8$, то було прийнято гіпотезу щодо наявності узгодженості думок спеціалістів.

Візуалізація факторів впливу на енергетичний та технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами здійснюється за допомогою діаграми Ісікави[59]. Були сформовані 4 групи: якість електроенергії, умови експлуатації, якість виготовлення, якість обслуговування, та визначені наступні 12 показників:

Y_1 – вплив відхилення напруги живлення насосних установок з синхронними двигунами;

Y_2 – відхилення ККД та $\cos \varphi$ насосних установок з синхронними двигунами від паспортних значень;

Y_3 – вплив вологості середовища навколо насосних установок з синхронними двигунами;

Y_4 – вплив вібрації насосних установок з синхронними двигунами;

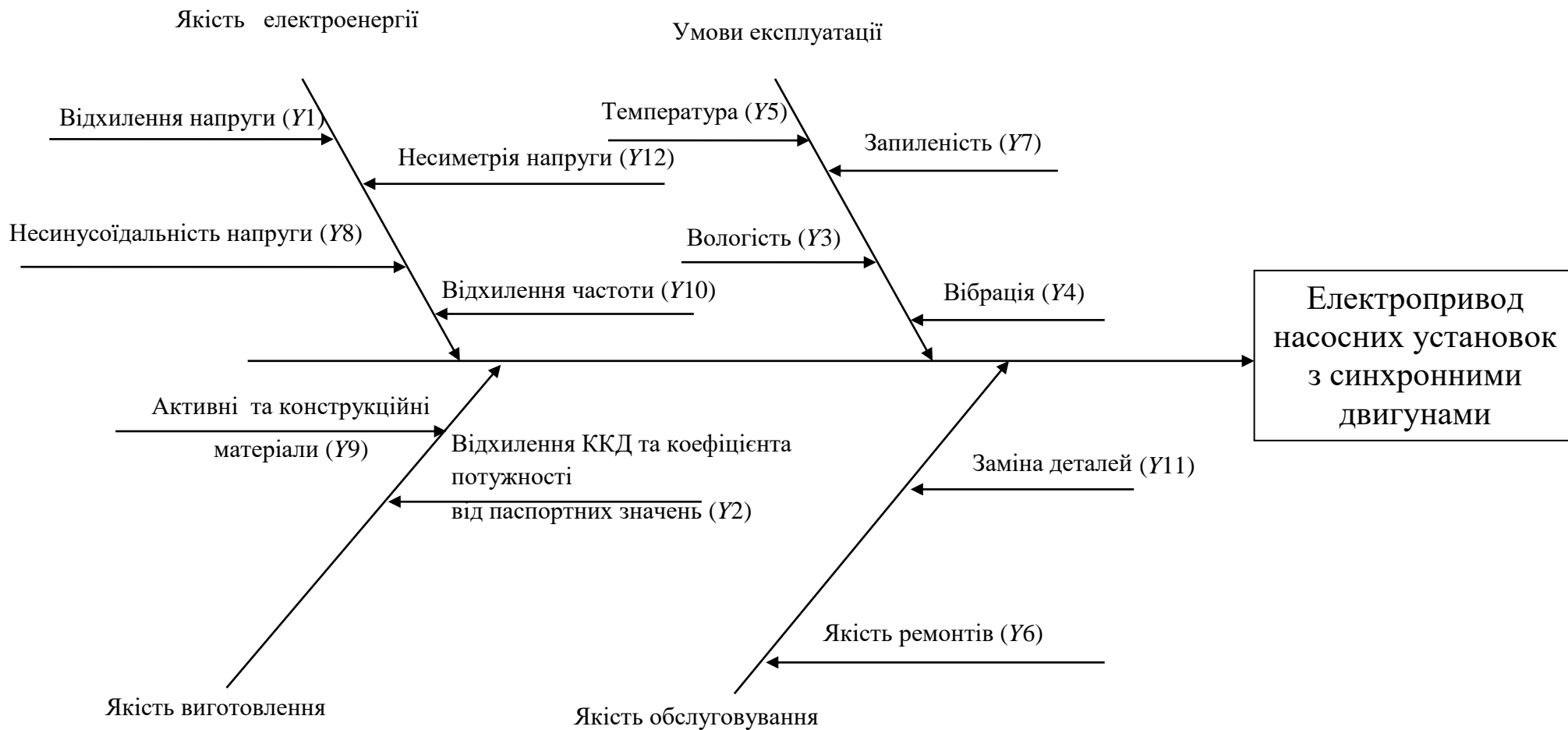


Рис. 2.1 Діаграма Ісікави факторів впливу на енергетичний та технічний стан НУ з СД

Y_5 – вплив температури експлуатації насосних установок з синхронними двигунами;

Y_6 – якість ремонтів насосних установок з синхронними двигунами;

Y_7 – вплив запиленості середовища навколо насосних установок з синхронними двигунами;

Y_8 – вплив несинусоїдальності напруги живлення насосних установок з синхронними двигунами;

Y_9 – якість конструкційних та активних матеріалів насосних установок з синхронними двигунами;

Y_{10} – вплив відхилення частоти живлення насосних установок з синхронними двигунами;

Y_{11} – якість заміненних деталей та змінених параметрів насосних установок з синхронними двигунами;

Y_{12} – вплив несиметрії напруги живлення насосних установок з синхронними двигунами.

Графічне представлення ранжування 17-ох експертів за діаграмою Парето для визначення "ваги" кожного показника щодо визначення факторів впливу на енергетичний та технічний стан синхронного електроприводу насосних установок на виробництві наведено на рис 2.2.

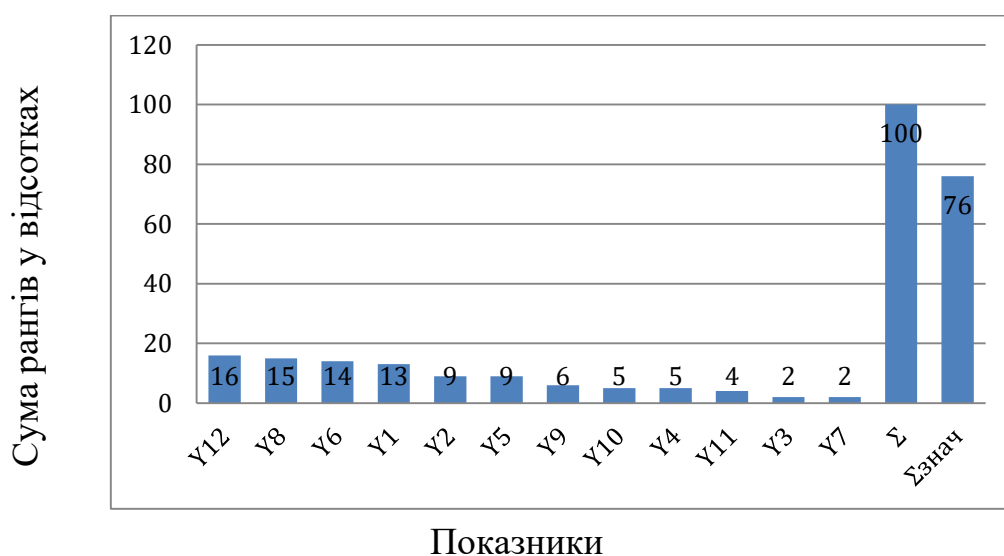


Рис. 2.2. Діаграма Парето показників впливу на енергетичний та технічний стан насосних установок з синхронними двигунами

Результати аналізу показали, що у сукупності відібраних показників найбільший вплив на енергетичний та технічний стан НУ спричиняють: відхилення напруги живлення – Y_1 ; режим навантаження – Y_2 ; умови експлуатації – Y_5 ; якість технічного обслуговування і ремонтів – Y_6 ; несинусоїдальність напруги живлення – Y_8 ; якість активних та конструкційних матеріалів двигунів – Y_9 ; несиметрія напруги живлення – Y_6 .

Якість електричної енергії регламентується такими стандартами: Міждержавний стандарт на електроенергію ДСТУ EN 50160:2014; Європейський стандарт EN50006; МЭК 100-2-1, МЭК 1000-2-2 в частині рівнів електромагнітної сумісності в системах електропостачання та методів вимірювання електромагнітних завад [127, 128].

Зростання опору обмоток струмам вищих гармонік призводить до несинусоїдальності напруги. Це призводить до підвищення нагрівання та викликає в двигуні суттєві втрати активної потужності.

До зниження якості функціонування та працездатності устаткування призводить робота насосних установок в умовах постачання неякісної електроенергії. Так, при відхиленнях ПЯЕ, які перевищують нормовані стандартами значення, нормальна робота синхронного двигуна або може бути забезпечена лише у випадку значного зменшення навантаження, або взагалі неможлива. Зниження рівня якості функціонування СЕП НУ має місце навіть у випадку, коли ПЯЕ змінюються у межах допустимих стандартами значень.

Пропонується два напрямки вирішення проблеми, а саме – використання сучасних методів регулювання якості електроенергії шляхом використання новітніх силових електронних компонентів або робота зі зниженим ККД й потребою частіших ремонтів та заміни устаткування [18].

За умови роботи в номінальному режимі насосних установок з СД має задовільні значення ККД. Через недосконалу експлуатацію коефіцієнт завантаження багатьох установок не перевищує 50% [11,35], наприклад ЕП насосів комунального водопостачання завантажено на 30-40% від їх

встановленої потужності [11]. Для порівняння в країнах Західної Європи середнє завантаження ЕП перевищує 60%.

До значних втрат та зниження ККД призводить робота НУ з СД в недовантаженому режимі. Також встановлюється неефективний баланс складових потужності (з підвищеним рівнем реактивної), що підвищує втрати в живильних мережах. Фактичні питомі реактивні навантаження на окремих підприємствах сягають 1,5–1,8 квар/кВт, тобто питомі реактивні навантаження майже вдвічі вищі від номінальних значень [34]. Потужність холостого ходу СД може сягати 60% його реактивної потужності при 100% завантаженні [16].

Інвестиції у підвищення ККД швидко окупаються за рахунок зниження експлуатаційних витрат через зменшення споживання електроенергії, тому підвищення ККД СД на 1-3% є актуальним [39]. Приблизно 10% вартості самого двигуна коштує вартість реалізації можливостей енергозбереження стосовно підвищення ККД на 1% [36].

Від умов експлуатації залежить енергетичний і технічний стан СД. До них належать вібрації, вологість, температура довкілля, тиск, удари тощо. Наслідком цього у двигунах можуть відбуватись руйнування окремих елементів і спаїв, замикання проводів з ушкодженою ізоляцією, порушення контактів, механічний резонанс, який часто призводить до руйнування конструкції тощо.

Насамперед технічний стан СД можна визначити за рахунок дефектів ізоляції [59, 109]. До механічної системи входить міжвиткова ізоляція, яка складається з різнорідних елементів: міді провідників і полімерних ізоляційних матеріалів. До утворення дефектів призводять деформації, спричинені змінами температури, впливом електродинамічних зусиль та вібрації обмотки.

Поширеним явищем є підвищена зношуваність ізоляції, яка зумовлена порушенням режиму експлуатації СД. Основні чинники, які впливають на зношуваність, – це дія хімічно активних середовищ, теплові дефекти ізоляції, вологість та пил. В залежності від габариту СД мінімальна тривалість неробочого періоду, під час якого починається зволоження, може становити від

3 до 6 год., [34]. Енергетичні й технічні характеристики СД, що випускаються, відрізняються в негативну сторону від паспортних даних. Це пояснюється тим, що використовуються матеріали низької якості, проводиться лише вибірковий контроль якості двигунів та існують значні допуски на їх технічні параметри.

Якість обслуговування та ремонту є важливим чинником впливу на енергетичний та технічний стан СД. Проведення ремонтів після відмови двигуна, вимушена заміна його деталей та елементів є економічно невиправданими через значні витрати [41]. Якість ремонту двигунів за технологічними показниками не відповідає рівню їх виробництва [42].

У відремонтованих СД характеристики відрізняються від нових через те, що характеристики конструкційних матеріалів після експлуатації та ремонту змінюються. Після ремонту сталь насичується, та зростає струм намагнічування, який стає несинусоїдальним, оскільки містить крім першої також непарні гармоніки 5,7,11... порядків [43]. Під час ремонту СД до різкого підвищення густини магнітного потоку у сталі статора призводить зменшення кількості витків на 5%, унаслідок чого струм холостого ходу збільшується до 20%, а ККД знижується [31].

Виявити можливості зростання рівня НУ з СД та знизити витрати на експлуатацію можна на основі аналізування складників витрат, що впливають на вартість складників життєвого циклу. Дослідження кожного з складників шляхом реалізації відповідних рішень дозволить врахувати їх вплив на подальше зменшення витрат [49]. Сума всіх витрат на придбання, монтування, обслуговування, експлуатацію, електроенергію, втрати від простоїв, утилізацію формують вартість життєвого циклу. Основні витрати складаються з витрат на придбання, обслуговування, спожиту електроенергію [39,41]. Основну увагу слід приділити визначенню ресурсу устаткування(через значну вартість утилізації).

Одним з інструментів енергетичного менеджменту є аналізування вартості життєвого циклу, що дозволяє знайти найефективніше рішення, підвищити рівень якості функціонування ЕП НУ з СД та зменшити величину витрат [53,56].

2.2 Визначення ознак аварійних режимів синхронних двигунів

Для того щоб ідентифікувати енергетичний аварійний стан роботи двигунів потрібно сформулювати попередні ознаки струмуових пошкоджень в двигуні. В результаті аналізу наступних літературних джерел [81, 126, 135, 136, 141, 142, 154] було визначено ознаки аварійних режимів, які можна представити кортежем:

$$C = \langle C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7 \rangle$$

де C_1 – трифазні симетричні КЗ; C_2 – двофазні (міжфазні) КЗ в одній точці; C_3 – двофазні КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз; C_4 – двофазні КЗ на землю; C_5 – однофазні КЗ на землю; C_6 – однофазні виткові замикання; C_7 – обрив фази живильної мережі.

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

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

$$i_y = \sqrt{2} \left(1 + e^{-\frac{3.14 R_{\phi,к}}{X_{\phi,к}}} \right) I_K^{(3)}.$$

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

Двофазні (міжфазні) короткі замикання. Міжфазні КЗ в обмотках статора є основним видом ушкоджень у СД. Вони супроводжуються значними струмами, які значно перевищують номінальний струм двигуна. Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна [154]. Найпростішим випадком двофазного КЗ є металічне замикання двох фаз в одній точці, а більш складним - замикання двох фаз через перехідні опори в одній або різних точках мережі.

Оскільки $M_1 \equiv U_1^2$, а $M_2 \equiv U_2^2$, то найбільш важкий режим роботи двигуна спостерігається під час металевого КЗ, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють $0,5U_H$. При ковзанні $s=1$ обидва моменти дорівнюють $0,25M_{п.н.}$, внаслідок чого результуючий момент дорівнює нулю. Під час зростання швидкості момент M_1 збільшується, але результуючий момент двигуна залишається незначним, двигун може зупинитися й вийти з ладу через перегрівання.

Двофазне КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз є одним з найбільш імовірних видів міжфазних КЗ. Струми при такому ушкодженні визначаються методом симетричних складових [142].

Струм двофазного КЗ можна знайти за струмом трифазного

$$\frac{I_{\kappa}^{(2)}}{I_{\kappa}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Двофазні КЗ на землю. КЗ на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю відрізняються від звичайного двофазного тим, що ушкоджені фази, наприклад B і C , у місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує стосовно землі зсув $0,5E_A$, а напруга неушкодженої фази A зростає до $1,5E_A$ [126].

Подвійні замикання на землю можливі лише в мережах з ізолюваними нейтраллями або з нейтраллями, заземленими через дугогасильний реактор. Вони виникають на приєднаннях з ослабленою ізоляцією за перенапруг, які з'являються при однофазних замиканнях на землю. Правилами технічної експлуатації допускається працювати із заземленою фазою протягом двох годин. При цьому струм в обмотці статора буде приблизно такий само, як при двофазному КЗ [154]. Таким чином, зазначені параметри є надійним критерієм виявлення міжфазного КЗ.

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

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

Струм однофазних КЗ або замикань на корпус можна визначити за спрощеною формулою

$$I_{\text{к}}^{(1)} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \left(z_{\text{п}} + \frac{z_{\text{тр}}}{3} \right)},$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальна лінійна напруга мережі; $z_{\text{п}} = \sqrt{x_{\text{п}}^2 + r_{\text{п}}^2}$ – повний опір петлі фази й нульового проводу ($x_{\text{п}}$ приймається 0,6 Ом/км); $z_{\text{тр}}$ — повний опір силового трансформатора струму замикання на корпус.

Виткові замикання обмоток статора. Коротке замикання 3-5% витків однієї фази обмотки статора СД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.

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

Ознаки аварійних режимів СД наведено в табл.2.1

Виникнення міжвиткових і міжфазних замикань у фазних обмотках призводять до певного збільшення значень третьої гармоніки в непошкоджених

Таблиця 2.1

Ознаки аварійних режимів СД

Аварійний режим (пошкодження)	Ознаки аварійних режимів (зміна струмів і напруг)	Вплив на електропривод і мережу (характер змін у роботі двигуна й мережі)
Трифазні симетричні КЗ [141, 154]	<p>Струми фаз різко зростають (струм КЗ може перевищувати пусковий струм двигуна), фазні й лінійні напруги зменшуються. Між струмами й відповідними напругами встановлюється зсув відмінний від зсуву в нормальному режимі. Вектори струмів і напруг є симетричними й урівноваженими, у них відсутні складові зворотних і нульових послідовностей.</p>	<p>При зниженні напруги різко зменшується обертаючий момент двигуна ($M \equiv U^2$), фазні обмотки статора перегріваються й згорають. Ударні струми являють велику небезпеку – викликають значні зусилля між струмопровідними частинами устаткування, руйнуючи його й викликаючи нагрівання, що у багато разів перевищує термічну стійкість ізоляції.</p>
Двофазні КЗ на землю [126, 135, 154]	<p>Значення струмів ушкоджених фаз, міжфазних напруг залишаються такими ж, як і при звичайному двофазному замиканні. Струм нульової послідовності відсутній. Ушкоджені фази в місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує відносно землі зсув 0,5 ЕРС, а напруга неушкодженої фази зростає до 1,5 ЕРС.</p> <p>Сильне зниження міжфазних і фазних напруг ушкоджених фаз (у місці КЗ до нуля) і поява складових нульової послідовності не лише у фазних напругах, але й струмах.</p> <p>Напруга між ушкодженими фазами дорівнює нулю. Напруга неушкодженої фази залишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими фазами й неушкодженою знижуються до фазної напруги.</p> <p>Вектори струмів і напруг несиметричні й неурівноважені, з'являються складові прямої послідовності, зворотної і нульової.</p>	<p>Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.</p> <p>Через різке зниження напруги в місці КЗ (режим має найменше значення напруги прямої послідовності) цей вид ушкоджень після трифазного КЗ є найважчим з точки зору збереження стійкості енергосистеми й споживачів.</p>

Продовження таблиці 2.1

<p>Двофазні (міжфазні) КЗ в одній точці [135, 142, 154]</p>	<p>Струми значно перевищують номінальний струм двигуна. Якщо КЗ відбувається при навантаженні, то в неушкодженій фазі протікає лише струм навантаження, а в uszkodжених фазах струм навантаження накладається на струми КЗ, збільшуючи повний струм однієї фази й зменшуючи іншої.</p> <p>Фазні напруги в місці КЗ вищі нуля, одна міжфазна напруга знижується до нуля, а значення двох інших в 1,5 рази більше фазної.</p> <p>Вектори струмів і напруг утворюють несиметричну, але врівноважену систему, мають складові прямої і зворотної послідовностей, але не мають складових нульової.</p>	<p>Найбільш важкий режим роботи двигуна настає при металічному КЗ, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють $0,5U_n$.</p> <p>Для мереж без компенсації різниці фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55 - 60^\circ$.</p>
<p>Двофазні КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз [81, 142]</p>	<p>Струми при такому uszkodженні визначаються за методом симетричних складових. Різниця кутів між струмами фаз перевищує 60°.</p>	<p>Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.</p>
<p>Однофазні КЗ на землю [81, 135, 141, 154]</p>	<p>Характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ. Ушкоджена фаза в місці КЗ вимушено набуває потенціалу землі.</p> <p>Струми й напруги несиметричні і не врівноважені, внаслідок чого з'являються складові прямих, зворотних і нульових послідовностей.</p>	<p>Однофазні КЗ є найчастішим видом uszkodжень у мережах із глухо заземленими нейтраліями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ.</p> <p>Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для двигуна й характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ.</p>
<p>Однофазні виткові замикання [141, 142]</p>	<p>Є несиметричними uszkodженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг. Різко зростає струм прямої послідовності, струм зворотної послідовності лишається практично без зміни. Коротке замикання всього 3-5% витків однієї фази обмотки статора СД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.</p>	<p>Знижується момент обертання двигуна, і він перегрівается. Ступінь зниження моменту залежить від співвідношення потужностей uszkodженого двигуна й живильної мережі, відносного числа витків, що замкнулися і т. ін.</p> <p>При виткових замиканнях двигун слід негайно вимкнути.</p>

Продовження таблиці 2.1

Обрив фази живильної мережі [135, 154]	Дві сполучені послідовно обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу. При загальмованому роторі напруга на неушкоджених фазах дорівнює половині лінійної напруги, а напруга на ушкодженій фазі – нулю. Якщо втрата фази відбулася до вмикання двигуна, то пусковий струм становить 86% від пускового при трифазному живленні, тобто в понад 5 раз перевищує номінальний. За короткий час такий струм перегріє обмотки. У випадку втрати фази після вмикання двигуна в роботу величина струму збільшується на 75%.	В однофазному режимі в обмотці статора проходить однофазний струм, що створює пульсуюче магнітне поле. Поле змінюється в часі, але не переміщується по колу статора. Якщо втрата фази відбулася до включення двигуна в мережу, то він не може запуститися навіть за відсутності навантаження на валу. При переході двигуна із трифазного режиму роботи в однофазний на ходу утвориться обертаючий момент. Якщо швидкість двигуна близька до номінальної, обертаючий момент достатній для продовження роботи з невеликим зниженням
--	--	--

фазах, оскільки збільшення струму в короткозамкненому контурі посилює несиметрію струмів у фазах. Це призводить до зростання результуючого потоку від струмів третьої гармоніки і до збільшення ЕРС третьої гармоніки обмотки статора і ротора.

2.3 Моделювання кореляційних функцій та вибір кроку дискретизації процесу електроспоживання насосних установок з синхронними двигунами

Під час аналітичного дослідження електроспоживання НУ з СД важливим є обґрунтування математичної моделі випадкового процесу. Ця модель, з одного боку, повинна найбільш адекватно відображати властивості реального процесу електроспоживання, з іншого - допускати дослідження цього процесу відомими теоретичними методами. Вихід слід шукати на основі компромісних рішень в частині вибору найбільш простих і в той же час змістовних (продуктивних)

моделей при вирішенні завдань. Розглянуті в дисертаційній роботі моделі випадкових процесів застосовуються в практиці досліджень статичних систем з урахуванням реальних режимів.

Кореляційні функції, представлені у вигляді послідовності ординат і призначені для подальших розрахунків, як правило, апроксимуються тими чи іншими аналітичними виразами у відповідності з вибраним критерієм наближення. Незалежно від методу апроксимації визначаються параметри моделі, які задовольняють вибраному критерію наближення.

Оцінка ординат кореляційної функції, згідно [1, 80], здійснюється наступними методами: послідовним, послідовно - паралельним або сума - різницеvim. Таким чином, найбільш доцільним слід вважати використання обчислення оцінок кореляційної функції r_k при затримці k за наступними формулами:

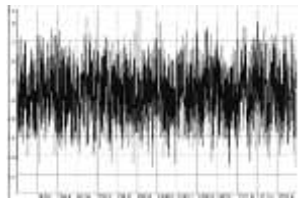
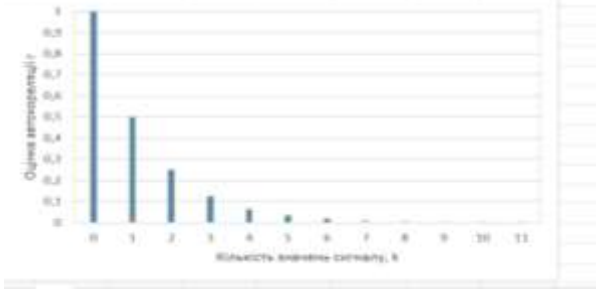
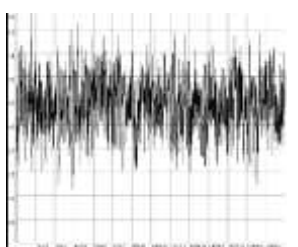
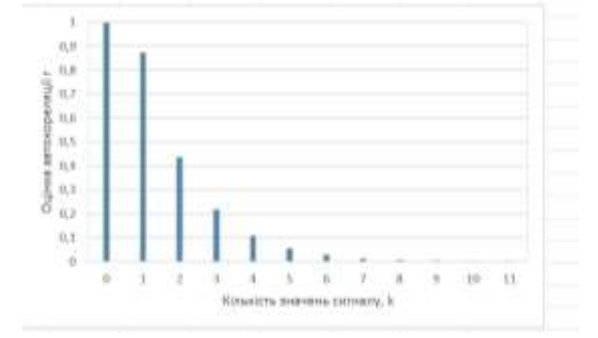
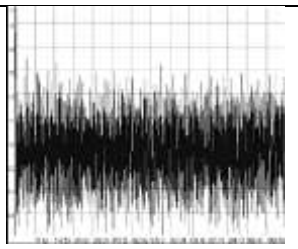
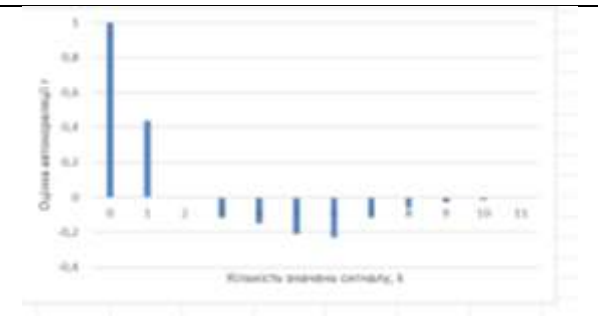
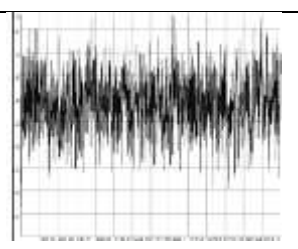
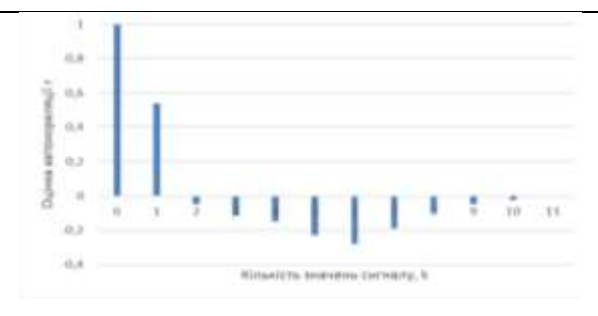
$$r_k = \frac{c_k}{c_0}, \quad (2.1)$$

де $c_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (z_t - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z})$, $k=0, 1, 2, 3, \dots, K$ – вибіркова оцінка автокореляції, \bar{z} – середнє значення часового ряду сигналу струму. Моделі нормованих кореляційних функцій придатних для вирішення поставлених задач, наведено в табл. 2.2 [94].

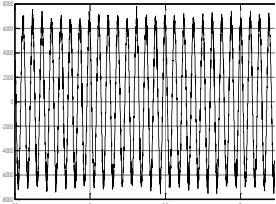
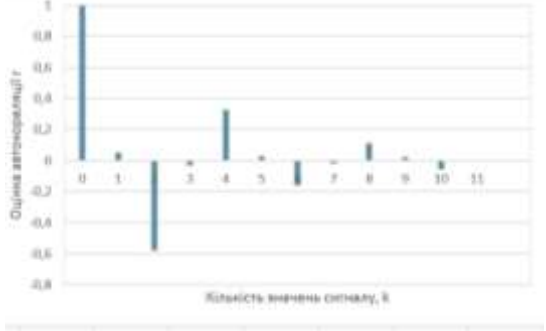
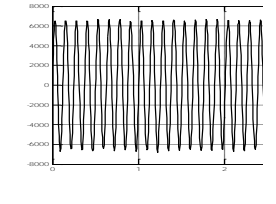
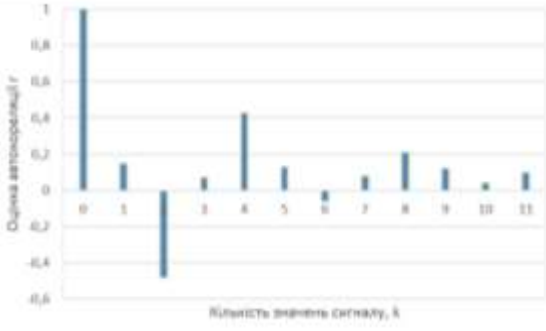
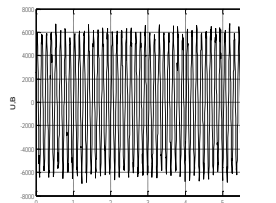
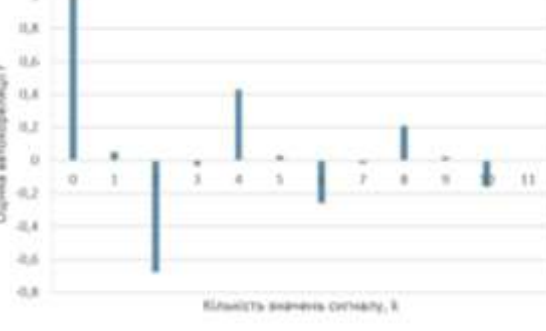
Якщо кореляційна функція сигналу не показує характер залежності (в нашому випадку сигнали струмів і напруг якими живиться синхронний електропривод мають вид $\sin(x)$ в залежності від фаз інший крок кута зсуву), то потрібно або збільшити кількість точок виміру на одному періоді, або зменшити часовий ряд при оцінці кореляційної функції, щоб вона була придатною для подальшого моделювання.

Тому виникає завдання визначення кроку дискретизації, який би задовольняв вимогам процесу діагностування СД насосних установок. Величина кроку дискретизації повинна бути вибрана, виходячи з розумного компромісу між вимогою точності вимірюваного процесу й апаратних можливостей [102].

Таблиця 2.2

№	Назва сигналу	Сигнал	Кореляційна функція та вид моделі
1	Сигнал струму фази «А» двигуна СД2-85/47-8У3;		 $\rho_x(\delta) = e^{-\alpha \delta }$
2	Сигнал напруги фази «А» двигуна СД2-85/47-8У3;		 $\rho_x(\delta) = e^{-\alpha \delta }(1 + \alpha \delta)$
3	Сигнал струму фази «С» двигуна СД2-74/33-8У3		 $\rho_x(\delta) = e^{-\alpha \delta }(1 - \alpha \delta)$
4	Сигнал напруги фази «С» двигуна СД2-74/33-8У3		 $\rho_x(\delta) = e^{-\alpha \delta }(1 + \alpha \delta + \alpha^2\delta^2/3)$

Продовження таблиці 2.2

5	Сигнал струму фази «В» двигуна СД2-85/47-8У3;		 $\rho_x(\delta) = e^{-\alpha \delta } \cos \omega_0 \delta$
6	Сигнал напруги фази «С» двигуна СД2-85/47-8У3;		 $\rho_x(\delta\tau) = e^{-\alpha \delta\tau } (\cos \omega_0 \delta + \beta / \omega_0 \sin \omega_0 \delta\tau)$
7	Сигнал напруги фази «В» двигуна СД2-85/47-8У3;		 $\rho_x(\delta) = e^{-\alpha\delta} (\cos \omega_0 \delta - \alpha / \omega_0 \sin \omega_0 \delta)$

Для того, щоб обрати необхідний метод дискретизації, сформульовано критерій вибору відліків, та встановлено процедуру відновлення за ними вихідного сигналу та встановлення похибки яка виникає при цьому [103].

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

$$R_y(\Delta) = R_y(0) - \frac{\delta^2}{2}, \quad (2.2)$$

де σ – середньоквадратична похибка для ступінчатої апроксимації, $R_y(\Delta)$ – значення кореляційної функції процесу $y(t)$ у точці Δ .

Значення інтервалу дискретизації залежить від виду АКФ, її параметрів, необхідної точності обчислення АКФ і способу інтерполяції кореляційних функцій між вузлами [27, 92].

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

$$R(\tau) = D_p e^{-\beta|\delta|} \cos \Omega_0 \tau, \quad (2.3)$$

де D_p – дисперсія індивідуального ГЕН.

Для АКФ (2.3) індивідуального ГЕН, що відповідає граничному режиму роботи (імпульсний режим «увімкнено-вимкнено») [106]

$$D_p = P_H^2 k_K (k_3 - k_K), \quad \beta = \frac{k_3^2}{k_K (k_3 - k_K) t_{ц}}, \quad \Omega_0 = 2\pi / t_{ц}, \quad (2.4)$$

де P_H – номінальне навантаження, k_K – коефіцієнт використання, k_3 – коефіцієнт завантаження.

Оскільки коефіцієнт використання $k_K = k_3 k_B$, параметр α

$$\beta = \frac{1}{k_B (1 - k_B) t_{ц}}, \quad (2.5)$$

де k_B - коефіцієнт ввімкнення, який характеризує використання ЕП у часі і визначається виразом $k_B = t_B / t_{ц}$, являючи собою ймовірність увімкненого стану ЕП.

Таким чином, для НУ з СД, які працюють у стаціонарному режимі з певною періодичністю, вираз (2.3) набуває вигляду

$$D_p e^{-\delta|\Delta|} \cos \Omega_0 \Delta = D_p - \frac{\delta^2}{2}. \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) не має параметричного аналітичного розв'язку. Приймаємо середньоквадратичну похибку відновлення сигналу 5% від номінальної потужності двигуна, а дисперсію ГЕН виражаємо у вигляді $D_p = \delta_p^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2$.

З огляду на те, що $P_{cp} = P_H k_k$, а $P_i = P_H p_i^*$, де p_i^* - відносна потужність у момент часу t_i , можна переписати вираз у вигляді $D_p = \delta_p^2 = \frac{P_H^2}{n} \sum_{i=1}^n (p_i^* - k_k)^2$. Позначивши відносну дисперсію ГЕН, як $\delta_p^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i^* - k_k)$, одержимо $D_p = \delta_p^{*2} P_H^2$. Таким чином, рівняння (2.6) можна представити у вигляді

$$e^{-\beta|\Theta|} = \frac{1 - 0,00125 \delta_p^{*-2}}{\cos \Omega_0 \Theta}. \quad (2.7)$$

Аналізуючи типові ГЕН НУ з СД для різних технологічних процесів, наприклад, наведених в [103, 107], а також узявши два крайні 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 $0 \leq \delta_p^* \leq 0,5$. У виразі враховано, що $0 \leq P_i \leq P_H$, або $0 \leq p_i^* \leq 1$.

Враховуючи в (2.5), що, як правило, $0,1 \leq k_b \leq 1,0$, а також, беручи до уваги (2.7), автором одержано графіки для вибору кроку дискретизації залежно від тривалості циклу роботи синхронного електроприводу насосних установок (рис. 2.3–2.5).

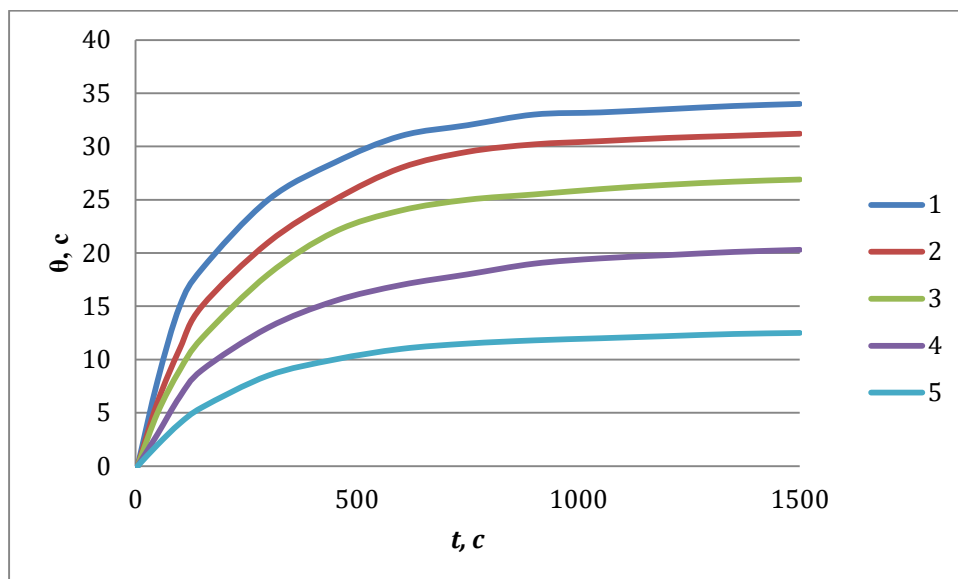


Рис. 2.3 Залежність кроку дискретизації θ від тривалості циклу роботи $t_{\text{ц}}$ НУ 1Д1250-125 для різних значень коефіцієнту ввімкнення $k_{\text{в}}$ та відносного середньоквадратичного відхилення $\delta_p^* = 0,1$: 1 – $k_{\text{в}}$ 0,1 або 0,9; 2 – $k_{\text{в}}$ 0,2 або 0,8; 3 – $k_{\text{в}}$ 0,3 або 0,7; 4 – $k_{\text{в}}$ 0,4 або 0,6; 5 – $k_{\text{в}}$ 0,5

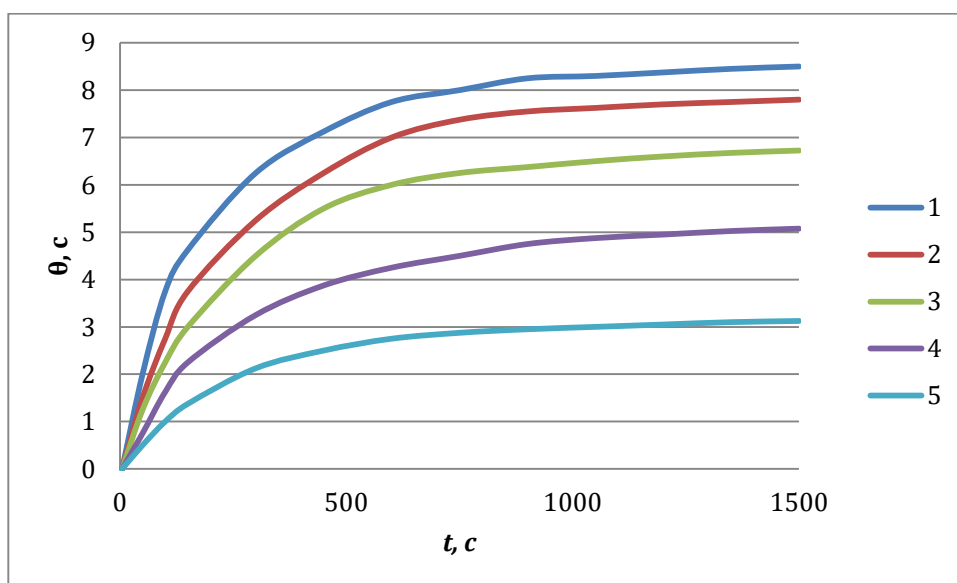


Рис. 2.4 Залежність кроку дискретизації Θ від тривалості циклу роботи $t_{\text{ц}}$ НУ СДВ 7200/29 для різних значень коефіцієнту ввімкнення $k_{\text{в}}$ та відносного середньоквадратичного відхилення $\delta_p^* = 0,3$: 1 – $k_{\text{в}}$ 0,1 або 0,9; 2 – $k_{\text{в}}$ 0,2 або 0,8; 3 – $k_{\text{в}}$ 0,3 або 0,7; 4 – $k_{\text{в}}$ 0,4 або 0,6; 5 – $k_{\text{в}}$ 0,5.

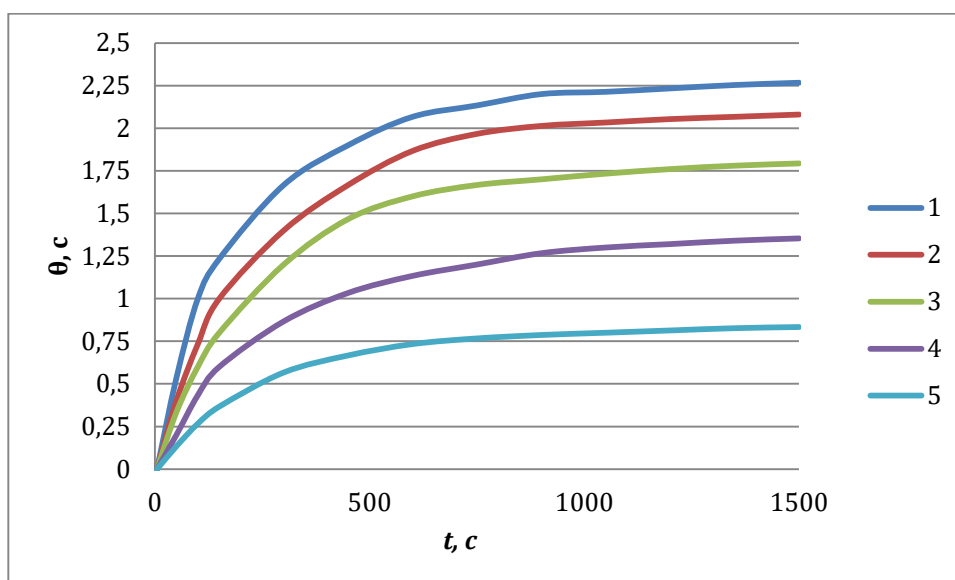


Рис. 2.5 Залежність кроку дискретизації Θ від тривалості циклу роботи $t_{\text{ц}}$ НУ 8 НДВ для різних значень коефіцієнту ввімкнення k_B та відносного середньоквадратичного відхилення $\delta_p^* = 0,5$: 1 – k_B 0,1 або 0,9; 2 – k_B 0,2 або 0,8; 3 – k_B 0,3 або 0,7; 4 – k_B 0,4 або 0,6; 5 – k_B 0,5.

Для НУ, які працюють у безперервному стаціонарному режимі, АКФ може бути апроксимована виразом $R(\tau\delta) = D_p e^{-\beta|\delta|}$.

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

$$\Theta = -\frac{\ln(1-0,00125\delta_p^{*-2})}{\beta}. \quad (2.8)$$

Для визначення параметру α безперервний процес слід представити як частковий випадок циклічного періодичного процесу з АКФ $R(\delta) = D_p e^{-\beta|\delta|} \cos\Omega_0\delta$. У цьому випадку параметр α можна приблизно оцінити за формулою (2.1). У практичних розрахунках для безперервного режиму можна k_B приблизно прийняти 0,99, тоді $\beta = \frac{101}{t_{\text{ц}}}$.

Таким чином, вираз (2.9) має вигляд

$$\Theta = -\frac{t_{\text{ц}} \ln(1-0,00125\delta_p^{*-2})}{101}. \quad (2.9)$$

Вираз (2.9) можна представити у вигляді графіків для різних значень середньоквадратичного відхилення (рис. 2.6).

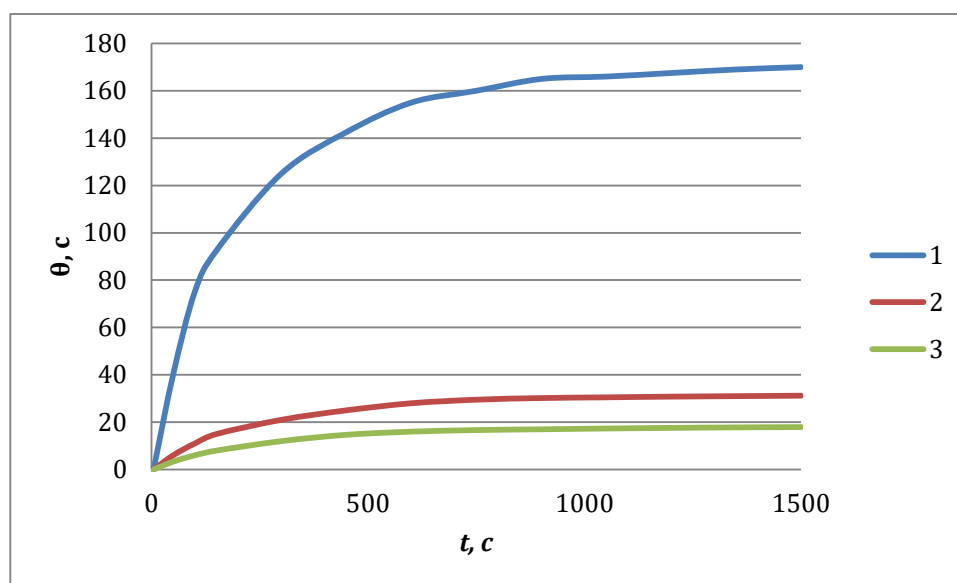


Рис. 2.6 Залежність кроку дискретизації від тривалості терміну роботи НУ 16 НДН для різних значень середньоквадратичного відхилення:

$$1 - \delta_p^* = 0,1; 2 - \delta_p^* = 0,3; 3 - \delta_p^* = 0,5$$

На практиці оцінити значення середньоквадратичного відхилення можна за результатами попередніх випробувань або за формулою $\delta_p^* = \frac{p_{\max}^* - k_K}{\sqrt{2}}$, де p_{\max}^* — відносна максимальна потужність за цикл, зміну [24, 26].

2.4. Залишковий ресурс синхронних двигунів та його прогнозування

Оцінити залишковий ресурс синхронного двигуна та швидкість процесу старіння ізоляції відносно нескладно, якщо двигун працює з незмінною її температурою. Так для ізоляції класу F та H працює правило Монтзігера [38].

Для ізоляції СД зі сталим навантаженням термін її придатності [15]

$$z = k_r e^{-\tau k_{iz}},$$

де k_r і k_{iz} — сталі коефіцієнти часу роботи та зносу для даного виду ізоляції.

Залишковий ресурс СД

$$z = z_{\text{поч}} e^{-\Delta\tau k_{iz}},$$

де $Z_{\text{поч}}$ - початковий ресурс ізоляції.

Під час роботи НУ з СД ізоляція зазнає ще й електричного і механічного впливу, а дана модель враховує лише теплове старіння. Тому її руйнування внаслідок пробою трапляється значно раніше.

Суттєвий вплив на термін служби СД спричинює якість напруги живлення (ДСТУ EN 50160:2014). Через несиметрію напруги всі вузли СД зазнають впливу підвищеної температури, особливо лобова частина найзавантаженої фази статора. За деякими даними несиметрія напруги 5%, або зменшення її на 10 % зменшує термін служби СД вдвічі [48].

Температура обмоток у функції несиметрії напруги

$$\tau_{nes} = \tau_r(1,863k_{nes}^2 + 1)$$

Так при $k_{nes} = 4,0\%$ температура обмоток синхронного двигуна підвищується на 25% (рис. 2.7, 2.8).

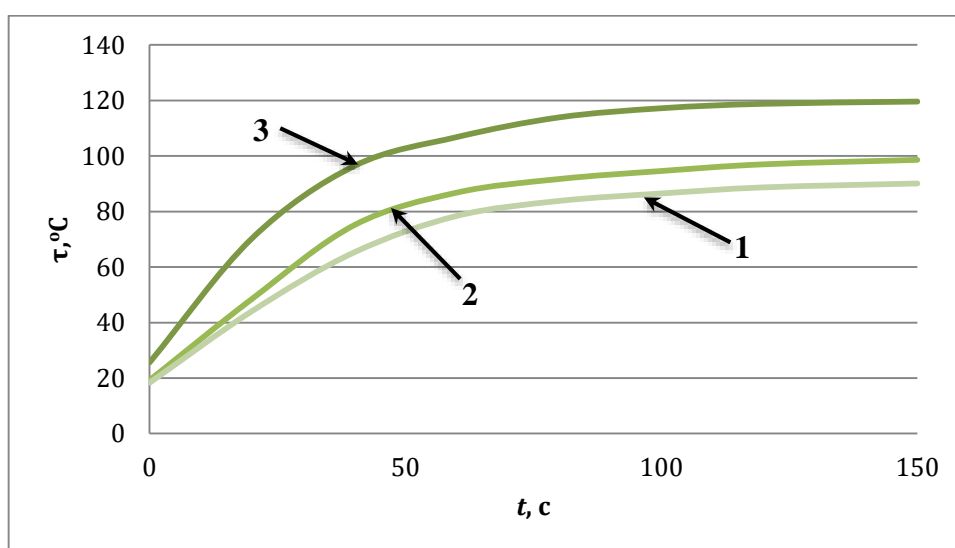


Рис. 2.7 Криві нагрівання СД у функції часу: 1 – симетрична напруга; 2 – несиметрія 2%, нормально допустима згідно ДСТУ EN 50160:2014; 3 – несиметрія 4%, граничне допустиме значення

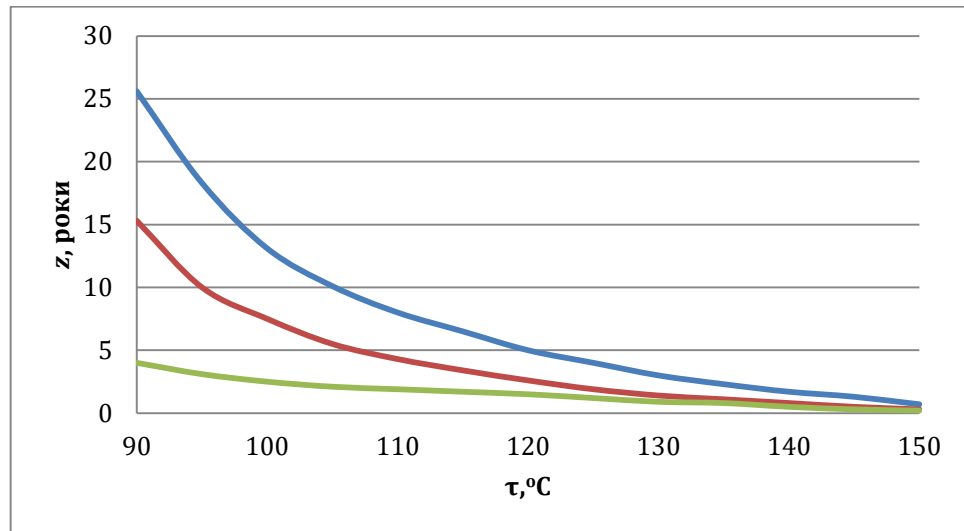


Рис. 2.8 Залежності строку служби ізоляції класу S від коефіцієнта несиметрії напруги і температури ізоляції (б): 1 – симетрична напруга; 2 – несиметрія 2%, нормально допустима згідно ДСТУ EN 50160:2014; 3 – несиметрія 4%, граничне допустиме значення

Додаткове перегрівання обмотки статора за [38], спричинене несинусоїдальністю напруги

$$\Delta\tau_{\text{НС}} = \Delta\tau \sum_{v=2}^n \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}$$

Також додаткове перегрівання

$$\Delta\tau_{\text{НС}} = \tau \frac{\Delta P_{\text{MV}}}{\Delta P_{\text{M}}}$$

де ΔP_{MV} - втрати в міді, зумовлені вищими гармоніками напруги [38].

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

$$z = \exp \left[-360 \left(K_{2U}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right) \right]$$

Спрощену формулу визначення перегрівання обмоток внаслідок несинусоїдальності й несиметрії напруги живлення наведено у [37]

$$\Delta\tau_{\text{пер}} = \frac{360}{b} \left(K_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right)$$

де $\Delta\tau_{\text{пер}} = \tau_{\text{пер}} - \tau_{\text{н}}$.

Через прискорене зношування ізоляції строк служби СД зменшується, якщо він тривалий час працює на пониженій напрузі. За формулою $z = z_{\text{н}}/d$ визначається строк служби ізоляції z , де $z_{\text{н}}$ - строк служби ізоляції двигуна для номінальних напруги і навантаження, d - коефіцієнт, який залежить від величини і знаку відхилення напруги, а також від коефіцієнта завантаження двигуна [80]

$$d = (53\delta U_y^2 - 6,95\delta U_y + 1)k_z^2 \text{ при } -0,2 < \delta U_y < 0; d = k_z^2 \text{ при } 0,2 \geq \delta U_y > 0.$$

Від'ємні відхилення напруги з точки зору нагрівання являють собою значну небезпеку. Залежності строку служби ізоляції обмоток СД для різних коефіцієнтів завантаження й різних значень від'ємного відхилення напруги зображено на рис. 2.9.

Строк служби ізоляції для температури τ змінної в часі t [38]

$$z = c \int_0^t e^{-b\tau} dt.$$

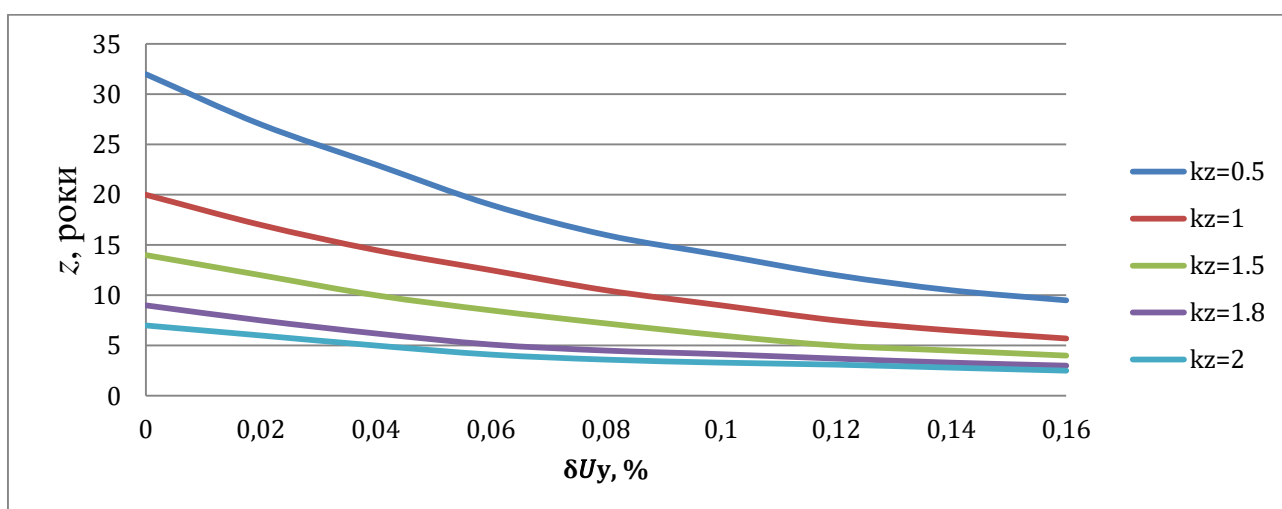


Рис. 2.9 Графіки залежності строку служби ізоляції СД від коефіцієнта завантаження та від'ємного відхилення напруги

Прогнозувати залишковий ресурс можливо застосовуючи метод експоненціального згладжування. За допомогою експоненціально зваженого ряду ваг легко розрахувати середнє зважене показника y в момент часу T , яке буде визначене прогнозною моделлю процесу на наступний момент спостереження $(T + 1)$. Прогнозна модель має вид:

$$y_{T+1} = \alpha y_T + (1 - \alpha)u_T,$$

де α – постійна згладжування, а $(1 - \alpha)$ - еквівалентна постійна згладжування

Вихідний ряд ваг, запропонований Брауном, являє собою нескінченну геометричну прогресію, про яку відомо, що вона сходиться до одиниці, якщо для члена геометричної прогресії виконується єдина умова: модуль члена геометричної прогресії повинен бути менший одиниці.

Для прогнозу насосних установок з синхронними двигунами $\alpha = 0,2 \div 0,3$ в зв'язку з гладким видом графіку терміном служби ізоляції.

Якість прогнозу визначається точністю задання початкових умов моделювання. Температура $\bar{\tau}$ та залишковий ресурс \bar{z}

$$\bar{\tau}\{(j+1)h\} \approx \bar{\tau}(jd) + d \Delta \bar{\tau}(jd) + j_1\{\tau(jd) - \bar{\tau}(jd)\},$$

$$\bar{z}\{(j+1)d\} \approx \bar{z}(jd) - d \Delta \bar{z} e^{-\Delta \tau k_{iz}(jd)} + j_2\{\tau(jd) - \bar{\tau}(jd)\},$$

де $j_1\{\tau(jd) - \bar{\tau}(jd)\}$, $j_2\{\tau(jd) - \bar{\tau}(jd)\}$ – вирази, які коригують якість оцінки.

Тривалість часу t , для визначення залишкового ресурсу поділяється відповідно до кроку дискретизації, на деяку кількість інтервалів, таким чином, щоб втрати на кожному з них можна було вважати сталими. Подальшими діями є визначення температури обмоток на кожному з інтервалів і залишковий ресурс протягом часу t [29].

Згідно [159], прийнявши закон розподілу часу τ_r безвідмовної роботи СД експонентним, визначається ймовірність безвідмовної роботи $X(z) = \exp(-\tau_r/\bar{z})$ (рис. 2.10).

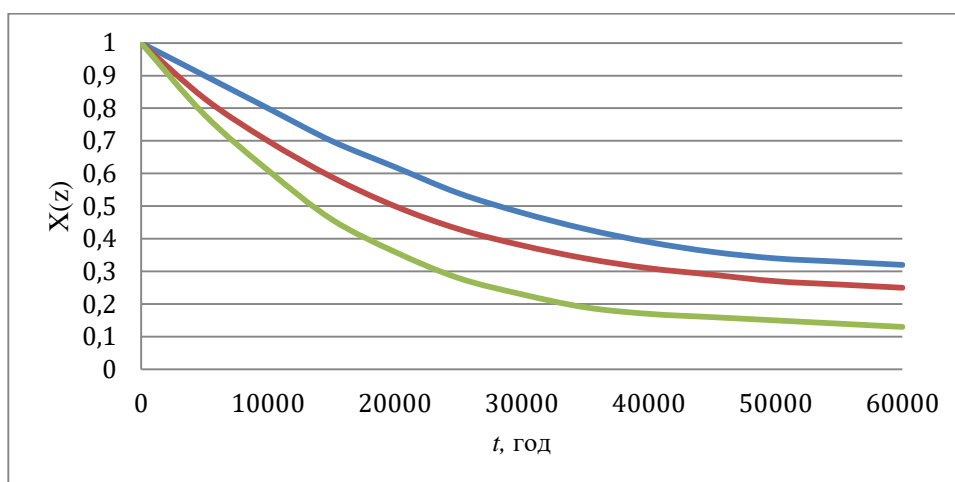


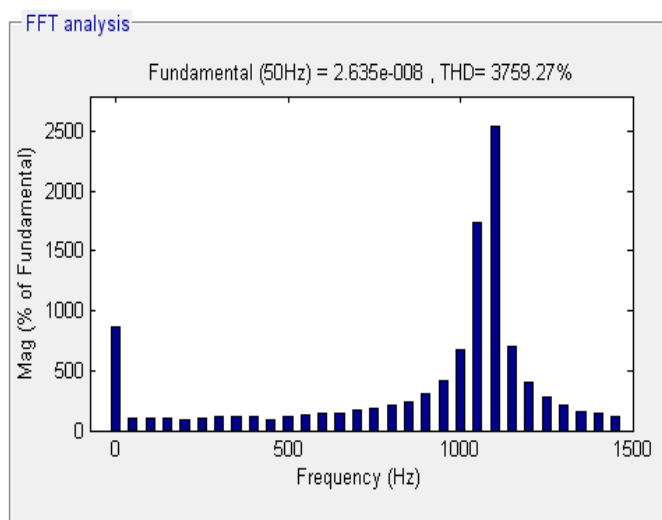
Рис. 2.10 Залежність безвідмовної роботи СД при номінальному навантаженню та різних початкових напруженнях

2.5. Визначення технічного стану електроприводу насосних установок з синхронними двигунами

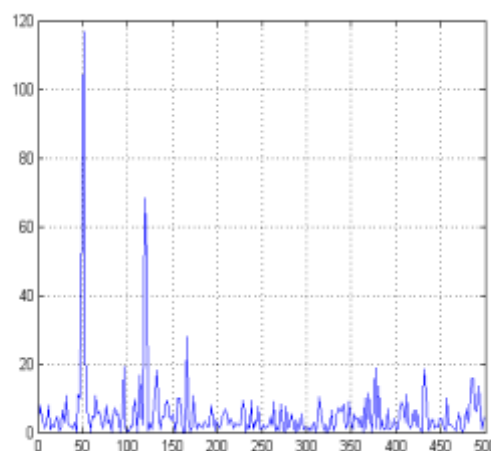
Аварійні режими СД умовно поділяються на механічні та електричні. В свою чергу електричні поділяються на три типи: струмові аварії, пов'язані з міжвитковими й міжфазними замиканнями обмоток, з обривом провідників у обмотках статора, ротора або кабелю, з порушенням контактів і руйнуваннями з'єднань, аварії, пов'язані з пробоем ізоляції через нагрівання, яке викликане протіканням струмів короткого замикання або перевантаження; мережеві аварії, ті які пов'язані з аваріями електромережі що живить СД; аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її зволоження, старіння або руйнування. Вплив аварійних режимів на СД та ознаки, за якими можна їх визначити наведено в розділі 2.2.

Радіальна вібрація через механічні перевантаження на валу СД, виробничий брак елементів, асиметрія напруги живлення є причинами значної частини механічних аварій. Через прихований характер більшості аварій вони виявляються лише після розбирання СД та НУ або відповідних випробувань. Постійний контроль напруги мережі та струму, що споживається, дозволяє за допомогою засобів діагностування звести цю ймовірність до мінімуму.

На теперішній час значне поширення отримав методи діагностування стану ЕМС, які використовують моніторинг споживаного струму та виконують спектрально-струмового аналіз отриманого сигналу [139]. Цей метод дозволяє з достатнім рівнем достовірності встановити технічний стан елементів НУ. Будь-які збурення в роботі механічної і електричної частин двигуна та пов'язаної з ним насосної установки змінюють магнітний потік в зазорі електричної машини, тобто слабкої модуляції струму, що споживається. Свідченням про наявність пошкоджень електричної або механічної частин насосної установки є поява у спектрі струму СД характерних частот певної величини [140]. На відміну від вібродіагностики, моніторинг струму насосної установки може виконуватись в електрощиті живлення або на клемній коробці СД без втручання в його роботу [51, 52, 135-138]. Спектри струмів СЕП за допомогою програми MATLAB наведено на рис. 2.11.



а



б

Рис. 2.11 Спектральна характеристика струму синхронного електроприводу отримана за допомогою блоку "Powergui" (а) та розкладу через "FFT analysis" (б)

Спотворення форми напруги живлення СД призводить до появи гармонік в отриманих спектрах струму і напруги. Несправності двигуна і пов'язаного з ним насоса викликають гармоніки лише в спектрі струму.

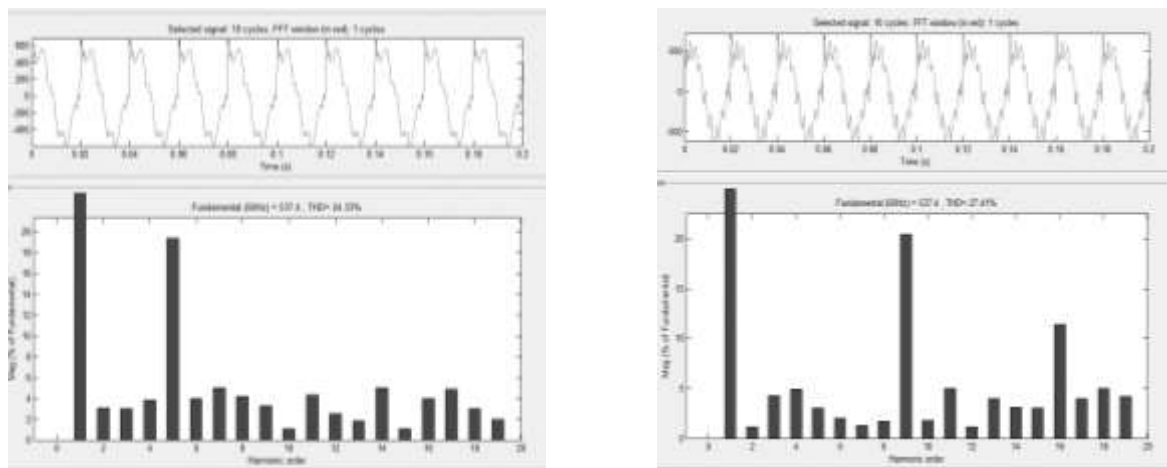
Наведемо приклади таких пошкоджень:

- неспівосність валів двигуна і пов'язаної з ним насосної установки, а також пошкодження підшипників визначається за частотами кратними частоті обертання ротора СД;
- наявність міжвиткових замикань в обмотках статора СД визначається за частотою живильної мережі на підприємстві;
- ослаблення кріплення до фундаменту, зачіплення ротора за статор двигуна визначається на частоті кратній $\frac{1}{2}$ частоти обертання ротора;
- дефекти ремінної передачі визначається на частотах кратних частоті биття ременя, яка залежить від його довжини і діаметрів шківів;
- ексцентриситет ротора визначається на численних бічних смугах на частоті непарних гармонік живильної мережі;
- пошкодження пов'язані з СД механізмів: насос, вентилятор, компресор визначається на лопатевій частоті.

Спектральні характеристики струму та напруги, пошкодження на НУ та характерні частоти, за якими вони визначаються, отримані автором з допомогою комп'ютерного моделювання представлені на рис. 2.12. Вплив дефектів насосної установки на спектри струмів та напруг приводного двигуна представлені на табл. 2.3.

Виявити гармонічні складові струму характерні для непрацюючого обладнання можливо порівнянням гармонік напруги й струму. Скориставшись базою даних вимірювань, та аналізуючи їх в процесі експлуатації насосної установки можна спостерігати розвиток пошкоджень двигуна та пов'язаного з ним механізму в динаміці, а отже прогнозувати розвиток несправностей [134].

Показником критичності дефекту може слугувати різниця між амплітудами основної частоти і характерної для конкретної несправності. Як



а

б

Рис. 2.12 Спектральні характеристики напруги (а) та струму (б) НУ з СД, які показують дефект - зношеність робочого колеса.

Таблиця 2.3 – Вплив дефектів насосної установки на спектр струмів та напруг двигуна

Дефект	Зміна параметра																		
	1 гармоніка струму	3 гармоніка струму	5 гармоніка струму	7 гармоніка струму	9 гармоніка струму	13 гармоніка струму	15 гармоніка струму	17 гармоніка струму	19 гармоніка струму	1 гармоніка струму	3 гармоніка струму	5 гармоніка струму	7 гармоніка струму	9 гармоніка струму	13 гармоніка струму	15 гармоніка струму	17 гармоніка струму	19 гармоніка струму	
Знос робочого колеса	+				+			+		+		+							
Знос ущільнення		+		+						+			+		+				
Зміна форми робочого колеса	+			+	+				+	+			+	+		+			
Пошкодження підшипників ковзання	+		+					+		+			+		+				+
Дефекти системи охолодження		+						+		+									+
Дефекти клапанів	+					+	+				+				+			+	
Відхилення від горизонтального рівня під час монтажу			+			+		+			+	+						+	+
Дисбаланс		+		+				+				+		+					+
Неспіввісність валів		+				+				+						+	+		

показали дослідження, різниця понад 60 дБ вказує на справний стан ротора, менш ніж 40 дБ – на погіршення його стану (з'явилися високоомні з'єднання, тріщини) [159].

На теперішній час визначення технічного стану насосної установки з СД, придатного для кількісної оцінки не існує. Технічний стан установки можна визначити за допомогою аналізу складових втрат, за якими діагностується ушкодження у відповідному вузлі, з використанням показника відносної зношеності ізоляції [123]. Зношеність ізоляції в умовах постійного навантаження

$$\theta = \frac{1}{Z} = ce^{b\tau}.$$

Відносна зношеність ізоляції

$$\chi = \frac{\theta}{\theta_H} = e^{b(\tau - \tau_H)} = e^{b\Delta\tau}.$$

Середнє значення відносної зношеності ізоляції СД за період часу T

$$\bar{\chi} = \frac{1}{T} \int_0^T e^{b\Delta\tau} dt.$$

Відносна зношеність ізоляції нижча від номінального значення, якщо насосна установка з СД працює зі зниженим навантаженням. Відносна зношеність перевищує одиницю якщо робоча температура вища припустимої. Тому головною умовою справного технічного стану є відносна зношеність ізоляції за певний цикл часу, яка не повинна перевищувати одиницю.

Відповідно до типового ГЕН насосної установки в умовах неякісної напруги живлення і зміни навантаження виконано моделювання роботи СД потужністю 40кВт. Змодельовані параметри СД НУ в умовах поступового збільшення навантаження в 1,5 рази, а потім його зменшення до початкового значення наведено на рис. 2.13.

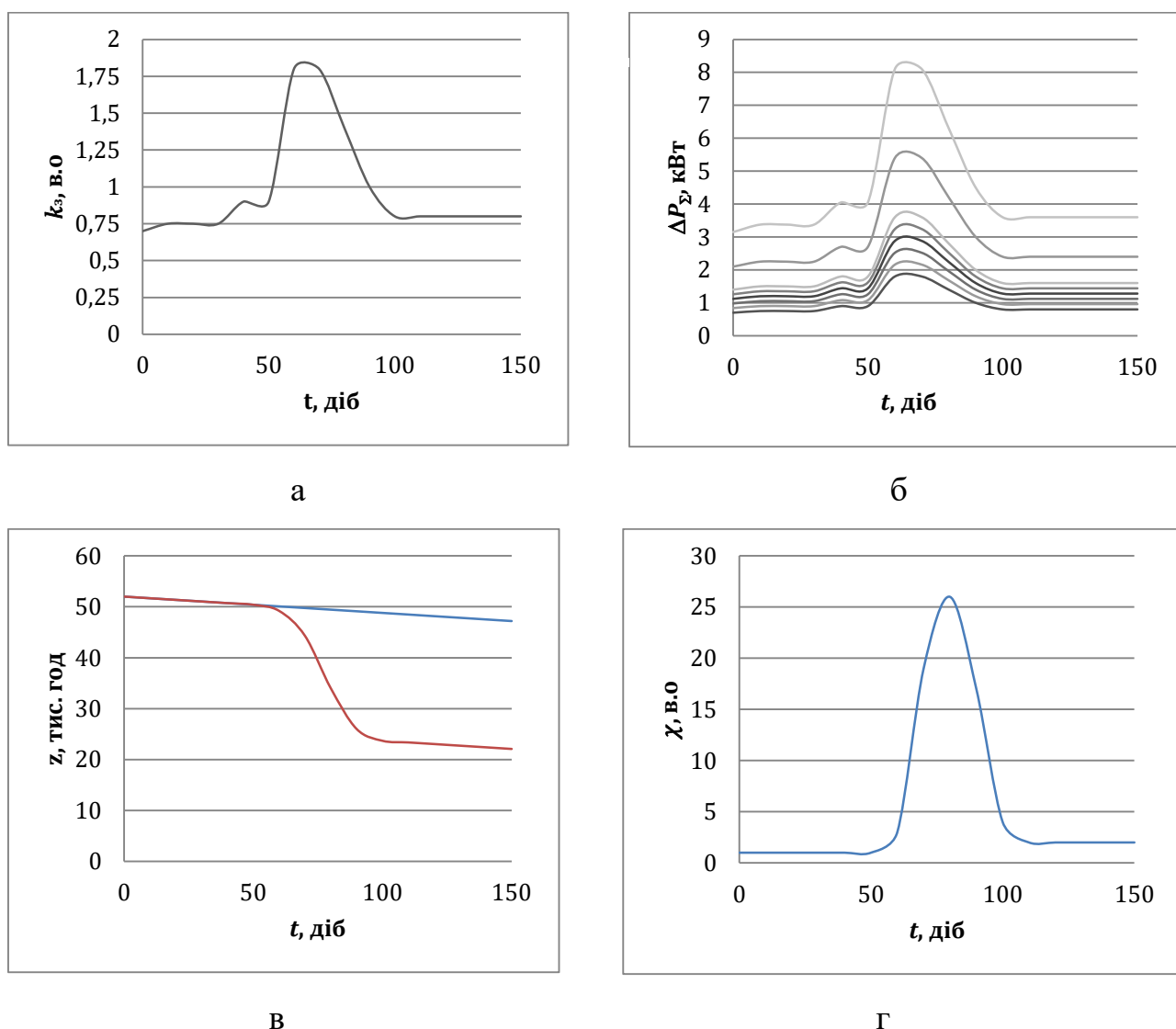


Рис. 2.13 Результати моделювання характеристик СД насосної установки в умовах збільшення навантаження: а – коефіцієнт завантаження; б - повні втрати за годинами добового ГЕН; в - залишковий ресурс; г - відносне зношування

Під час роботи насосної установки в такому режимі істотно зростає зношеність ізоляції (рис. 2.13). Для максимального навантаження відносна зношеність становить понад 40 відн.од. Залишковий ресурс зменшується з 760 днів до 31. Змодельовані параметри насосної установки з СД в умовах неякісної напруги живлення, що виражається у відхиленні напруги від номінальної наведено на рис. 2.14.

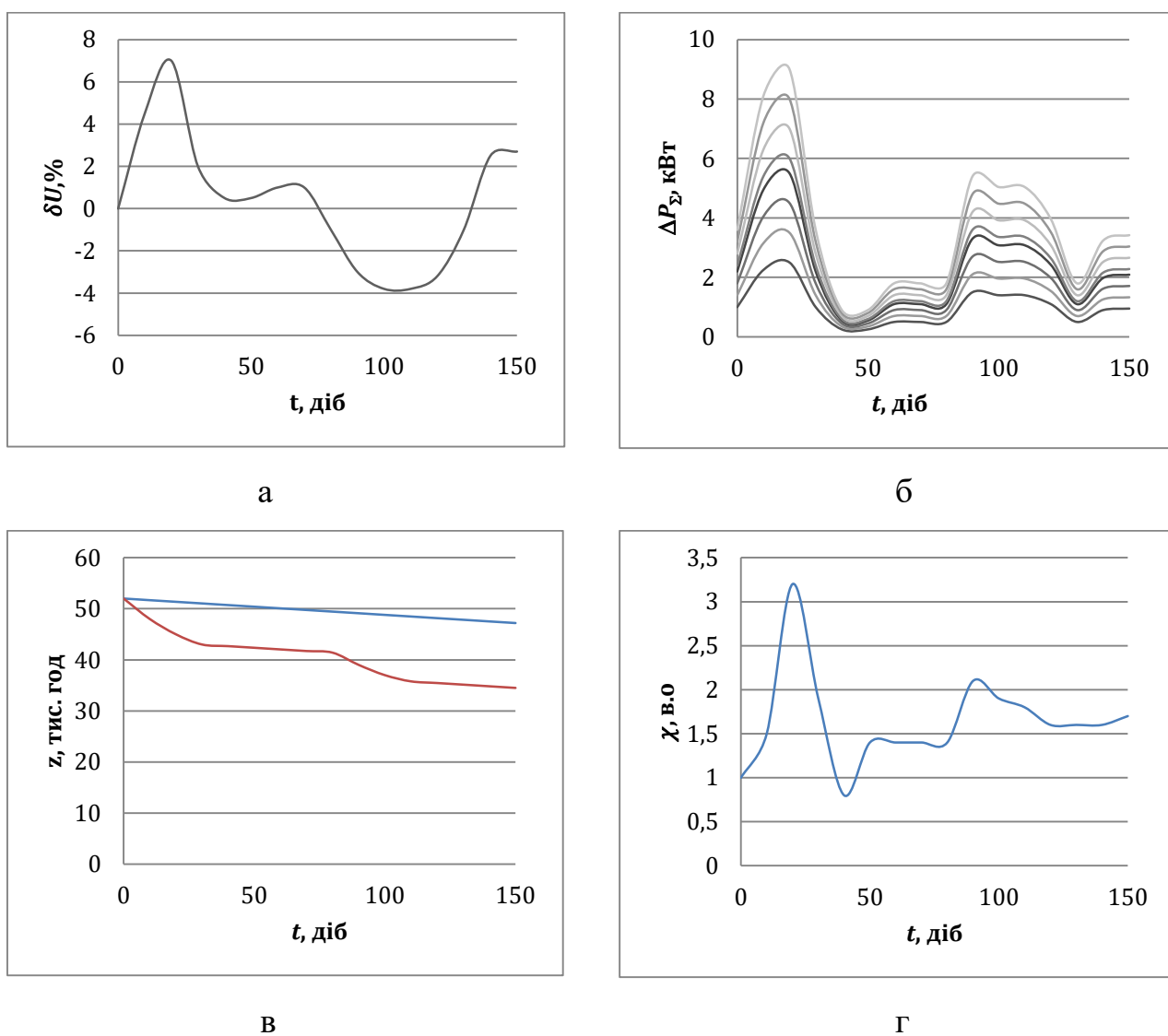
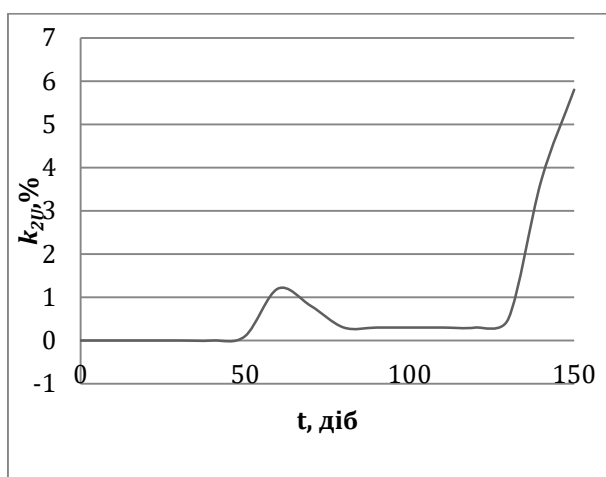
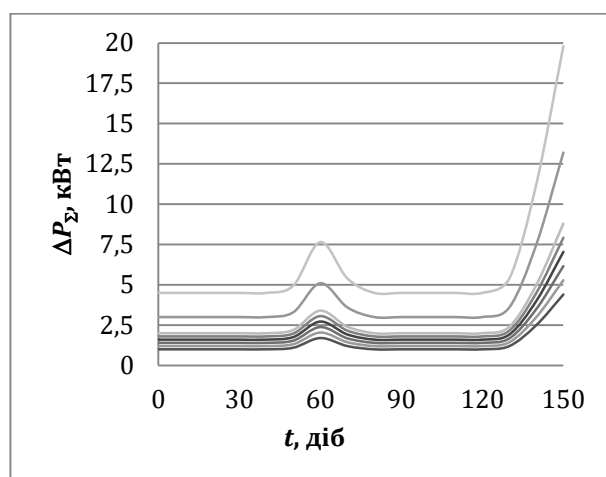


Рис. 2.14 Результати моделювання характеристик СД насосної установки в умовах відхилення напруги живлення від номінальної: а - усталене відхилення напруги; б - повні втрати за годинами добового ГЕН; в - залишковий ресурс; г - відносне зношування

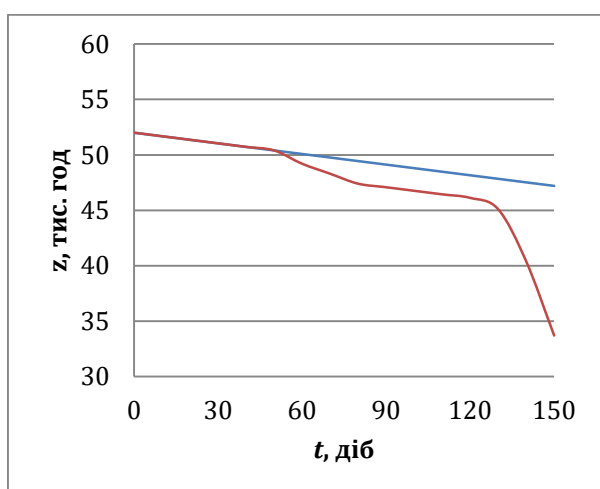
До зростання зношеності ізоляції СД насосної установки у 1,8 рази призводить робота в такому режимі відхилення напруги. Таким чином, залишковий ресурс у момент найбільшого значення відхилення напруги зменшується з 760 до 510 днів. Змодельовані параметри СД НУ в умовах живлення неякісною напругою, що виражається у несиметрії напруги, наведені на рис. 2.15.



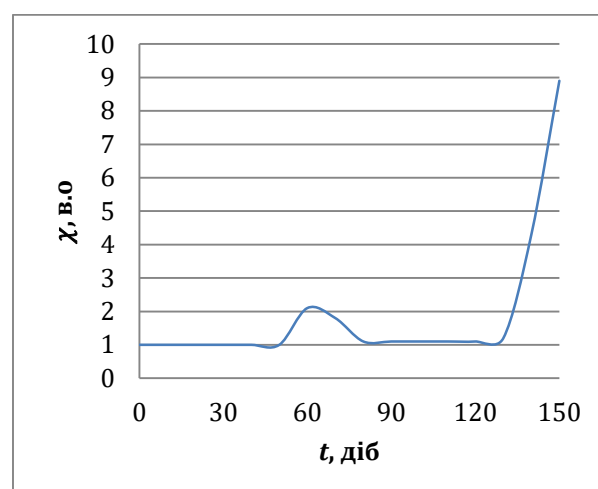
а



б



в



г

Рис. 2.15 Результати моделювання характеристик СД насосної установки в умовах несиметрії напруги живлення: а - коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності; б - повні втрати за годинами добового ГЕН; в - залишковий ресурс; г - відносне зношування

Відносне зношення у цьому випадку збільшується в 3,2 рази, а залишковий ресурс за найбільшої несиметрії зменшується з 760 до 318 днів (2.19).

Результати математичного моделювання роботи насосної установки з СД в умовах змінного навантаження та низької якості напруги живлення показало, що відносне зношення може слугувати діагностичною ознакою, причому якщо його значення перевищує одиницю, двигун перебуває в передаварійному стані.

Другим критерієм технічного стану може бути величина втрат у вузлах насосної установки з СД. Аналіз цих значень здійснюється шляхом порівняння поточних значень складових втрат ΔP_{ϕ} з їх еталонними значеннями ΔP_e . Якщо $\Delta P_{\phi} > \Delta P_e$, двигун насосної установки знаходиться у незадовільному технічному стані. Несправність у відповідному вузлі насосної установки з СД діагностується, за складовими втрат.

За допомогою моделі (стр. 85) автором розраховано значення втрат в СД насосної установки. Як видно з рис. 2.16, значення змінних втрат є суттєво

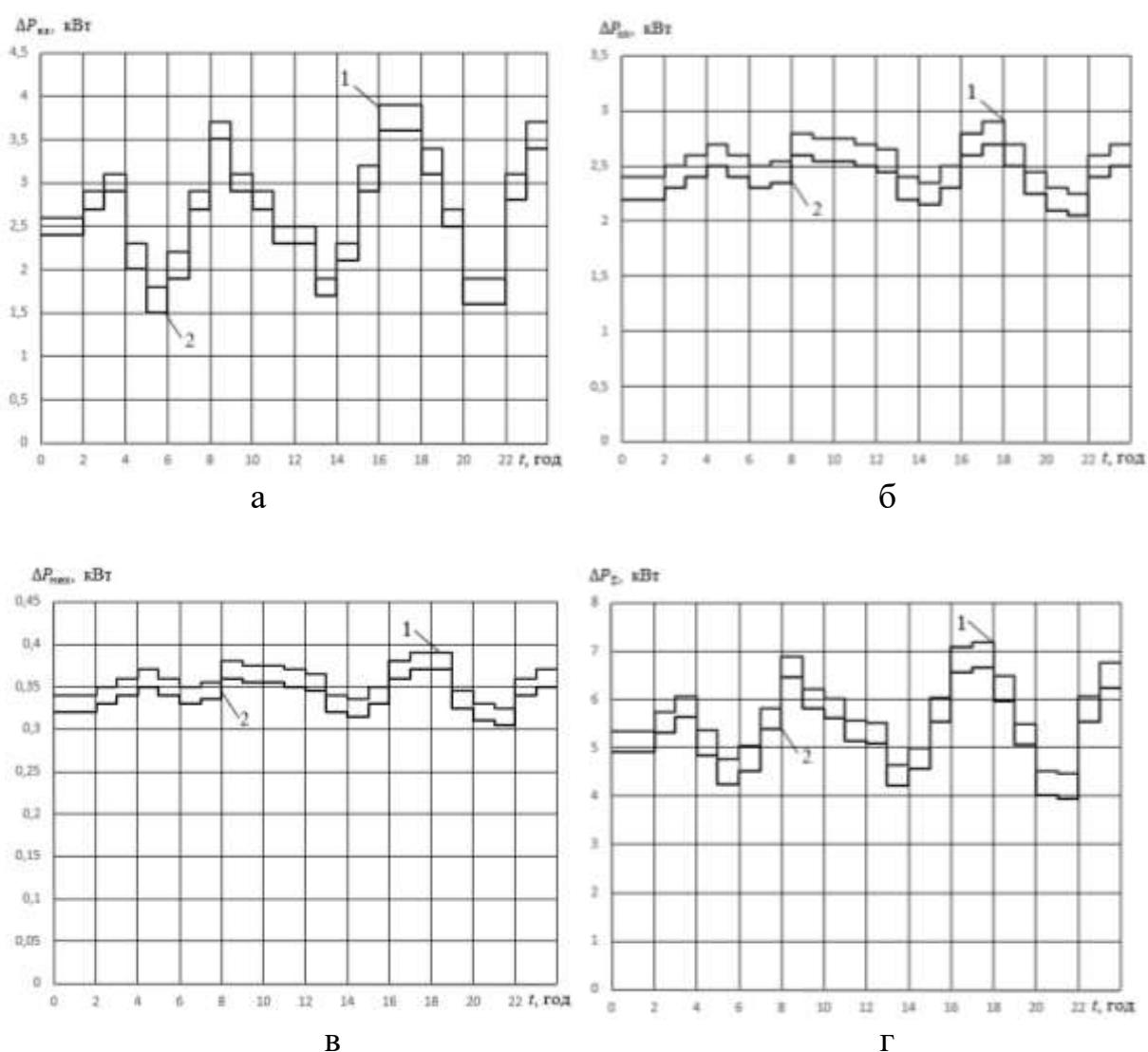


Рис. 2.16 Результати моделювання складових втрат СД насосної установки з несправностями обмотки статора (1 – несправний двигун, 2 - справний):

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

більшими порівняно з еталонними. Внаслідок збільшення струму, що споживається на 25% зросли втрати в обмотці статора. Що свідчить про несправність в обмотці статора. Через виникнення гальмівних моментів під час роботи несправного двигуна збільшилися механічні втрати на 3,2%. Загальні втрати зросли на 19%, та ККД знизився на 1,5%. Тому, можна зробити висновок про те що за методом складових втрат в обмотці статора існують пошкодження.

За допомогою комп'ютерного моделювання виконано дослідження роботи насосної установки з СД відповідно до експериментально знятого ГЕН. Дані СД насоса: $P_H = 250\text{кВт}$. Термін служби 30 000 год. Усталене відхилення напруги лежить у межах 5%, коефіцієнт несиметрії - 1%, зношення - 15 640 год.

За допомогою моделі діагностування енергетичного та технічного стану синхронного електроприводу насосних установок (стр 99.) автором проведено моделювання еталонних та фактичних характеристик насоса, які зображено на рис. 2.17 - 2.18 та табл. 2.4.

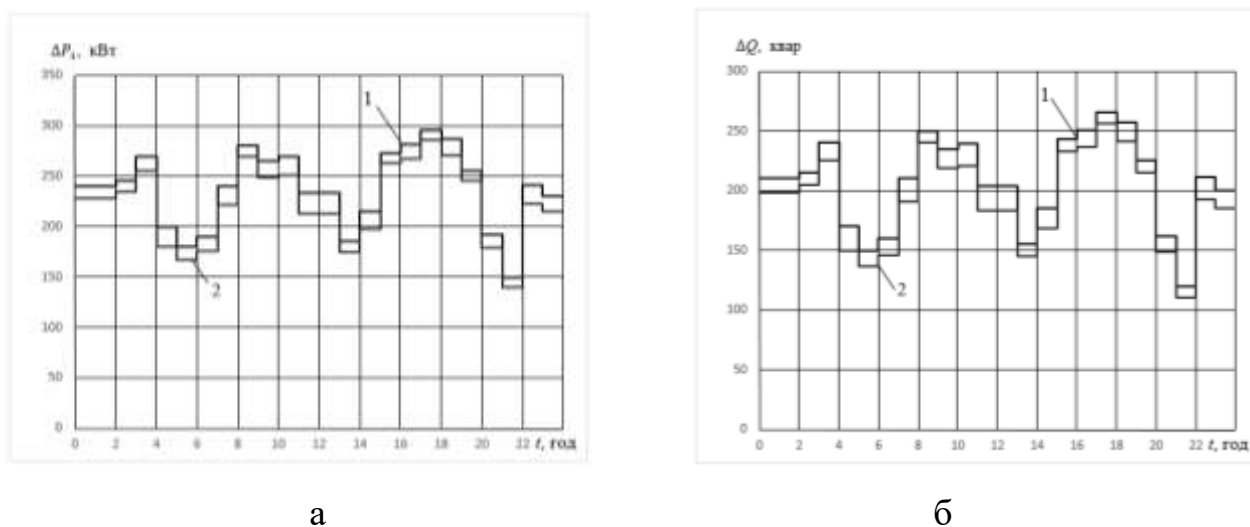


Рис. 2.17 ГЕН активної (а) та реактивної потужності (б) насоса: 1 - фактична; 2 - еталонна

Результати моделювання параметрів насосної становки що представлені в табл. 2.5 було про нормовано до одиничного значення для наявного представлення інформації про об'єкт на одній гістограмі та наведено на рис. 2.23.

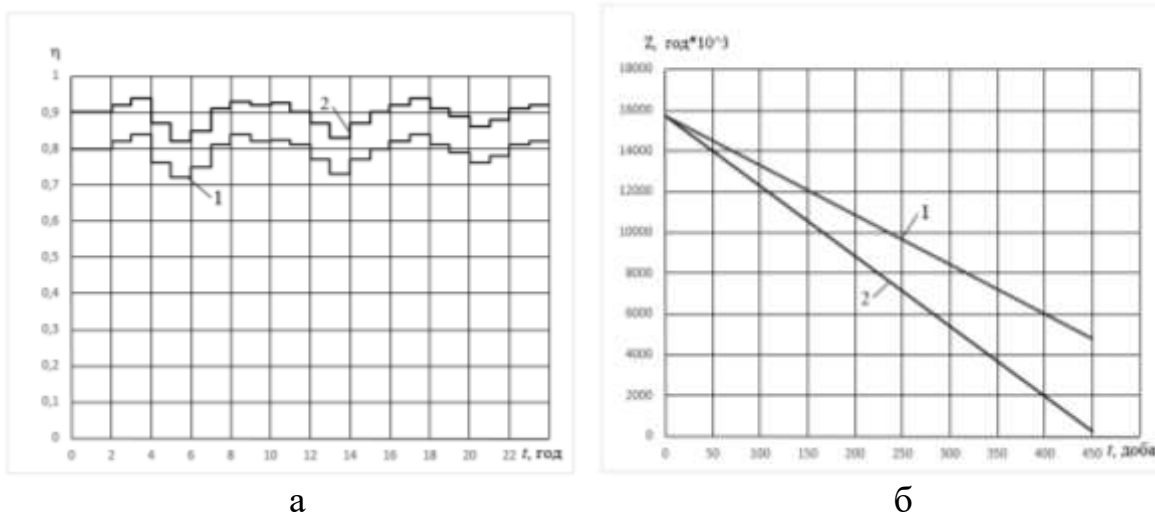


Рис. 2.18 ККД (а) та залишковий ресурс (б) насоса: 1 - еталонний; 2 – фактичний

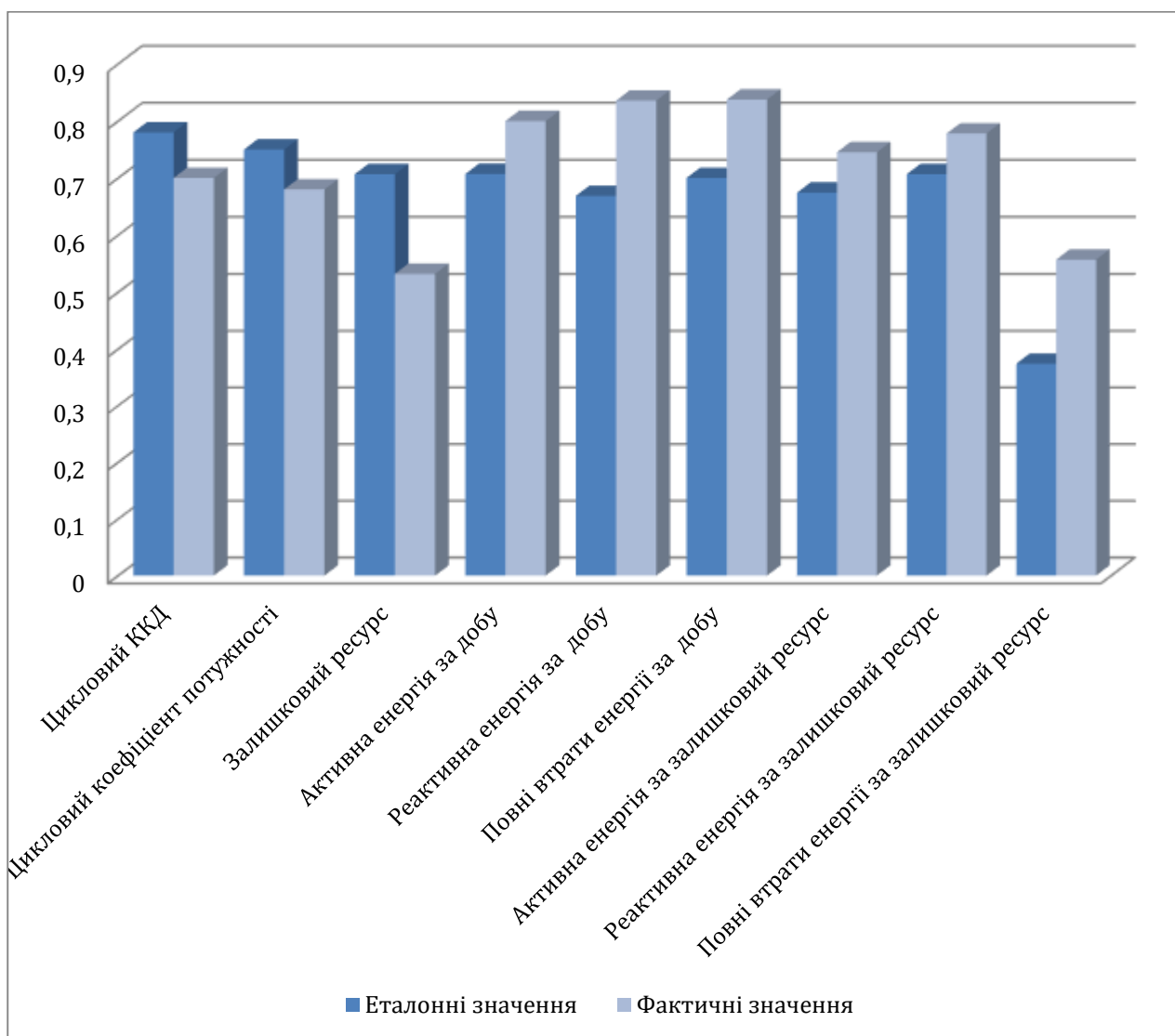


Рис. 2.19 Результати моделювання параметрів насосної установки

Таблиця 2.4

Результати моделювання параметрів насосної установки

Параметр	Одиниці виміру	Еталонні значення	Фактичні значення
ККД за період	відн. од	0,78	0,7
Коефіцієнт потужності за період	відн. од.	0,75	0,68
Залишковий ресурс	год	10600	7980
Активна енергія за добу	кВт×год	4950	5600
Реактивна енергія за добу	квар×год	4680	5850
Повні втрати енергії за добу	кВт×год	560	670
Активна енергія за залишковий ресурс	кВт×год	1686250	1863000
Реактивна енергія за залишковий ресурс	квар×год	1767100	1945125
Повні втрати енергії за залишковий ресурс	кВт×год	186980	222775

Для визначення вартості життєвого циклу необхідно оцінити спожиту електроенергію НУ з СД протягом залишкового ресурсу[149]

$$W_{\text{факт}_P} = \frac{Z}{T_u} \int_0^{T_u} P_1(t) dt \approx \frac{Z}{T_u} \sum_{i=1}^n P_{1i} t_i,$$

$$W_{\text{факт}_Q} = \frac{Z}{T_u} \int_0^{T_u} Q(t) dt \approx \frac{Z}{T_u} \sum_{i=1}^n Q_i t_i.$$

У таких умовах роботи залишковий ресурс СД НУ становить 10970 год, а для роботи в номінальному режимі – 15750 год. Відносне зношування становить 1,5, що свідчить про передаварійний режим роботи СД НУ.

Як видно з рис 2.19, застосування діагностування енергетичного та технічного стану ЕП НУ з СД дозволить знизити споживання активної енергії на 10%, реактивної - на 30%, підвищити в 1,5 рази залишковий ресурс до паспортного його значення, підвищити ККД на 8%, коефіцієнт потужності - на 9%, знизити втрати на 30%.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано визначати фактори, що негативно впливають на синхронний електропривод насосних установок за допомогою діаграм Ісікава та Парето з залученням експертів, що дає змогу встановити основні інформативні фактори, а саме: якість напруги живлення, режим навантаження та умови експлуатації.

2. Встановлено критерії визначення кроку дискретизації сигналів струмів та напруг, які в залежності від виду і параметрів досліджуваного сигналу дозволяють кількісно оцінювати і здійснювати його вибір із середньоквадратичною похибкою, яка не перевищує 5%.

3. Запропонована методика визначення строку служби синхронного двигуна, яка враховує режим навантаження, додаткові втрати досліджуваного агрегату та дозволяє розраховувати строк його служби в усталеному режимі роботи зі змінним навантаженням, з достатньою для інженерної практики точністю. Досліджено залежність строку служби двигуна від впливу відхилень показників якості електроенергії, що дає можливість уникнути зриви режимів роботи технологічного процесу.

4. Встановлено, що при визначенні технічного стану, та механічних несправностей електроприводу насосних установок з синхронними двигунами за рахунок використання методів складових втрат і аналізу спектрів струмів та напруг дало можливість визначити показник відносної зношеності ізоляції, що обумовлює залишковий ресурс роботи електроприводу.

5. Застосування діагностування енергетичного та технічного стану синхронного електроприводу насосних установок з використанням методу складових втрат дозволяє знизити споживання активної енергії до 12%, реактивної – до 25%, підвищити в 1,8 рази залишковий ресурс, підвищити ККД до 7%, коефіцієнт потужності - до 8,5%, а також знизити втрати на 30%.

Основні результати досліджень, наведено в наукових працях автора [73, 101, 105, 107, 121, 144, 159].

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З НАСОСНИМИ УСТАНОВКАМИ

3.1. Модель розрахунків робочих параметрів синхронного електропривода за паспортними даними.

Математичне формулювання задачі

Нехай досліджувана система об'єктів (синхронний електропривод) складається зі скінченної множини B_0 показників B_n , $B_0 = \{ B_n \mid n=1, N \}$. Кожний з показників $B_n \in B_0$ всієї скінченної множини B_0 , розподіляється до групи D_0 найвпливовіших підгруп D_k , $D_k \in D_0 = \{ D_k \mid k=1, K \}$. Необхідно сформулювати кількість найвпливовіших підгруп D_k показників B_n , $B_0 = \{ B_n \mid n=1, N \}$, $D_k \in D_0$ піддається аналізу з метою вирішення поставленого завдання Z . Де під задачею розуміється дослідження моделі розрахунків робочих параметрів синхронного електропривода за паспортними даними, з метою визначення параметрів які найбільшим чином відображають адекватність моделі розрахунків робочих параметрів синхронних двигунів насосних установок.

Еталонна модель для діагностування ЕМС заснована на використанні паспортних даних та схем заміщення СД. Ця модель враховує режим механічного навантаження (ГМН), відхилень робочих параметрів двигунів від номінальних і припустимі значення ПЯЕ (ІЕС 60034-1:2004, ДСТУ 3886-99, ДСТУ EN 50160:2014). Також використовується база даних про попередні ремонти.

Для розроблення моделі приймаються такі припущення:

- для живлення двигуна застосовується напруга номінальної величини, стандартної частоти;
- електромагнітний момент двигуна дорівнює моменту на його валу.

Алгоритм розрахунку параметрів СД полягає в наступному.

Крок 1. Введення паспортних даних:

$$P_H, n_H, U_H, I_H, \cos\varphi_H, \eta_H, \lambda, f_H, J_{ДВ}, \lambda_M, \lambda_K, U_f, I_f,$$

де P_H — номінальна потужність на валу; n_H — номінальна частота обертання ротора; U_H — номінальна напруга; I_H — номінальний струм; f_H — номінальна частота мережі; η_H — номінальний ККД; $\cos\varphi_H$ — номінальний коефіцієнт потужності; $J_{ДВ}$ — момент інерції двигуна або маховий момент; $\lambda = M_{\max}/M_H$ — перевантажувальна здатність; $\lambda_M = M_{П}/M_H$ — кратність пускового моменту; $\lambda_K = I_K/I_H$ — кратність струму короткого замикання; клас ізоляції (A, B, F, H); ступінь захисту (IP54, IP55); кліматичне виконання (УЗ, Т2). Інформація щодо паспортних даних СД береться з [132, 157]. Деякі виробники наводять також типові характеристики $\eta(P)$ [8]. Для синхронних двигунів указується напруга U_f і струм I_f обмотки збудження.

Крок 2. Визначення параметрів схеми заміщення

Визначення параметрів схеми заміщення для СД, яка представлена в осях d і q (рис. 3.1).

Реактивний опір взаємної індукції по осях d і q [158]

$$x_{ad} = x_d - x_s, x_{aq} = x_q - x_s$$

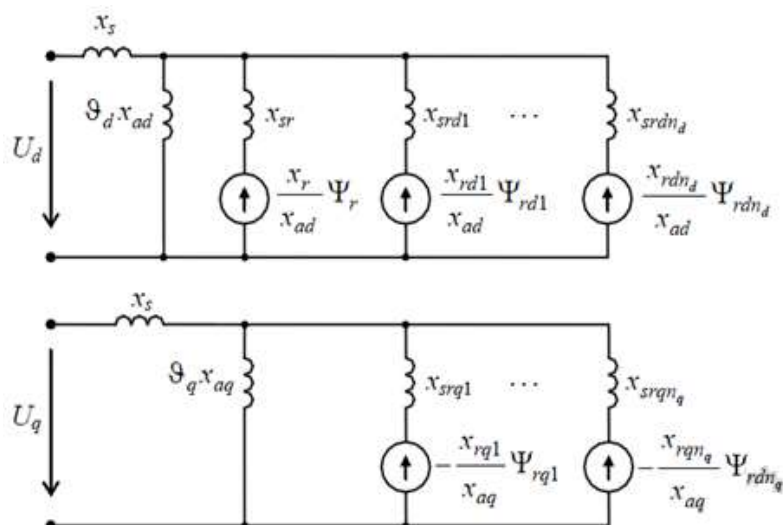


Рис. 3.1. Схема заміщення синхронного двигуна

Активний та індуктивний опір контуру збудження

$$x_r = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d} \quad r_r = \frac{x_r}{\omega_s T_r} x_{sr} = x_r - x_{ad} = x_{ad} \left(\frac{x_{ad}}{x_d - x'_d} - 1 \right)$$

Опір розсіювання демпферних контурів в осях d і q визначається на основі схем заміщення (рис. 3.2) визначається за формулами:

$$x_{srd1} = \frac{1}{\frac{1}{x'_{d1} - x_s} \frac{1}{x_{ad}} \frac{1}{x_{sr}}}, \quad x_{srq1} = \frac{1}{\frac{1}{x'_{q1} - x_s} \frac{1}{x_{aq}}}$$

Тоді індуктивні опори демпферних контурів становить

$$x_{rd1} = x_{ad} + x_{srd1}, \quad x_{rq1} = x_{aq} + x_{srq1}.$$

Активні опори еквівалентних демпферних контурів оцінюються на основі перехідних параметрів двигуна [153] визначаються за формулами:

$$r_{rd1} = \frac{(x_{rd1}x_d - x_{ad}^2)x'_{d1}}{\omega_s x_d x'_d T'_{d1}}, \quad r_{rq1} = \frac{x_{rq1}x_q - x_{aq}^2}{\omega_s x_q T'_{q1}}.$$

Формула для розрахунку r_{rd1} справджується, якщо виконується співвідношення $r_{rd1} \gg r_r$ що справедливо для потужних явнополюсних синхронних машин і може розглядатися як допущення для неявнополюсних синхронних машин у разі наближеного заміщення ротора двома еквівалентними демпферними контурами.

Активний опір статора

$$r \approx \frac{x_2}{\omega_s T_a}$$

Реактивний опір зворотної послідовності

$$x_2 \approx \frac{2x'_{d1}x'_{q1}}{x'_{d1}+x'_{q1}},$$

звідки можна виразити значення x'_{q1} .

Визначаємо початкові значення потокозчеплення обмотки збудження і потокозчеплення демпферних контурів за формулами:

$$\psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q}, \quad \psi_{rqk} = \frac{x_{aq}}{x_{rqk}} E_{\delta d}.$$

Крок 3. Визначення параметрів процесу енергоспоживання

Визначаємо повну потужність [153]

$$S = 3U_H I_H.$$

Визначаємо споживану електричну потужність у номінальному режимі [113]

$$P_1 = 3U_H I_H \cos \varphi.$$

Розраховуємо реактивну потужність [115]

$$Q_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2}.$$

Розрахунок $\cos \varphi$ здійснюється за формулою [153]

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

Визначення параметрів процесу енерговикористання

Втрати потужності [153]

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P = \Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{кз}} + \Delta P_{\text{д}} + \Delta P_{\text{дд}},$$

де ΔP_{xx} - постійні втрати потужності; $\Delta P_{\text{кз}}$ - змінні втрати; $\Delta P_{\text{д}}$ - додані (паразитні) втрати; $\Delta P_{\text{дд}}$ - додаткові втрати.

Додані (паразитні) втрати визначаються втратами на гістерезис і вихрові струми в режимі холостого ходу та під навантаженням. Вони залежать від навантаження [115]

$$\Delta P_{\text{д}} = \Delta P_{\text{дн}} k_{3l}^2.$$

де $\Delta P_{\text{дн}} = 3I_{\text{н}}^2 r_{2p}$ - додані втрати в номінальному режимі.

Додаткові втрати в обмотках і сердечниках двигуна обумовлені несиметрією $\Delta P_{\text{нм}}$ та несинусоїдальністю $\Delta P_{\text{нд}}$ напруги живлення [113]

$$\Delta P_{\text{дд}} = k_{\text{м}} P \sum_{n=2}^m K_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} + \Delta P_{\text{д}} \frac{U_{\text{м2}}^2}{Z_{2\text{м}}^2}.$$

Втрати потужності на збудження, Вт,

$$\Delta P_f = \frac{r_f I_f^2}{\eta_f} = \frac{U_f I_f}{\eta_f},$$

де $r_f I_f^2$ - електрична потужність збудження генератора, Вт; I_f - струм збудження, А; U_f - напруга збудження, В; r_f - опір обмотки збудження, Ом; η_f - ККД збуджувача [7].

Механічні втрати потужності $\Delta P_{\text{мех}}$ складаються з втрат на вентиляцію машини і на тертя в підшипниках, ротора і охолоджуючий газ, щітках і контактних кільцях [115]. Механічні втрати в загальному вигляді залежать від частоти обертання ротора

$$\Delta P_{\text{мех}} = C_1 n^\alpha,$$

де $\alpha=2-3$ - постійний коефіцієнт, що визначається схемою вентиляції машини та іншими факторами; C_1 - постійний коефіцієнт.

У більшості синхронних машин додаткові втрати незначні ($\Delta P_d \leq 0,005P_{1H}$) і в розрахунках ККД часто приймають $\Delta P_d=0$.

Електромагнітна потужність

$$\Delta P_{em} = \frac{mIE_0}{X_c} \sin \varphi.$$

Магнітні втрати потужності ΔP_M , що складаються з втрат на гістерезис (перемагнічування) ΔP_Γ і на вихрові струми ΔP_B [115]

$$\Delta P_M = \Delta P_B + \Delta P_\Gamma = C_2 f_1^{1,5},$$

де C_2 – сталий коефіцієнт.

Електричні втрати потужності в обмотці якоря, Вт,

$$\Delta P_e = mrI^2,$$

де m - число фаз якоря; r - активний опір фази обмотки якоря, Ом; I - фазний струм якоря, А.

Втрати у живильному кабелі ΔP_k залежать від опору проводу R_Π і повного струму I_Π

$$\Delta P_k = 3I_\Pi^2 R_\Pi.$$

Повні або сумарні втрати потужності в машині

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_f + \Delta P_{em} + \Delta P_d + \Delta P_M + \Delta P_e + \Delta P_k.$$

Постійні втрати або втрати холостого ходу

$$\Delta P_{xx} = \Delta P_f + \Delta P_{мех} + \Delta P_M.$$

Коефіцієнт завантаження синхронного двигуна:

$$k_3 = \frac{P_2}{P_{2H}} = \frac{I}{I_H}$$

Змінні втрати або втрати короткого замикання:

$$\Delta P_{кз} = mrk_3^2 I_H^2 = k_3^2 \Delta P_{кн}$$

Залежність ККД від коефіцієнтів завантаження k_3 і потужності $\cos\varphi$ [124]:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{xx} + k_3^2 \Delta P_{кн}}{k_3 S_H \cos\varphi + \Delta P_{xx} + k_3^2 \Delta P_{кн}} \quad (3.1)$$

Існує емпірична залежність η [110]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{0,7 \frac{1-\eta_H}{\eta_H}}{k_3} + 0,3 \frac{1-\eta_H}{\eta_H}} \quad (3.2)$$

За результатами алгоритму проведено моделювання залежності ККД та потужності втрат від завантаження, що приводиться на рис. 3.2

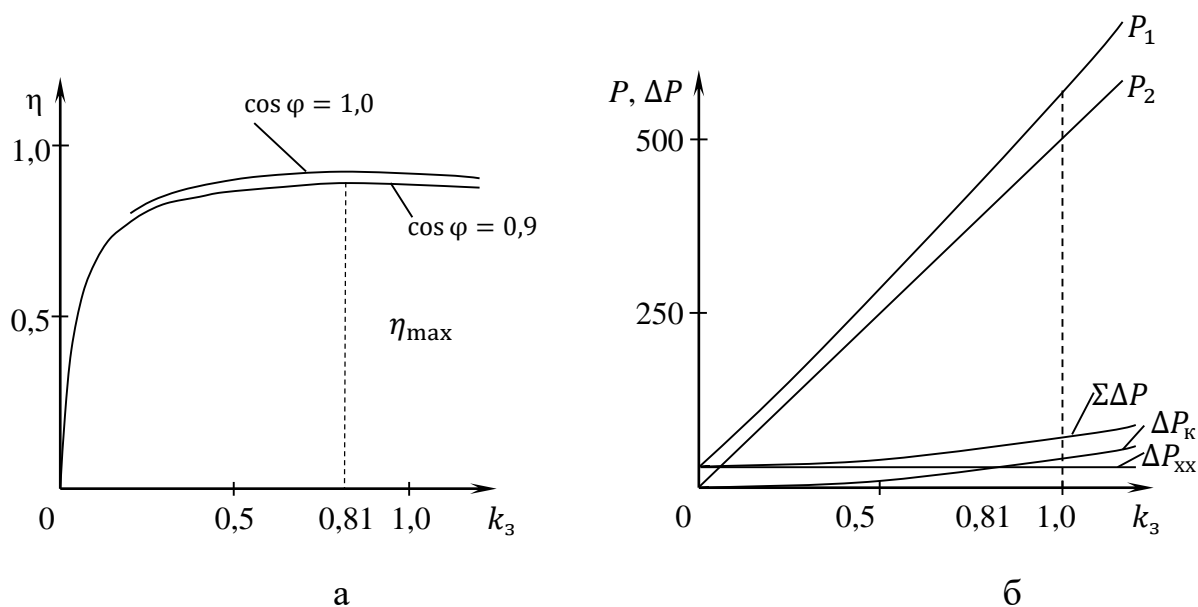


Рис. 3.2. Залежність ККД (а), потужності та втрат (б) СД від завантаження при $\cos\varphi = \text{const}$

Подальше збільшення навантаження двигуна ($k_3 > k_{3\max}$) зменшує його ККД через більш швидке зростання змінних втрат пропорційних квадрату завантаження $\Delta P_k \equiv k_3^2$ в порівнянні зі збільшенням корисної потужності пропорційно першому ступеню завантаження $P_2 \equiv k_3$.

При зміні навантаження в межах $k_3=0,25-1,0$ ККД залишається високим, відрізняючись від максимального не більше ніж на 0,01-0,05, тобто машина працює з досить високими енергетичними показниками.

Модель формування еталонів в середовищі MATLAB Simulink (рис. 3.3) реалізовано у вигляді схеми. Для двигуна СД2-85/47-8У3; Потужність 500 кВт; Номінальна частота обертання 750 об/хв; Струм статора 57 А; $\cos\phi$ 0,9; ККД 94,3%; $M_{\max}/M_{\text{ном}}$ 1.7; $M_s/M_{\text{ном}}$ 0.9; $I_k/I_{\text{ном}}$ 5.5; Напряга збудження 38 В; Струм збудження 166 А; маховий момент ротора 224кгм². На вхід схеми подаються сигнали $P_n, n_n, U_n, I_n, \cos\phi_n, \eta_n, \lambda, f_n, J_{\text{дв}}, \lambda_m, \lambda_k, U_f, I_f$, які є паспортними даними. Для виконання обчислень використовуються блоки бібліотеки Simulink/MathOperations, Simulink/Sources, Simulink/User-Defined Functions [119].

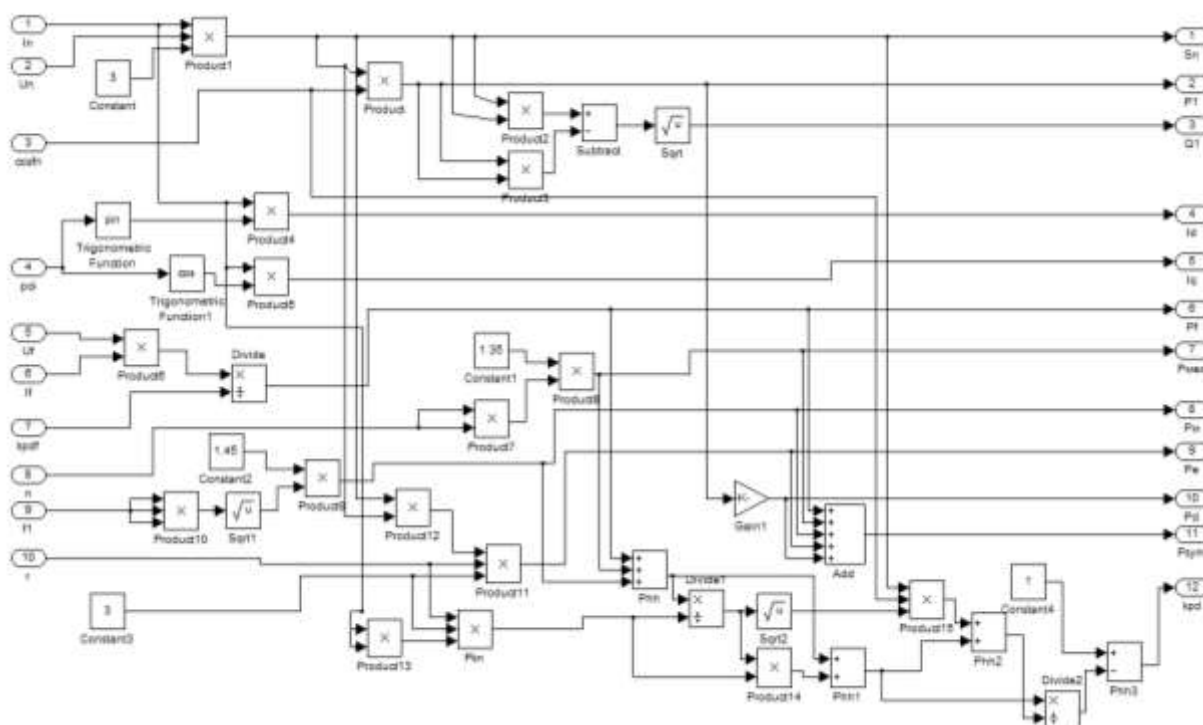


Рис. 3.3. Математична модель в середовищі MATLAB

За допомогою ЕОМ, використовуючи запропоновану методику, побудуємо в середовищі MATLAB робочі характеристики СД промислової серії СД2 у залежності від номінальної потужності та коефіцієнта завантаження за потужністю (рис. 3.4).

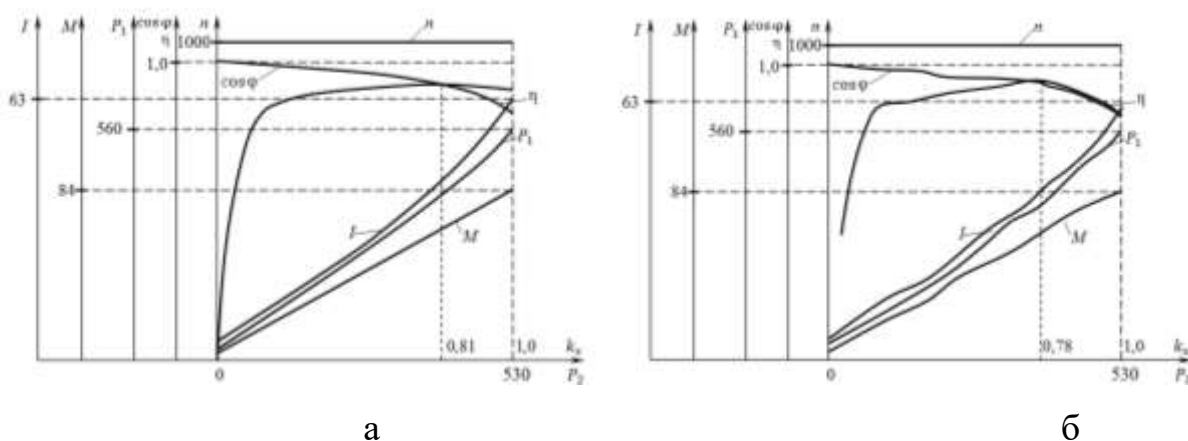


Рис. 3.4. Робочі характеристики двигуна (а) за паспортними даними, отримані експериментально (б)

На основі розробленої моделі створено методику розрахунку за паспортними даними параметрів СД (див. дод. Б.1). Програмне забезпечення для розрахунків параметрів еталонної моделі СД створено в середовищі DELPHI (див. розд. 4.3) [132].

3.2. Дослідження енерговикористання синхронних двигунів за допомогою еталонної моделі

Автором за запропованою моделлю в середовищі MATLAB розраховано енергетичні характеристики СД серії СД2 у залежності від номінальної потужності та коефіцієнта завантаження за потужністю (рис. 3.5, 3.6).

Двигуни значних номінальних потужностей, з великими швидкостями обертання мають вище значення $\cos \varphi_n$ [117]. Коефіцієнт потужності СД є функцією його навантаження. На холостому ході коефіцієнт потужності низький, через значне співвідношення між реактивною та активною потужністю.

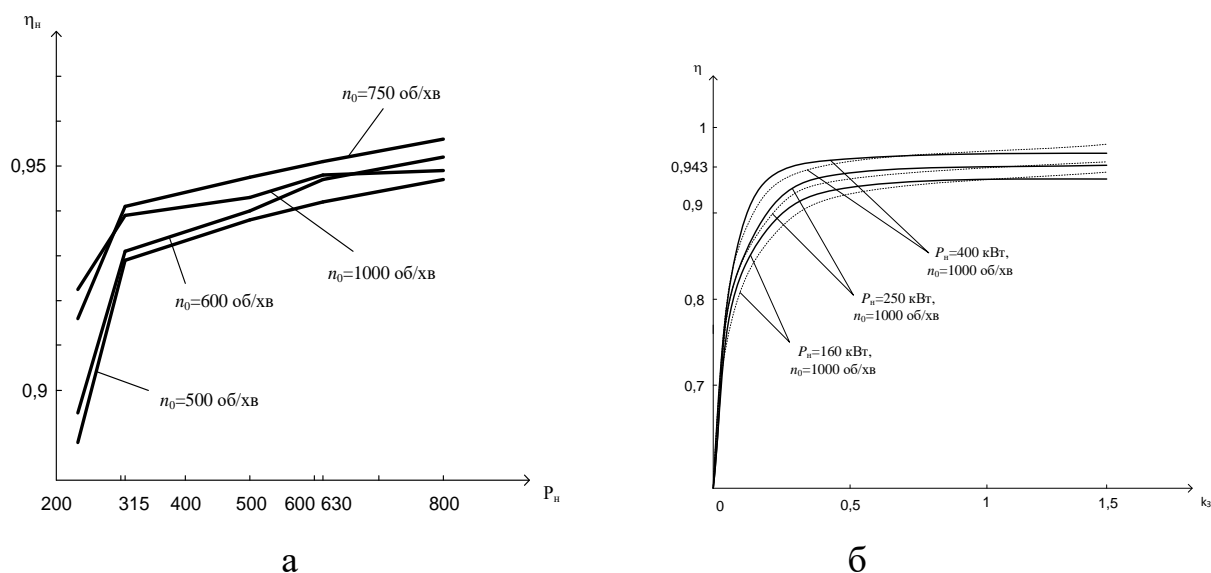


Рис. 3.5 Залежності номінального ККД СД серії СД2 від номінальної потужності та різних частот обертання n_0 (а) і залежності ККД від коефіцієнта завантаження двигуна для трьох значень номінальної потужності (б), розраховані за двома моделями: суцільні лінії - за формулою (3.1), переривчасті - за формулою (3.2)

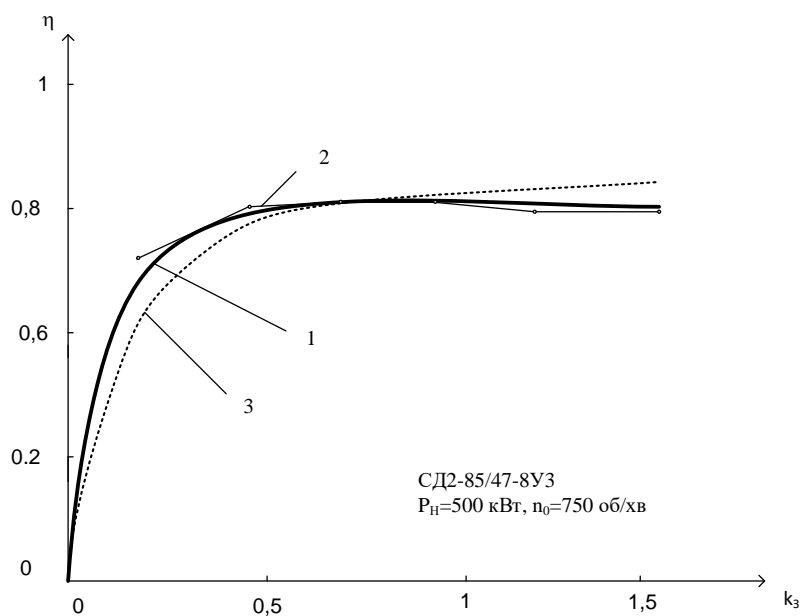


Рис. 3.6 Результати моделювання $\eta(k_3)$ СД типу СД2-85/47-8У3:
 1- за формулою (3.1); 2- за паспортними даними двигуна;
 3 – за формулою (3.2);

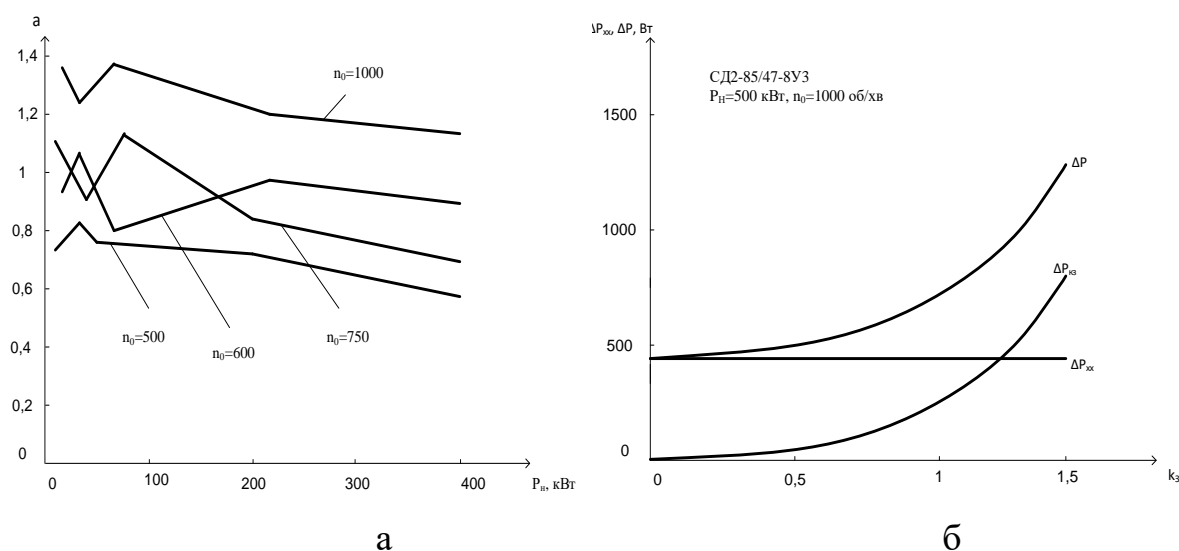


Рис. 3.7 Залежності коефіцієнта втрат СД серії СД2 від номінальної потужності та різних частот обертання n_0 (а) і залежності повних, незмінних і змінних втрат від коефіцієнта завантаження для СД типу СД2-85/47-8У3 (б)

Зростання номінальної потужності призводить до збільшення номінального ККД, оскільки втрати відносно корисної потужності двигуна зменшуються (рис. 3.6,а). За незначних навантажень двигуна його ККД невеликий (рис. 3.5,б). Зі збільшенням навантаження він підвищується, і за потужності двигуна 0,8-0,9 номінальної досягає максимального значення.

Залежності $\eta(k_3)$ СД типу СД2-85/47-8У3 з паспортними даними: $P_H = 500$ кВт, $n_H = 750$ об/хв, $U_H = 6$ кВ, $I_H = 57$ А, $\eta_H = 94,3\%$, $\cos\phi_H = 0,9$ дозволяють здійснити аналітичну перевірку моделей (рис. 3.6-3.7).

Для значень коефіцієнта завантаження поза межами робочого режиму ($k_3 < 0,5$, $k_3 > 1,0$) характер зміни ККД різниться (рис. 3.6). Розрахунок за моделлю (3.1) дозволяє досягти точніших результатів, ніж за формулою (3.2), оскільки вона враховує завантаження СД і співвідношення між незмінними і змінними втратами. Відносне відхилення результатів розрахунків залежностей $\eta(k_3)$ від паспортних даних двигуна не перевищує 4%, що є достатнім для практичного застосування.

Проблеми енергетичного та технічного стану СЕП НУ та якості електроенергії на виробництві мають особливу актуальність і являються одним з важливіших умов економічної та тривалої експлуатації електромеханічних систем. Запропонована діагностична модель для визначення енергетичної ефективності роботи синхронного електропривода ураховує якість напруги живлення.

3.3. Модель діагностування параметрів процесу перетворення електроенергії електромеханічними системами з синхронними двигунами

Для розроблення моделі діагностування параметрів процесів перетворення електроенергії ЕМС з СД (рис. 3.8) зроблено такі припущення: для живлення двигуна застосовується номінальна напруга стандартної частоти, фазні обмотки статора зсунуті між собою в просторі на 120 ел.град, розподіл магнітного поля навколо зазору синусоїдальний, статор і ротор магнітосиметричні.

3.3.1. Модель визначення параметрів процесу енергоспоживання синхронних двигунів

За початку вимірювання діагностичними ознаками приймаємо миттєві значення напруг $u(t)$, струмів $i(t)$.

Для трифазної системи миттєві значення напруг $u(t)$ і струмів $i(t)$ визначаються наступним чином [153]:

$$\begin{aligned} u_A(t) &= U_m \sin(\omega t + 0); \\ u_B(t) &= U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_C(t) &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); \\ i_A(t) &= I_m \sin(\omega t - \varphi_A); \\ i_B(t) &= I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_B\right); \\ i_C(t) &= I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_C\right), \end{aligned}$$

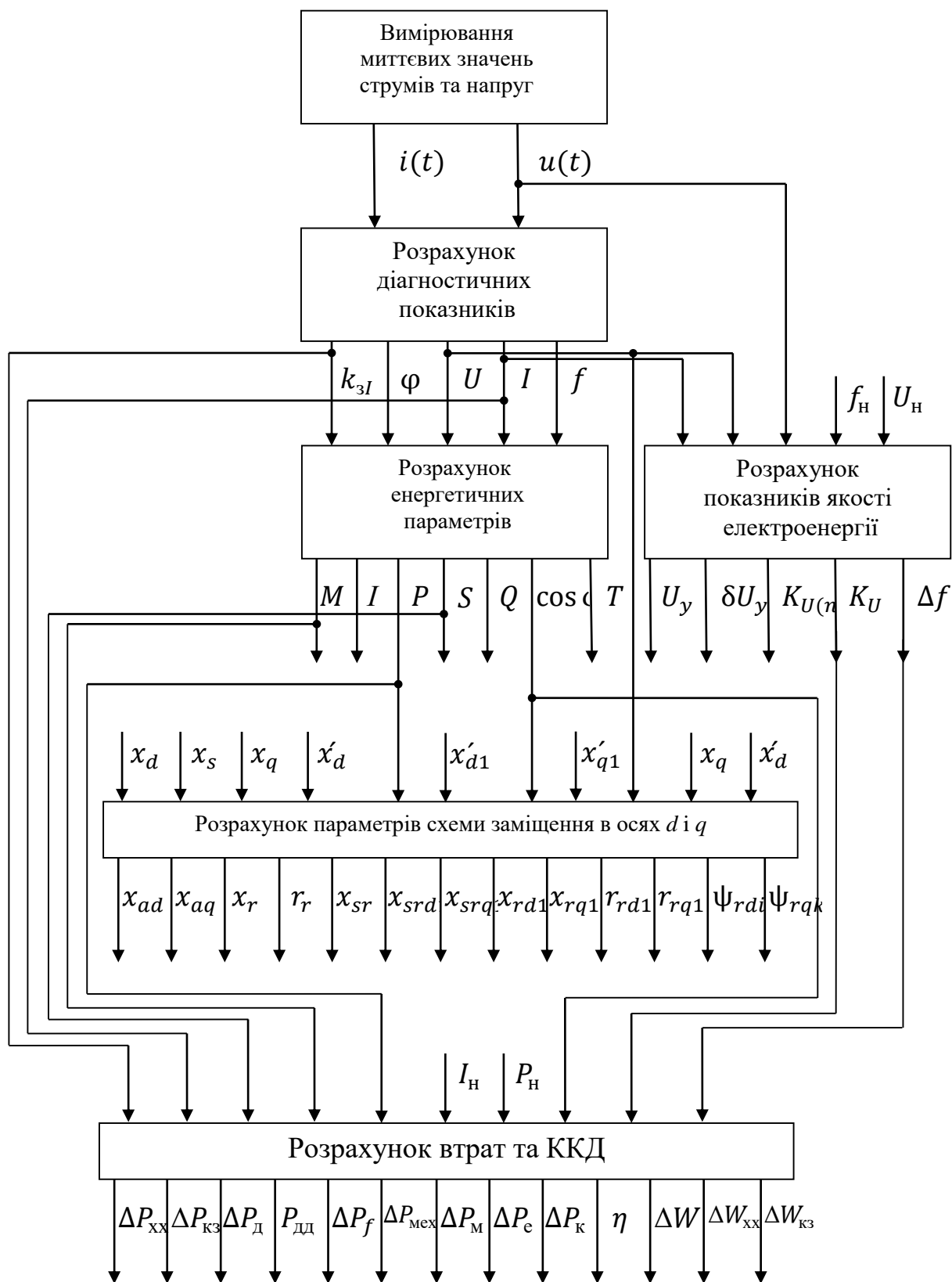


Рис. 3.8. Структурна схема моделі діагностування енергетичного стану синхронного електропривода

де $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, $f = 50$ Гц – частота мережі.

Миттєві значення струму та напруги з урахуванням вищих гармонік

$$u(t) = U_0 + U_{1m} \sin(\alpha t + \psi_{u1}) + U_{2m} \sin(2\alpha t + \psi_{u2}) + \dots \\ + U_{km} \sin(k\alpha t + \psi_{ku})$$

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\alpha t + \psi_{i1}) + I_{2m} \sin(2\alpha t + \psi_{i2}) + \dots + I_{km} \sin(k\alpha t + \psi_{ki})$$

$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$ – стала складова або нульова гармоніка.

Напруга для k -ї гармоніки

$$u_{ak} = U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \\ u_{bk} = U_{km} \sin\left(k\omega t + \psi_k - \frac{2\pi}{3}k\right) \\ u_{ck} = U_{km} \sin\left(k\omega t + \psi_k + \frac{2\pi}{3}k\right)$$

Формуємо діагностичні ознаки.

Визначаємо частоту f .

Діюче значення (середньоквадратичне) напруги і струму [113]

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}.$$

Діюче значення напруг U_A, U_B, U_C і струми I_A, I_B, I_C для гармонічних коливань

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \approx 0,707 U_m, \quad I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m \approx 0,707 I_m,$$

де $U_m = \max(u(t))$, $I_m = \max(i(t))$ амплітудне значення напруги і струму відповідно.

Діюче значення напруги і струму з урахуванням вищих гармонік [115]

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2}, \quad I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}.$$

Середні значення діючих напруг і струмів СД

$$U_\phi = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}; \quad U = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}; \quad I = \frac{I_A + I_B + I_C}{3},$$

де U_ϕ - фазна напруга; U, I - міжфазні напруга і струм відповідно.

Визначаємо коефіцієнт завантаження за струмом двигуна [115]

$$k_{3I} = \frac{I}{I_H}.$$

Визначаються показники якості електричної енергії (ДСТУ EN 50160). Вимірюється усталене відхилення напруги δU_y . Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, вимірюють діюче значення кожної міжфазної напруги основної частоти $U_{(1)i}$ за формулою [153]

$$U_{(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left(\left(\sqrt{3} U_{ABi} + \sqrt{4 U_{BCi}^2 - \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2}{U_{ABi}} + U_{ABi} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BCi}^2 - U_{CAi}^2}{U_{ABi}} \right)^2 \right)},$$

де $U_{ABi}, U_{BCi}, U_{CAi}$, — діюче значення міжфазних напруг основної частоти в i -ому спостереженні.

Для спрощення дозволяється визначати $U_{(1)i}$ за наближеним виразом

$$U_{(1)i} = \frac{1}{3} (U_{ABi} + U_{BCi} + U_{CAi}).$$

Обчислюють значення усередненої напруги U_y як результат усереднення N спостережень напруг $U_{(1)i}$ за інтервал часу 1 хв за формулою [122]

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}},$$

де U_i — значення напруги $U_{(1)i}$ в i -ому спостереженні (число спостережень за 1 хвилину не більше 18) [114].

Обчислюється значення усталеного відхилення напруги δU_y у відсотках за формулою

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_n}{U_n} \cdot 100,$$

де U_n — номінальна міжфазна напруга.

Несинусоїдальність напруги. Вимірювання коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги $K_{(n)i}$ здійснюють для міжфазних (фазних) напруг. Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, визначають діюче значення напруги n -ої гармоніки $U_{(n)i}$.

Вираховується значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)i}$ в відсотках як результат i -го спостереження за формулою [127]

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{1(i)}} \cdot 100.$$

де $U_{1(i)}$ — діюче значення напруги основної частоти на i -ому спостереженні.

Допускається обчислювати даний показник за формулою

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_n} \cdot 100.$$

Вираховується значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$ у відсотках як результат усереднення N спостережень $K_{U(n)i}$ в інтервалі часу $T_{vs}=3c$ за формулою [128]

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}},$$

де $N \geq 9$.

Вимірювання коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U здійснюють для міжфазних напруг. Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, визначають діючі значення гармонічних складових напруги в діапазоні гармонік від 2-ї до 40-ї. Обчислюють значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_{Ui} у відсотках, як результат i -го спостереження, за формулою:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100,$$

де $U_{(1)i}$ — діюче значення міжфазної напруги основної частоти для i -го спостереження.

Допускається обчислювати цей показник за формулою [127]:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_n} \cdot 100.$$

Вираховується значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U у відсотках як результат усереднення N спостережень K_{Ui} на інтервалі часу T_{vs} , який дорівнює 3 с, за формулою

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}},$$

де $N \geq 9$.

Вимірювання відхилень частоти Δf здійснюються наступним чином.

Для кожного i -го спостереження за установлений період часу вимірюють дійсне значення частоти f_i в Гц.. Обчислюють усереднене значення частоти f_y в Гц, як результат усереднення N спостережень f_i на інтервалі часу тривалістю 24 с, за формулою [126]:

$$f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N},$$

де $N \geq 15$.

Вираховують значення відхилення частоти Δf в герцах за формулою

$$\Delta f = f_y - f_n,$$

де f_n — номінальне значення частоти, Гц.

Визначаються діагностичні параметри енергетичного стану – параметри процесу енергоспоживання.

Визначається кут зсуву φ в кожній фазі двигуна. При роботі електропривода в усталеному режимі з постійним або повільно змінюваним навантаженням середнє значення коефіцієнта потужності визначається за формулою [115]:

$$\cos\varphi = \frac{\cos\varphi_A + \cos\varphi_B + \cos\varphi_C}{3} = \frac{P}{S}.$$

Якщо електродвигун має циклічний ГМН різними навантаженнями, то він як споживач реактивної енергії характеризується середньозваженим або

цикловим коефіцієнтом навантаження, який визначається відношенням використаної активної енергії за цикл W_a до повної енергії W_n в відповідності з формулою [153]:

$$\cos\varphi = \frac{W_a}{W_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n S_i t_i},$$

Миттєва потужність, обумовлена добутком миттєвих напруг і струму на вході електромеханічного перетворювача, дорівнює швидкості надходження електромагнітної енергії в перетворювач у даний момент і змінюється протягом періоду змінного струму і за величиною, і за знаком. Якщо миттєва потужність позитивна, то енергія надходить у перетворювач, якщо негативна – повертається джерелу. Можливість повернення енергії джерелу обумовлена тим, що з електричним колом пов'язане електромагнітне поле, що запасає її протягом однієї частини періоду змінного струму і повертає протягом іншої частини періоду.

Активна потужність (середнє за період значення миттєвої потужності) [113]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt;$$

$$p_a = u_a i_a = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = UI(\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi));$$

$$p_b = u_b i_b = U_m I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) =$$

$$= UI\left(\cos \varphi - \cos\left(2\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right)\right);$$

$$p_c = u_c i_c = U_m I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) =$$

$$= UI\left(\cos \varphi - \cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right)\right).$$

Активна потужність, яка споживається складним колом, дорівнює сумі активних потужностей окремих елементів цього кола.

Споживані потужності в кожній фазі двигуна:

- повна S

$$S_A = U_{\Phi A} I_A, S_B = U_{\Phi B} I_B, S_C = U_{\Phi C} I_C;$$

- активна P

$$P_A = U_{\Phi A} I_A \cos \varphi_A = S_A \cos \varphi_A,$$

$$P_B = U_{\Phi B} I_B \cos \varphi_B = S_B \cos \varphi_B,$$

$$P_C = U_{\Phi C} I_C \cos \varphi_C = S_C \cos \varphi_C;$$

- реактивна Q

$$Q_A = U_{\Phi A} I_A \sin \varphi_A = S_A \sin \varphi_A,$$

$$Q_B = U_{\Phi B} I_B \sin \varphi_B = S_B \sin \varphi_B,$$

$$Q_C = U_{\Phi C} I_C \sin \varphi_C = S_C \sin \varphi_C.$$

Споживані повна S , активна P та реактивна Q потужності двигуна [153]

$$S = S_A + S_B + S_C = 3U_{\Phi} I = \sqrt{3}UI;$$

$$P = P_A + P_B + P_C = 3U_{\Phi} I \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi;$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 3U_{\Phi} I \sin \varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi.$$

Моделі визначення параметрів процесу енергоспоживання в середовищі MATLAB Simulink наведено на рис.3.9.

Потужність спотворень обумовлена протіканням гармонік струму, що не збігаються за частотою з напругою мережі. Середнє арифметичне миттєвої

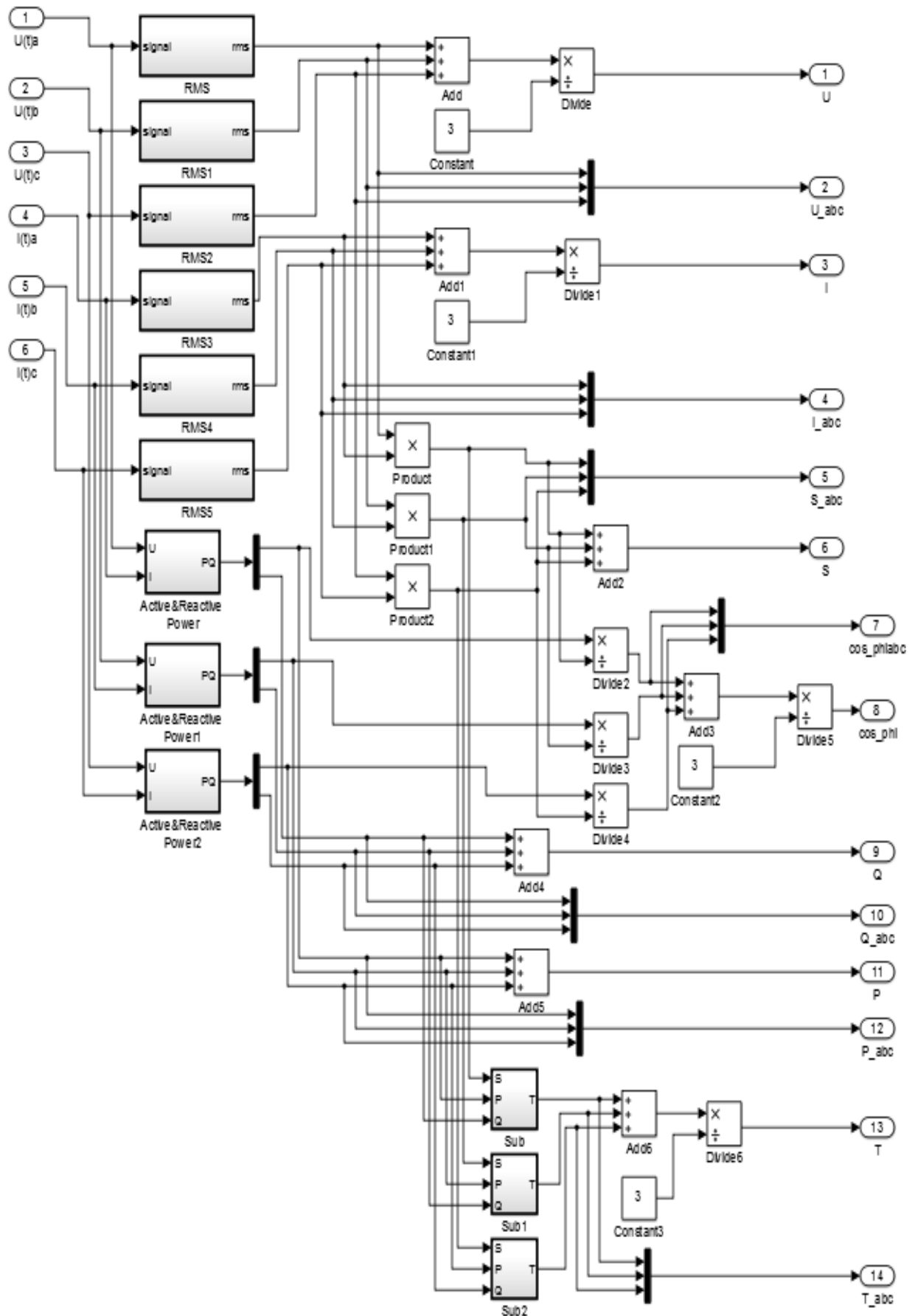


Рис. 3.9 Модель визначення параметрів процесу енергоспоживання СД

потужності, зв'язаної з цими гармоніками, за період також дорівнює нулю, однак і вони викликають додаткові втрати енергії в мережі.

Потужність спотворення [153] (визначається перемноженням дійсних значень різнопорядкових гармонічних струму і напруги) кожної фази і середньої двигуна

$$T_A = \sqrt{S_A^2 - P_A^2 - Q_A^2};$$

$$T_B = \sqrt{S_B^2 - P_B^2 - Q_B^2};$$

$$T_C = \sqrt{S_C^2 - P_C^2 - Q_C^2}.$$

Середня потужність спотворення двигуна

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}.$$

3.3.2. Моделі визначення параметрів схеми заміщення та енерговикористання синхронних двигунів

Визначення параметрів схеми заміщення для СД, яка представлена в осях d і q (рис. 3.2) процесу енерговикористання СД виконується аналогічно пункту 3.1.

Модель визначення параметрів схеми заміщення СД в середовищі MATLAB Simulink наведено на рис. 3.10.

Коефіцієнт погіршення потужності через несиметрію напруги, у відносних одиницях [114]

$$k_{\Pi} = \frac{100 - k_{2U}^2}{100}.$$

Постійні втрати потужності не залежать від навантаження і містять у собі втрати: у сталі статора і ротора $\Delta P_{\text{ст}}$; механічні від тертя в підшипниках і

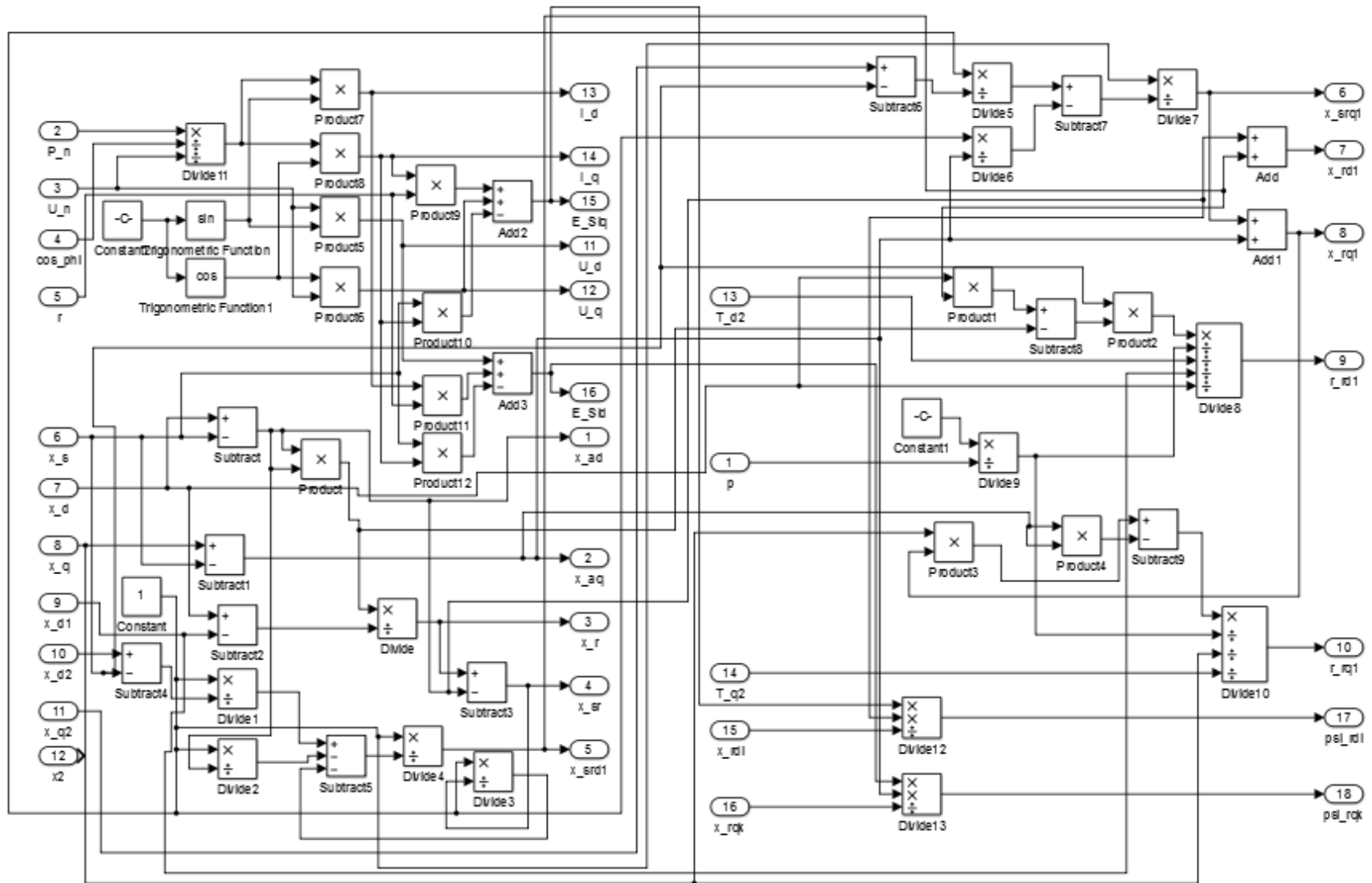


Рис. 3.10 Модель визначення параметрів схеми заміщення СД

вентиляційні $\Delta P_{\text{мех}} = 0,01P_{\text{н}}$; збудження - у міді обмотки статора від протікання струму збудження I_f .

Коефіцієнт погіршення потужності через несиметрію напруги, у відносних одиницях визначається за формулою [129]:

$$k_{\Pi} = \frac{100 - k_{2U}^2}{100}.$$

Номінальна потужність з урахуванням несиметрії напруги

$$P_{\text{н}}' = P_{\text{н}} k_{\Pi}.$$

Коефіцієнт завантаження СД за потужністю.

$$k_{\text{зп}} = \frac{P}{P_{\text{н}}'} = \frac{P}{P_{\text{н}} k_{\Pi}}.$$

Втрати енергії за час циклу $T_{\text{ц}}$ зможуть бути визначені за допомогою наступної формули [153]

$$\Delta W = \int_0^{T_{\text{ц}}} \Delta P dt = \int_0^{T_{\text{ц}}} \Delta P_{\text{xx}} dt + \int_0^{T_{\text{ц}}} \Delta P_{\text{кз}} dt = \Delta W_{\text{xx}} + \Delta W_{\text{кз}},$$

де $\Delta W_{\text{xx}}, \Delta W_{\text{кз}}$ — втрати енергії, обумовленні відповідно постійним і змінними втратами потужності.

Модель визначення параметрів процесу енерговикористання енергії, що споживається в середовищі MATLAB Simulink наведено на рис. 3.11.

При роботі двигуна з циклічним навантаженням втрати енергії

$$\Delta W = \int_0^{T_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i,$$

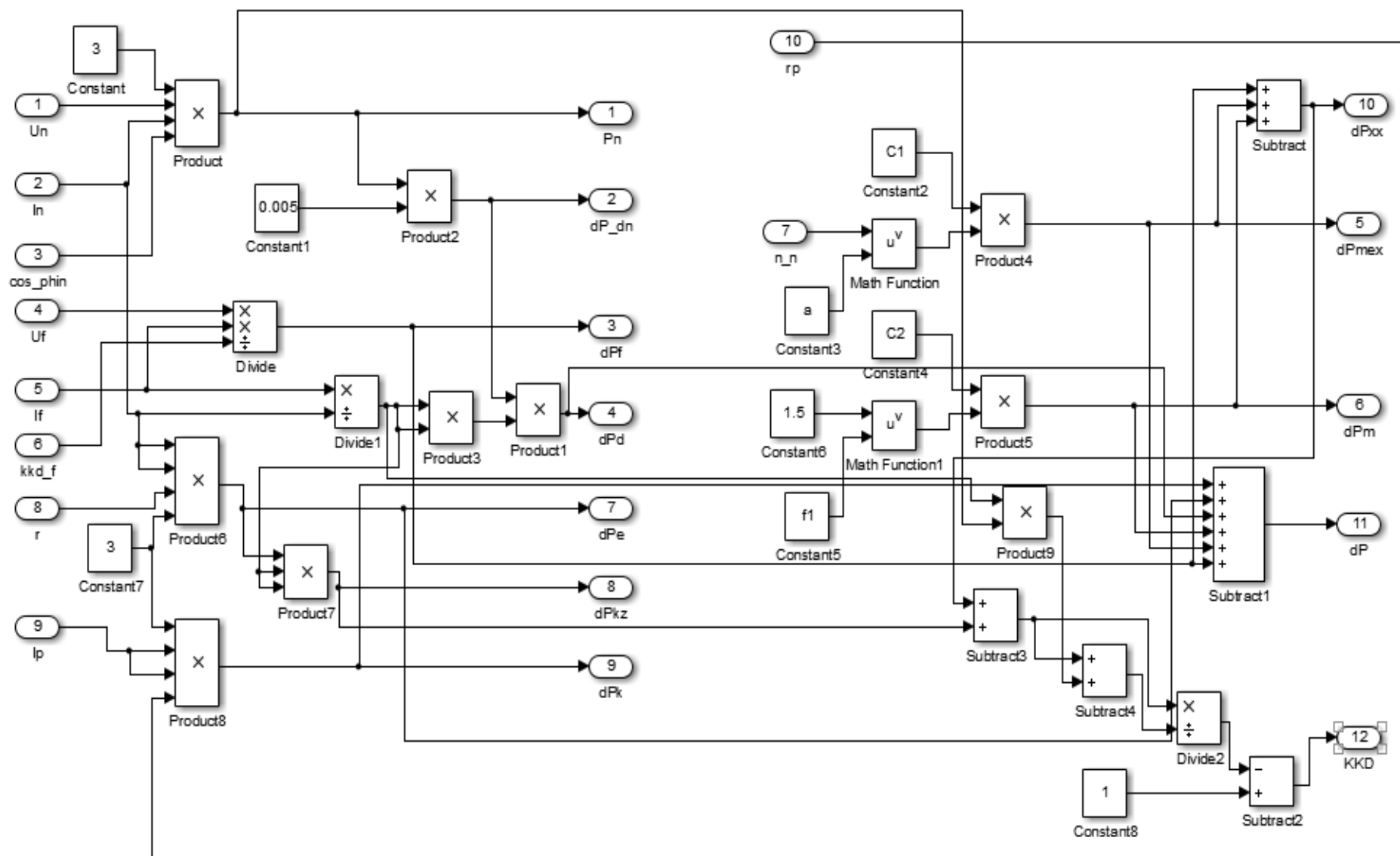


Рис. 3.11 Модель визначення параметрів процесу енерговикористання СД

де $\Delta P_i, t_i$ – втрати потужності і час роботи при навантаженні $K_{3I} = \frac{I_i}{I_H}$; n – число значень навантаження на окремих ділянках; $\sum_{i=1}^n t_i = T_{\text{ц}}$ – час циклу.

Енергія споживання з мережі за час циклу виробничого механізму

$$W = \int_0^{T_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt .$$

3.4. Перевірка на адекватність моделі діагностування енергетичного стану насосних установок з синхронними двигунами

Модель діагностування енергетичного стану СЕП НУ у середовищі MATLAB Simulink (рис. 3.12) заснована на ієрархічній структурі, та містить моделі нижчого рівня: моделі СД; ЕМД – еталонна модель двигуна; МДЕ – моделі діагностування параметрів процесів перетворення електроенергії (рис. 3.8). МДЕ – модель складається з МДЕ1 – моделі визначення параметрів процесу енергоспоживання, МДЕ2 – моделі визначення параметрів схеми заміщення та МДЕ3 – моделі визначення параметрів процесу енерговикористання енергії, що споживається.

Найпоширеніша для дослідження і моделювання синхронного двигуна модель представлена в осях d і q [158]. Моделі $x - y, d - q$ синхронізовані зі швидкістю поля статора застосовуються у разі живлення двигуна синусоїдальною напругою:

$$u_d = r i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q;$$

$$u_q = r i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d;$$

$$0 = r_{d1} i_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt};$$

$$0 = r_{q1} i_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt};$$

$$u_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt};$$

$$\psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{d1};$$

$$\psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{q1};$$

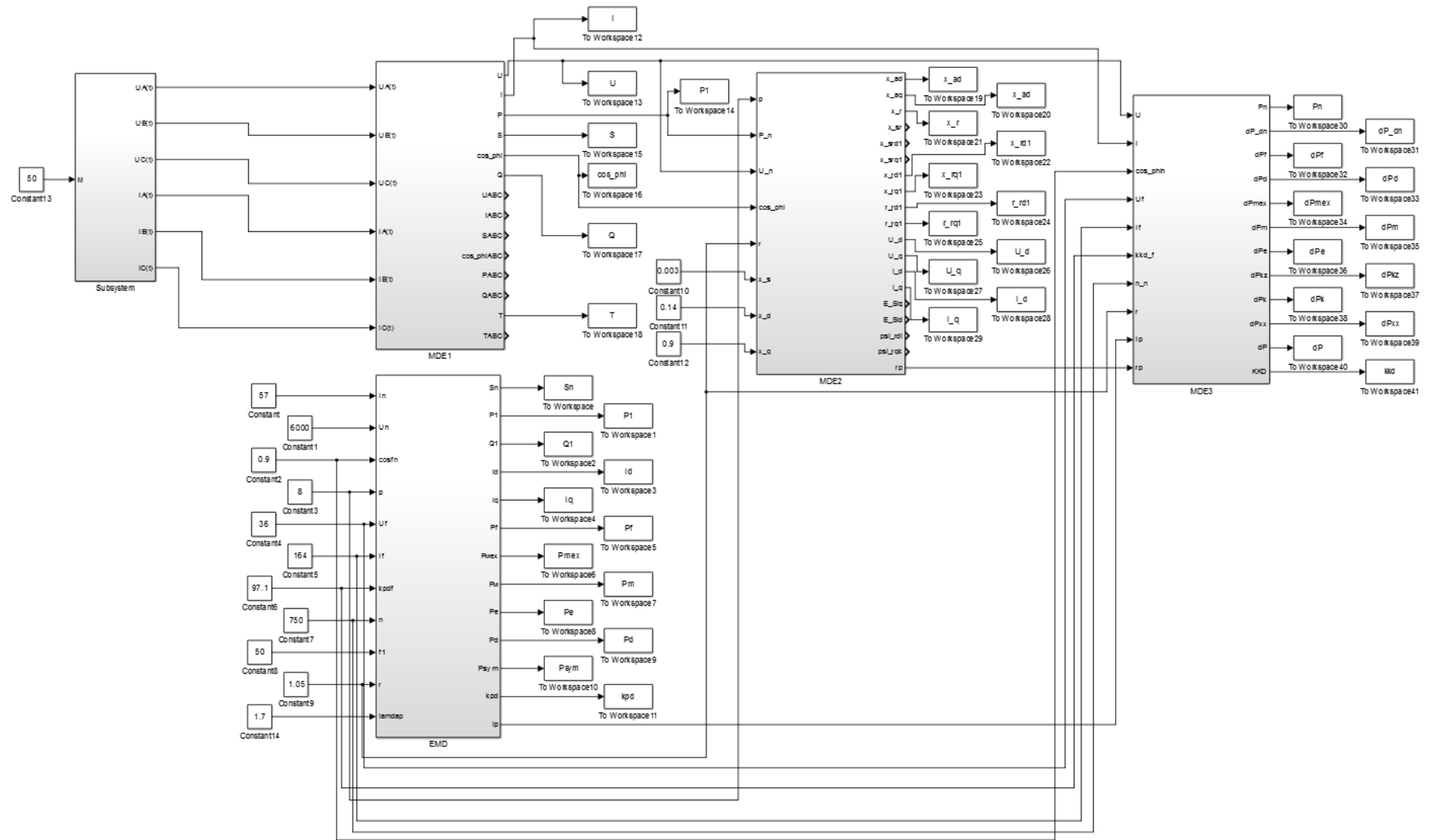


Рис. 3.12 Модель діагностування енергетичного стану СЕП НУ

$$\psi_{d1} = x_{ad}i_d + x_f i_f + x_{d1}i_{d1};$$

$$\psi_{q1} = x_{aq}i_q + x_{q1}i_{q1};$$

$$\psi_f = x_{ad}i_d + x_f i_f + x_f i_{d1};$$

$$M = -\frac{3}{2}p(i_d\psi_q + i_q\psi_d);$$

$$M - M_C = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt},$$

де $I_1, \psi_0, \psi_1, \psi_2, U$ - проекції узагальненого вектора струму статора, головного потокозчеплення, потокозчеплення статора і ротора, напруги статора на осі $q - d$; k_s – коефіцієнт магнітного зв'язку статора; k_r – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора; $(1 - k_s k_r)L_1 = L'_1$ і $(1 - k_s k_r)L_2 = L'_2$ - перехідні індуктивності статора й ротора.

Експериментальний метод перевірки моделі діагностування СД потребує стендових випробувань короткого замикання, холостого ходу тощо для визначення параметрів схеми заміщення, а також великої кількості додаткових розрахунків, що призводить до значних витрат часу. Також він має значну похибку (до 20 %). Крім того він не завжди гарантує потрібну вірогідність результатів[22, 23, 30].

Метою перевірки адекватності моделі діагностування НУ з СД є встановлення її відповідності експериментальним даним виробника або паспортним даним двигуна, які характеризують його номінальний режим.

Перевірка моделі виконана на електродвигуні серії СД2 основного виконання, типу СД2-85/47-8У3. Приймаємо, що двигун під'єднаний до мережі з номінальною напругою номінальної частоти рис 3.13.

Відносна похибка визначення номінальних даних СД не перевищує 0,7% (I_N) і параметрів схеми заміщення – 4,5% (r_1) відносно паспортних даних, а параметрів енергоспоживання - 0,8% і енерговикористання - 7% відносно розрахункових даних моделі ЕМД.

Порівняння даних рис. 3.14 показує, що моделі дозволяють з достатньою для практики точністю розрахувати узагальнені діагностичні параметри - ККД СД в залежності від завантаження. Максимальне значення відносної похибки

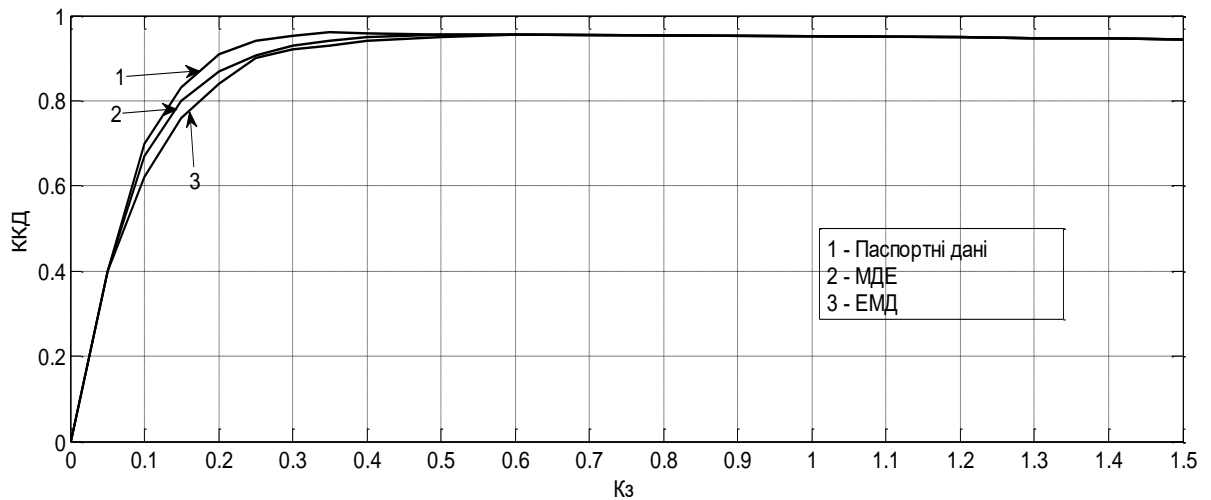


Рис. 3.13 Результати моделювання СД типу СД2-85/47-8УЗ: залежності ККД в функції завантаження СД

визначення ККД – 2% для ЕМД і 3,5% для МДЕ, а коефіцієнта потужності – 3,4% та 5,7% відповідно. Відносна похибка розрахунку параметрів і характеристик СД не перевищує 7%. Цього достатньо для інженерної практики.

З використанням моделі запропоновано методику, та створено програму в середовищі DELPHI, для діагностування НУ з СД (див. дод.), які дозволяють визначити технічний та енергетичний стан системи за результатами вимірювань струмів і напруг [69, 124, 129].

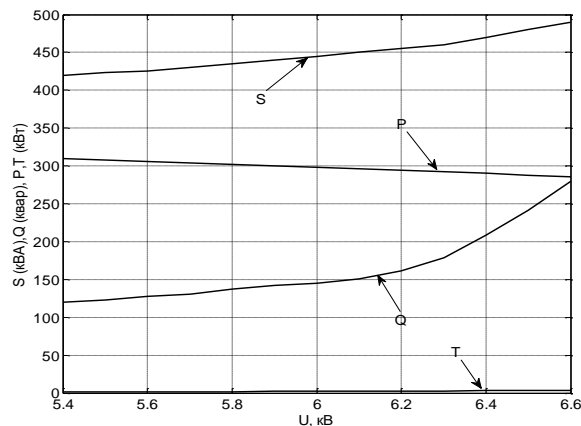
3.5. Дослідження енергетичних характеристик синхронних двигунів з урахуванням впливу зниження якості напруги живлення

Струм двигуна зі зниженням напруги на 10% зростає на 12%. Прискорюється старіння ізоляції, через її перегрівання, оскільки зростають нагріваючі втрати. Наслідком цього є зростання збитків від скорочення терміну служби СД [133].

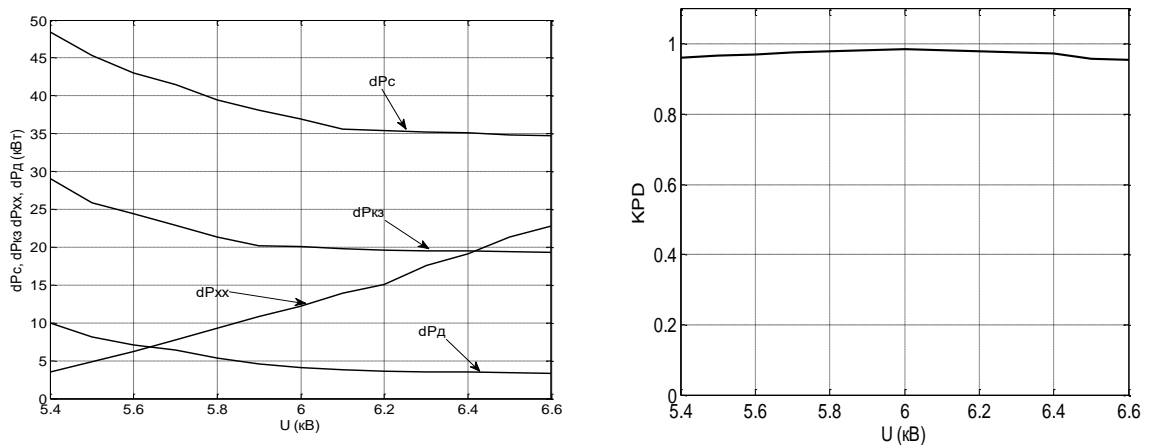
Зростання напруги на двигуні збільшує споживання реактивної потужності і знижує коефіцієнт потужності. Це негативно впливає на енергетичну

ефективність НУ. Кожний відсоток підвищення напруги збільшує споживання реактивної потужності на 1,8% за рахунок зростання струму намагнічування.

Нормально і гранично припустиме усталене відхилення напруги $\delta U_y = \pm 5\%$ і граничне $\pm 10\%$ номінальної напруги мережі встановлюється ДСТУ EN 50160:2014. У разі зниження напруги двигуна на 10% відносно номінальної реактивна потужність зменжується на 12% (рис. 3.14).



а



б

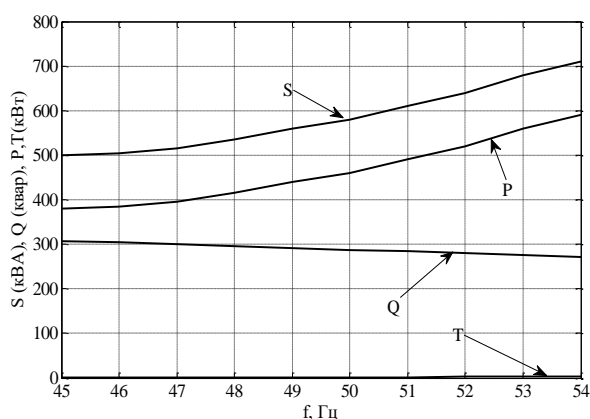
Рис. 3.14 Залежності параметрів СД від відхилення напруги для номінального навантаження: а - процесу енергоспоживання (P, Q, S, T);

б - процесу енерговикористання $\Delta P_{\Sigma} = dP_c$, $\Delta P_{кз} = dP_{кз}$, $\Delta P_{xx} = dP_{xx}$,
 $\Delta P_{д} = dP_{д}, \eta$)

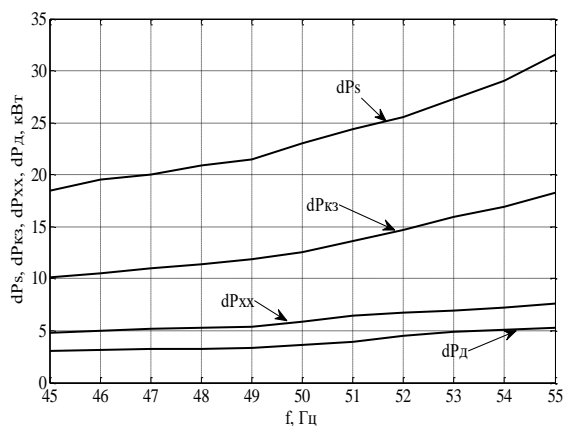
Зростання напруги покращує параметри процесу енерговикористання. Так зростання напруги на 10% зменшує струм на 6%, також зменшується втрати від

нагріву та збільшується ККД. Отже для двигуна більш небезпечними є негативні відхилення напруги, оскільки вони викликають більше його нагрівання.

ДСТУ EN 50160:2014 встановлює нормально і гранично припустимі відхилення частоти Δf , які становлять $\pm 0,2$ і $\pm 0,4$ Гц. Відхилення частоти може спричинити зміна балансу активної потужності. У разі зниження частоти живлення двигуна відносно номінальної на 5% за номінальних напруг і навантаження збільшується на 2,7% реактивна потужність, що споживається, а отже знижується коефіцієнт потужності (рис. 3.15) [120].



а



б

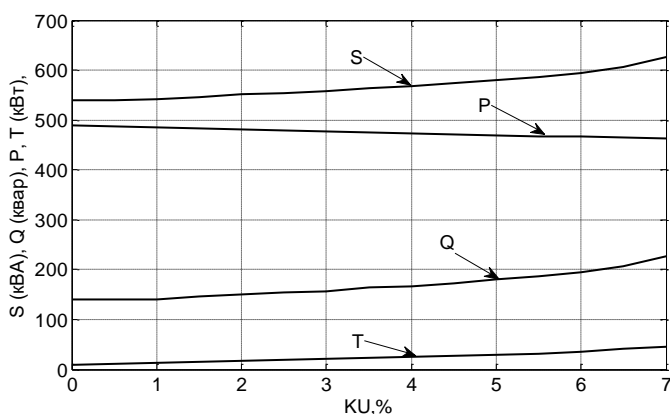
б

б

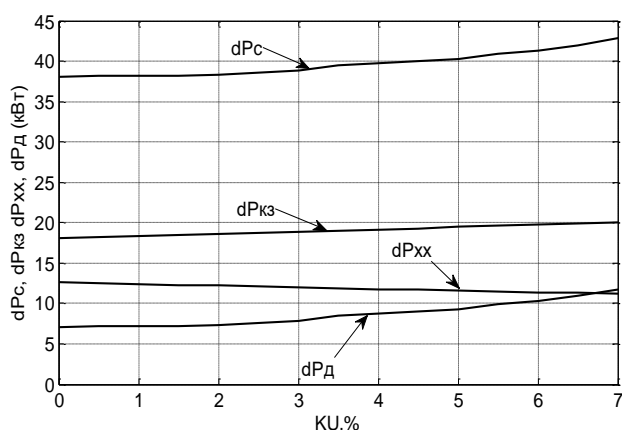
Рис. 3.15 Залежності параметрів СД від відхилення частоти мережі для номінальних завантаження і напруги: а - процесу енергоспоживання (P, Q, S, T); б - процесу енерговикористання ($\Delta P_{\Sigma} = dP_{\Sigma}$, $\Delta P_{кз} = dP_{кз}$, $\Delta P_{xx} = dP_{xx}$, $\Delta P_{д} = dP_{д}$, η)

У разі зростання частоти зростають постійні втрати (в сталі – за рахунок збільшення частоти, механічні - через збільшення швидкості двигуна), змінні - за рахунок зростання струму, а також втрати на гістерезис і вихрові струми. Це призводить до зменшення ККД на 0,8%.

ДСТУ EN 50160:2014 встановлює нормально і гранично допустиме значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U для мережі 6 кВ 8% і 12%. Збільшенням коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U збільшує повну потужність через появу потужності спотворення (рис. 3.16). Коефіцієнт потужності знижується. У випадку $K_U = 7\%$ потужність спотворення дорівнює 53,7кВт, тобто 12% від активної, а коефіцієнт потужності знижується більше ніж на 8% [111].



а



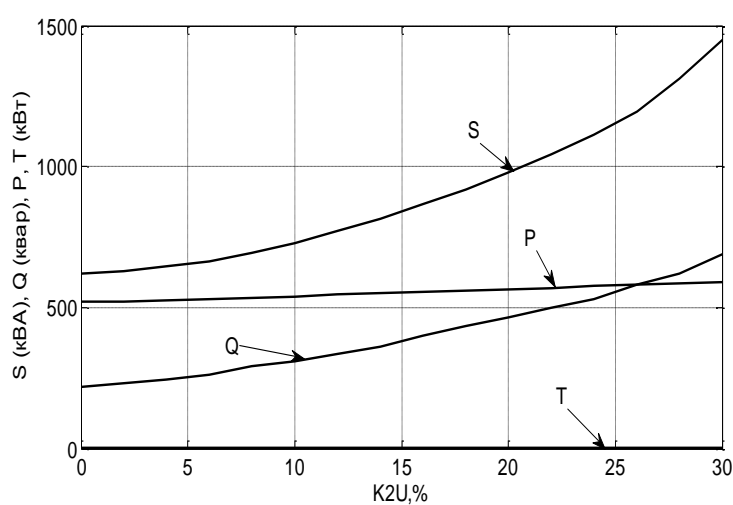
б

Рис. 3.16 Залежності параметрів СД від несинусоїдальності напруги:

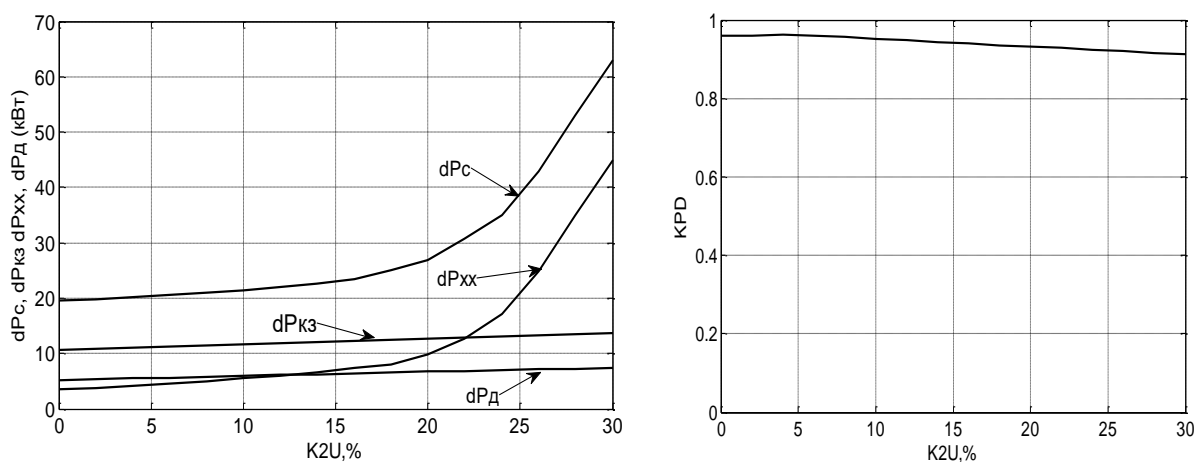
а - процесу енергоспоживання (P, Q, S, T); б - процесу енерговикористання

$$\Delta P_{\Sigma} = dP_c, \Delta P_{кз} = dP_{кз}, \Delta P_{xx} = dP_{xx}, \Delta P_d = dP_d, \eta$$

Через збільшення додаткових втрат спричинених несинусоїдальністю напруги зростають сумарні втрати. Найбільше значення втрат спостерігається на частотах вищих гармонік низьких порядків, головним чином третього, п'ятого і сьомого. Перевищення допустимих значень коефіцієнтів 4 і 7 гармонік призводить до погіршення механічної характеристики СД [16]. Якщо амплітуди 5-ї і 7-ї гармонік напруги складають відповідно 20 і 15% амплітуди 1-ї гармоніки, коефіцієнт потужності двигуна зменшується на 2,9%.



а



б

Рис. 3.17 Залежності параметрів СД від несиметрії напруги: а - процесу енергоспоживання (P, Q, S, T); б - процесу енерговикористання $\Delta P_{\Sigma} = dP_c$,

$$\Delta P_{к3} = dP_{к3}, \Delta P_{xx} = dP_{xx}, \Delta P_d = dP_d, \eta$$

3.6. Дослідження енергетичних характеристик синхронних двигунів з урахуванням впливу механічного навантаження

З використаннями розробленої моделі діагностування в середовищі MATLAB побудовано енергетичні характеристики СД типу СД2-85/47-8У3 ($P_H = 500$ кВт, $n_H = 750$ об/хв, $U_H = 6$ кВ, $I_H = 57$ А, $\eta_H = 94,3\%$, $\cos\varphi_H = 0,9$) у залежності від зміни величини коефіцієнта завантаження (рис. 3.18) [117]. У процесі математичного моделювання значення напруг та струмів формувалися як реальні сигнали від вимірювального пристрою.

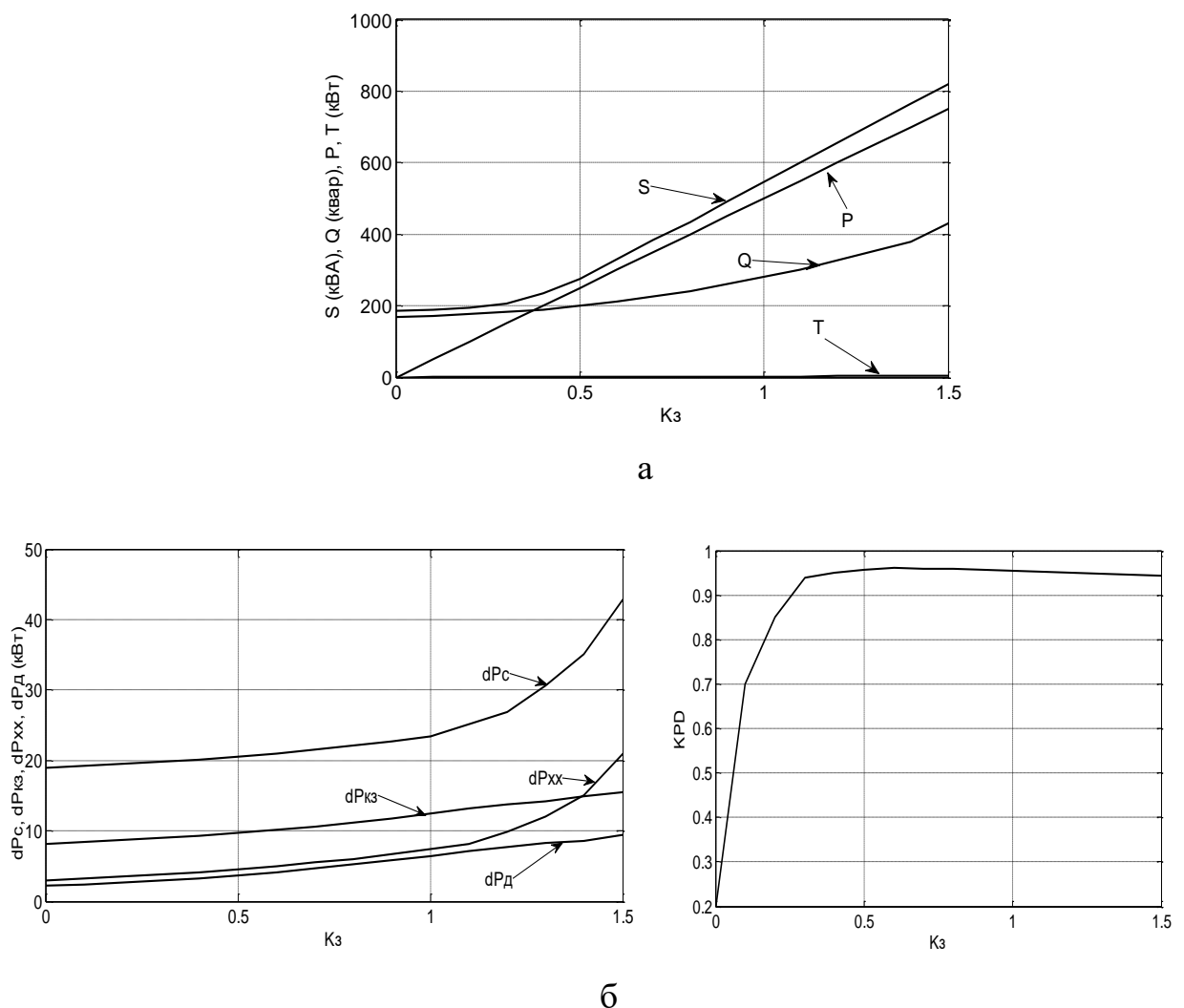


Рис. 3.18 Залежності параметрів СД від коефіцієнта завантаження:

а - процесу енергоспоживання (P, Q, S, T); б - процесу енерговикористання

$$\Delta P_{\Sigma} = dP_c, \Delta P_{kz} = dP_{kz}, \Delta P_{xx} = dP_{xx}, \Delta P_d = dP_d, \eta$$

Величина коефіцієнта завантаження змінювалась у бік збільшення (рис. 3.18). Пропорційне зростання активної і повної потужності є характерним за незначного збільшення реактивної. Незначне зростання коефіцієнта потужності спостерігається в діапазоні $k_3 > 1$. Повні втрати зростають через збільшення змінних та доданих. Низькі значення коефіцієнта завантаження зменшують ККД двигуна на 5...7%.

3.7. Таксонометричний показник оцінювання енергетичного та технічного стану синхронного електроприводу насосних установок

В основу таксонометричного методу закладено вибір еталону та порівняння оптимальних параметрів його вектора із відповідними параметрами векторів всіх інших об'єктів дослідження (визначення евклідових відстаней, за якими і відбувається ранжування об'єктів: найменша відстань відповідає найвищому місцю об'єкта). Принципова відмінність даної методики від інших, що використовуються для оцінки стану об'єкта, полягає у поданні всіх статистичних даних за обраними критеріями (показниками) у вигляді матриці, де окремий рядок є вектором конкретного об'єкта, координатами якого є значення критеріїв (показників).

Математична постановка задачі. Метод включає у себе декілька етапів [3, 10, 11]. Основним з них є етап нормування показників, що розглядаються, у зв'язку із тим, що вони можуть мати різну природу та незрівняні між собою значення. Показники, у свою чергу, складають матрицю P (i -й вектор-стовпець елементів матриці P – список значень однорідного i -го показника (число показників n) для кожного з b -об'єктів, а s -й вектор-рядок елементів – список різнорідних значень показників для s -го об'єкта ($i = \overline{1, n}$; $s = \overline{1, b}$). На даному етапі нормалізація відбувається за наступними формулами:

$$P'_{s,i} = \frac{p_{s,i} - \bar{p}_i}{\sigma_i},$$

$$\bar{p}_i = \frac{1}{b} \sum_{s=1}^b p_{s,i}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{b} \sum_{s=1}^b p_{s,i}^2 - \bar{p}_i^2}$$

де $P'_{s,i}$ – матриця нормалізованих значень показників ($s \ 1, b ; i \ 1, n$); $p_{s,i}$ – елементи матриці P ; \bar{p}_i – середнє значення i -го показника для всієї сукупності об'єктів; σ_i – середнє квадратичне відхилення i -го показника.

Другим важливим етапом є формування «еталонного» об'єкта [10, 11]. Для формування «еталонного» об'єкта, з яким будуть порівнюватися всі інші, визначаються оптимальні значення нормалізованих i -х показників за всіма об'єктами. Вибираються, відповідно, максимальні значення впливу на результативну ознаку [10, 11]. Обрані оптимальні значення формують матрицю-рядок:

$$Pet_i = [\max p_{s,1} \ \max p_{s,2} \ \dots \ \max p_{s,n}],$$

де $\max p_{s,1}$ – визначення максимального нормалізованого значення i -го показника на результативну ознаку.

У роботі [11] також пропонується розраховувати нормалізовані показники «еталонного» об'єкта шляхом коригування визначеного оптимального значення i -го нормалізованого показника на величину середньоквадратичного відхилення:

$$P'et_i = Pet_i + \sigma_i,$$

де Pet_i – матриця нормалізованих значень показників «еталонного» об'єкта

Наступним етапом методу є зіставлення значень i -х показників всіх досліджуваних об'єктів з їх «еталонними» значеннями. На цьому етапі розраховуються відстані D_s між s -м об'єктом та «еталонним», використовуючи наступний вираз:

$$D_s = \sqrt{\sum_{i=1}^b p'_{s,i} - p'_{et_i}}^2$$

На основі визначених на цьому етапі відстаней D_s вже можна зробити висновок про те, який об'єкт кращий, тобто здійснити рейтингування досліджуваних об'єктів. Як зазначалося вище, використовуватимемо матрицю:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1i} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{s1} & \dots & P_{si} & \dots & P_{sn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{b1} & \dots & P_{bi} & \dots & P_{bn} \end{bmatrix}$$

Для матриці P впливу якості напруги живлення на енергетичний та технічний стан НУ з СД (9) i -й вектор-стовпець елементів – список значень однорідного i -го показника (число показників n) для кожного з b -установок, а s -й вектор-рядок елементів – список різнорідних значень показників для s -ої установки ($i = \overline{1, n}; s = \overline{1, b}$).

Для того, щоб порівнювати чисельні значення показників між собою, необхідно привести їх до безрозмірного вигляду. Це пропонується здійснити шляхом нормування значень показників. Для чисельного значення, з яким буде порівнюватися кожний показник, зручно взяти норму вектора-стовпця (норму кожного критерію) за досліджуваними НУ з СД:

$$P_i^{norm} = \sqrt{\sum_{s=1}^b p_{si}^2}$$

де $p_{s,i}$ – чисельне значення i -го показника ($i = \overline{1, n}$) по s -ій установці ($s = \overline{1, b}$);

n – кількість показників, що розглядаються;

b – кількість установок, що досліджуються.

Таким чином, нормовані значення критеріїв, що приведені до одиниці, визначаються виразом:

$$P'_{s,i} = \frac{p_{s,i}}{p_i^{norm}},$$

де $P'_{s,i}$ – матриця нормалізованих значень показників ($i = \overline{1, n}$; $s = \overline{1, b}$).

Для формування «еталонного» показника впливу якості напруги живлення на НУ з СД, з яким будуть порівнюватися всі інші, визначаються оптимальні значення нормалізованих i -х показників за всіма установками. Вибираються, відповідно, максимальні значення залежно від впливу на НУ. Обрані оптимальні значення формують матрицю-рядок:

$$Pet_i^e = [\max p'_{s1}{}^e \dots \max p'_{si}{}^e \dots \max p'_{sn}{}^e],$$

$\max p'_{si}{}^e$ – визначення максимального нормалізованого з урахуванням значення i -го показника від впливу на НУ ($s = \overline{1, b}$; $i = \overline{1, n}$).

Як результат, співвідношення для визначення відстаней між s -м реальним станом та «еталонним», на основі якого визначаються вплив на енергетичний та технічний стан НУ з СД, матиме наступний вигляд:

$$D_s^e = \sqrt{\sum_{s=1}^b p'_{s,i} - p'et_i{}^e{}^2}.$$

Вплив якості напруги визначається на основі вищевказаного виразу – чим значення відстані D_s^e менше, тим менший негативний вплив спричиняють показники напруги живлення на НУ з СД і вище її залишковий ресурс. Результати розрахунків впливу якості напруги живлення на повну енергію СД НУ 1Д1250-125 приведені на дендрограмі рис. 3. 19.

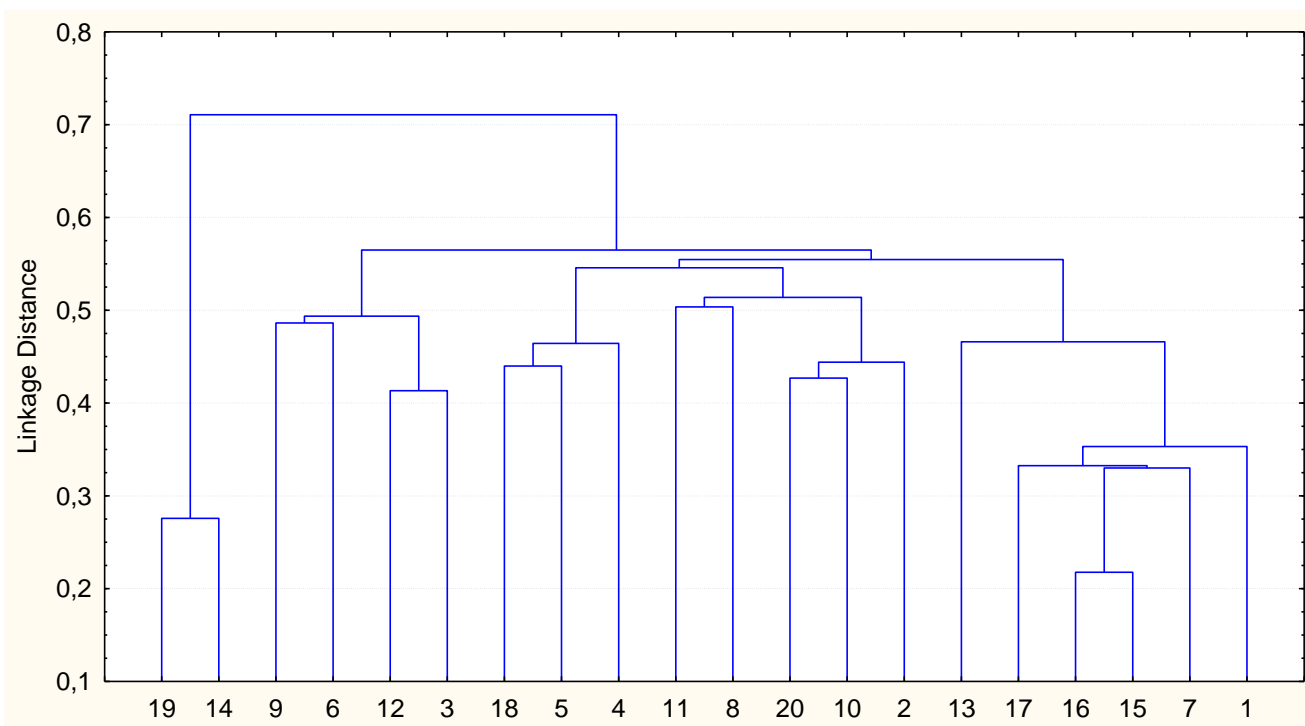


Рис. 3.19. Дендрограма сумарного впливу показників якості напруги живлення на повну енергію СД НУ 1Д1250-125

З дендрограми видно, що налічується 2 класи роботи двигуна, тобто нормальний та передаварійний режим роботи. Показники 14 і 19 відповідають аварійному режиму роботи двигуна при відхиленні напруги яка становила 13%. Зведені таксонометричні показники впливу якості напруги живлення на енергетичні показники синхронних двигунів насосних установок наведені в табл. 3.1

Таблиця 3.1 Таксонометричний показник впливу якості напруги живлення на енергетичні показники синхронних двигунів насосних установок

Таксонометричний показник	СД НУ СДВ 7200/29 (1000 кВт)	СД НУ СМ 250 (250 кВт)	НУ 1Д1250-125 (630 кВт)
Коефіцієнт корисної дії	0,357	0,561	0,781
Повна енергія	0,421	0,612	0,705
Активна енергія	0,394	0,524	0,652
Реактивна енергія	0,182	0,195	0,283
Повні втрати енергії	0,467	0,689	0,846

За даними таблиці 3.1 можна зробити висновок, що найбільший негативний вплив на енергетичні показники НУ 1Д1250-125 спричиняє саме відхилення якості напруги живлення.

Висновки до розділу 3

1. Запропонована методика діагностування синхронного електроприводу насосних установок за рахунок використання математичної моделі яка враховує якість напруги живлення (відхилення, несиметрію та несинусоїдальність напруги, відхилення частоти), величину і характер навантаження, додаткові втрати через несинусоїдальність та несиметрію напруги, що дозволило визначати технічний і енергетичний стан устаткування за результатами вимірювань експлуатаційних параметрів (струмів і напруг).

2. Вдосконалено еталонну модель та розроблено методику розрахунку параметрів синхронних двигунів насосних установок за паспортними даними за рахунок встановлення характеру залежностей ККД в номінальному режимі від величини навантаження, що дозволило з достатньою достовірністю (при похибці яка не перевищує 7 %) визначати робочі параметри та параметри схеми заміщення, енергетичні характеристики електротехнічного комплексу.

3. Аналітична перевірка та результати моделювання на ЕОМ залежностей ККД, робочих параметрів синхронних двигунів серії СД2 показали достатню відповідність результатів розрахунків експериментальним даним виробника. Відносна похибка розрахунку параметрів і характеристик синхронних двигунів за моделлю діагностування не перевищує 7%. Відносна похибка визначення номінальних даних двигунів не перевищує 0,7% і параметрів схеми заміщення - 4,5% відносно паспортних даних, а параметрів енергоспоживання - 8% та енерговикористання - 7% відносно розрахункових даних еталонної моделі. Найбільше значення відносної похибки визначення ККД в залежності від його навантаження не перевищує 3% для еталонної моделі і 3,5% для діагностичної, а коефіцієнта потужності – 3,4% та 5,7% відповідно.

4. Правомірність і адекватність розроблених моделей і методик діагностування енергетичного та технічного стану електроприводу насосних

установок з синхронними двигунами підтверджують проведені дослідження впливу зниження якості напруги живлення та величини навантаження на енергетичні характеристики двигунів. Модель діагностування дозволяє проводити значні обсяги досліджень пов'язаних з розв'язуванням практичних задач розрахунку й аналізування енергетичних характеристик для підвищення рівня якості функціонування синхронних електроприводів насосних установок.

Основні результати досліджень, що наведені в даному розділі опубліковані в наукових працях автора [69, 124, 129, 149, 157]

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ УСТАНОВОК З СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ

4.1. Апаратні рішення діагностування енергетичного та технічного стану синхронних електроприводів

Розроблено схемно-технічні рішення діагностування енергетичного та технічного стану НУ з СД для реалізації поставлених завдань на апаратному рівні. На основі аналізу принципів функціонування розроблено структурні елементи системи діагностування НУ з СД (рис. 4.1).

Мобільний комплекс для вимірювання діагностичних параметрів складається з трьох вимірювальних елементів з лінійними АЧХ: трансформатори напруги (або подільники напруги); струмові датчики; датчик температури навколишнього середовища. Датчики встановлюються на електрощитку, від якого двигун живиться, або безпосередньо на клемній коробці двигуна, який діагностується.

Сигнали трифазних напруг і струмів в аналоговій формі поряд з корисним сигналом, містять перешкоди та надлишкову інформацію, яка характеризує роботу окремих вузлів насосних установок з синхронними двигунами та їх взаємодію. Сигнали для моделей діагностування, спектрально-струмового аналізу і визначення ПЯЕ формуються пристроями вимірювання, попереднього оброблення і перетворення даних (рис. 4.2).

Діагностичний аналіз базується на використанні середньоквадратичних значень струму фаз і напруги. Програмно визначаються кут зсуву φ у фазах двигуна, а також частота мережі. Крок дискретизації відповідно до алгоритму вимірювань визначається моделлю ГЕН і уточнюється за допомогою прогностичної моделі.

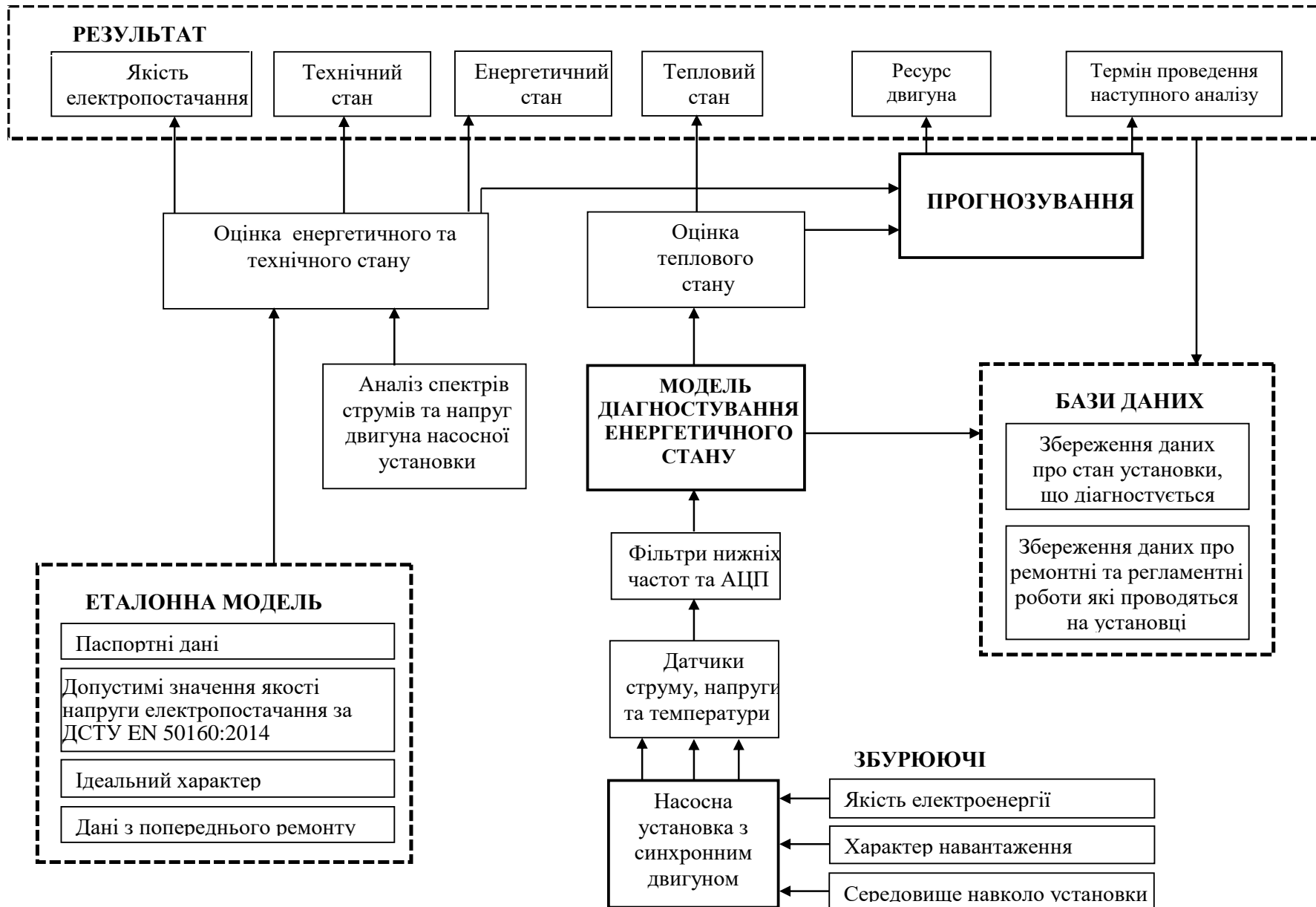


Рис. 4.1 Структурна схема системи діагностування енергетичного та технічного стану ЕП НУ з СД

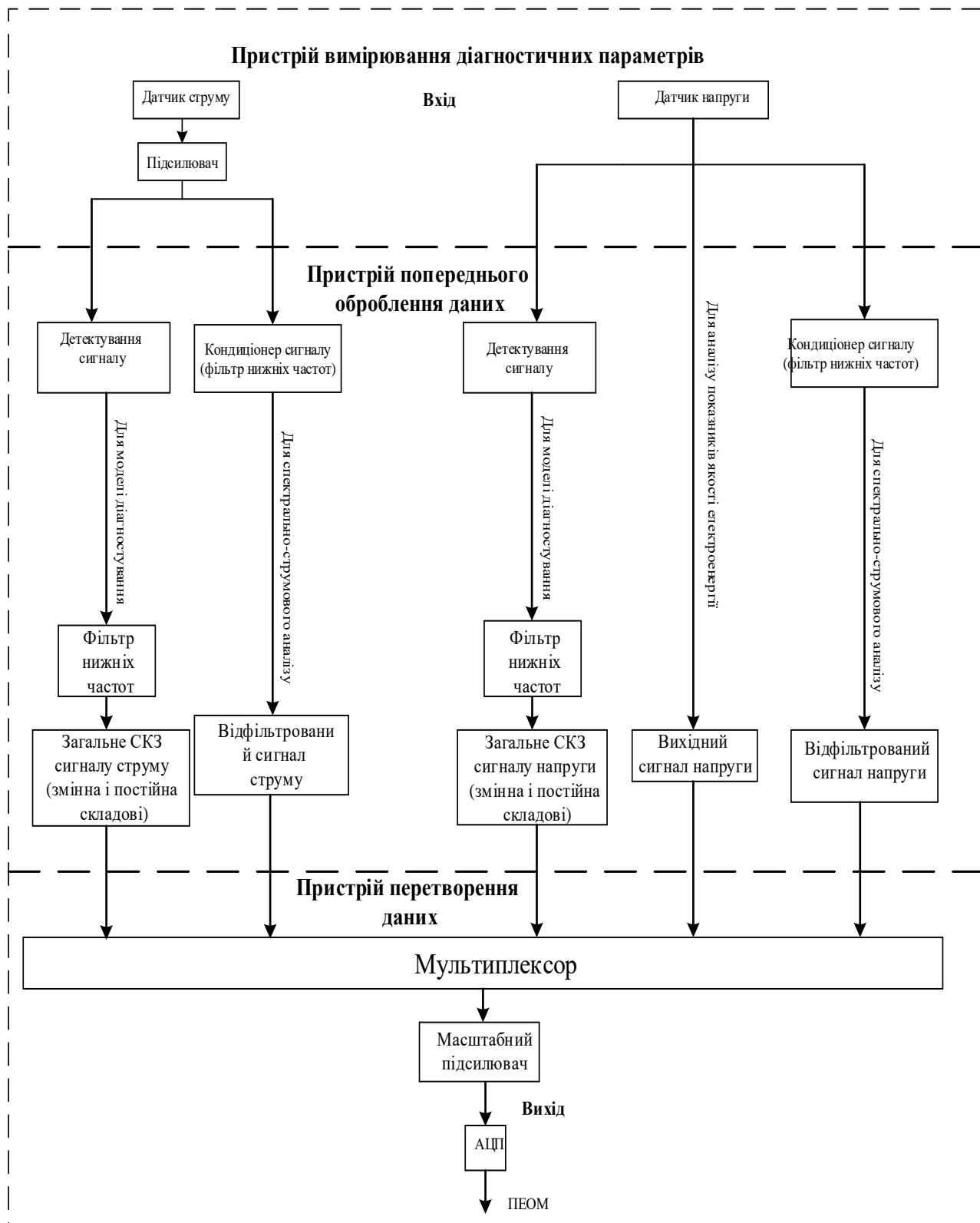


Рис. 4.2 Структурна схема пристроїв вимірювання, попереднього оброблення і перетворення діагностичних параметрів для однієї фази двигуна

Реєстрація значень струму і напруги проводиться на частотах до 10 кГц протягом часу кратного періоду основної частоти [94, 147]. Вимірювання повторюється кілька раз для частот в діапазоні 0,01...0,1 Гц. З метою усунення завад частота зрізу ФНЧ вибирається вищою максимальної частоти корисного сигналу, оскільки результати вимірювань – дискретна функція з певним кроком аргументу в часі.

Спектри векторів струму і напруги формуються за допомогою моделі спектрально-струмового аналізу. Аналізуючи модулі векторів струму і напруги виявляються лінії які наявні в спектрі струму, але відсутні в спектрі напруги. Свідченням про наявність ушкоджень в діагностованій НУ з СД є невідповідність вказаних спектрів.

У ДСТУ EN 50160:2014 визначені алгоритми вимірювання ПЯЕ. За напругою основної частоти розраховуються фазні й міжфазні відхилення напруги, а також коефіцієнти несиметрії. За допомогою перетворення Фур'є у вигляді спектру гармонік визначається вхідна оцифрована напруга. В трифазній мережі відхилення напруги та її несиметрію розраховують відносно напруги основної частоти.

Для визначення ПЯЕ потрібна найвища частота дискретизації сигналів, тобто виконується 256 вимірювань за один період основної частоти (0,02с). Це дозволяє з достатньою точністю визначити діюче значення гармонічної складової вхідної напруги 40-го порядку, частота якої 2 кГц. Середнє значення діючих гармонічних складових розраховується на i -му інтервалі з отриманих на кожному періоді від 1-ї (50 Гц) до 40-ї гармоніки. Тривалість інтервалу дорівнює 8-16 періодам основної частоти (0,16-0,32 с), і визначає тривалість часу вимірювання. Величина відповідного параметра обчислюється як СКЗ кількох результатів вимірювань.

Відповідно до алгоритмів модель визначення діагностичних показників СД формує компоненти діагностичних ознак (U, I, P, φ, f). Ця інформація недостатня для висновку про стан НУ з СД, і за діагностичними параметрами дефекти на

стадії їх виникнення не можуть бути виявленні. Тому моделями визначення параметрів процесу енергоспоживання, параметрів схеми заміщення, параметрів процесу енерговикористання виконуються додаткові обчислення, які дозволяють визначити поточний стан ЕМС (розділ 3, п. 3.3).

Еталонна модель на основі паспортних даних СД, допустимих і граничних значень ПЯЕ, історії ремонтів встановлює еталонні значення інформативних параметрів (розділ 3, п. 3.1). В моделі оцінювання стану двигуна на основі поточних значень параметрів діагностичної і еталонної моделі виконується процедура прийняття рішення про приналежність до заздалегідь визначеного класу станів.

Перший етап визначення стану – порівняння параметрів діагностичної моделі з їх допустимими і граничними значеннями для встановлення аварійного стану СД. Під час другого етапу визначається енергетичний та технічний стан СД. Тобто формуються три області які відповідають особливим станам двигуна – передаварійна ситуація, гранично припустиме значення параметра технічного стану, та припинення нормального функціонування.

Аналіз характеристик параметрів діагностичної моделі дозволяє оцінити залишковий ресурс двигуна протягом терміну роботи, та встановити тенденції в зміні стану. Ця процедура виконується на основі прогностичної моделі з використанням бази даних стану двигуна та історії ремонтів.

Відповідно до режиму роботи СД, його ГЕН проводиться вимірювання та аналіз струмів і напруг які коригуються прогностичною моделлю в залежності від його технічного стану. В базу даних заносяться результати вимірювань і аналізу та контролюється розвиток пошкоджень у часі, а також визначається залишковий ресурс двигуна. Якщо база даних вимірювань буде регулярно поповнюватись, то в процесі експлуатації НУ з СД можливо простежити динаміку фактичного розвитку окремих пошкоджень та своєчасно зупинити їх подальший розвиток. Прогноз розвитку ушкоджень, викликаних якістю напруги живлення уточнюється за допомогою моніторингу напруги.

Функції програмної частини діагностувальних засобів виконуються на АРМ-енергетика, який включає в себе мобільний комплекс. АРМ сполучається з вимірюваними датчиками через комутаційний пристрій, що містить АЦП для перетворення аналогових сигналів у цифрові.

Переваги такого принципу побудови: швидке розроблення пристрою завдяки спрощення апаратної частини; потужні процесори дозволяють оброблення сигналів у реальному часі; використовується програмне забезпечення мовами високого рівня, та стандартні засобів введення-виведення і накопичення інформації; деяка структурна надлишковість і відносна висока вартість компонентів економічно виправдана через дрібносерійний характер виробництва.

4.2. Алгоритм діагностування енергетичного і технічного стану електроприводу насосних установок з синхронними двигунами

Процес контролювання поточних експлуатаційних параметрів СЕП НУ для визначення їх технічного та енергетичного стану, який змінюється під час експлуатації і має показники та характеристики, встановлені нормативно-технічною документацією являє собою діагностування електротехнічного комплексу [95]. Наслідком діагностування є висновок про технічний та енергетичний стан НУ з СД з вказуванням виду пошкодження, прогнозованим залишковим ресурсом і визначенням терміну наступного діагностування.

Висновок щодо фактичного стану ЕМС та прогноз її технічного стану формується відповідно до алгоритму діагностування.

Інформаційний метод, заснований на виборі параметрів з максимальною інформацією про енергетичний стан об'єкту діагностування, використовується для побудови алгоритму діагностування [96].

Можлива наступна послідовність дій діагностування НУ з СД:

Крок 1. Проводиться перевірка, чи діагностувалась установка попередньо, якщо так то завантажуюмо дані з попереднього діагностування, якщо ні то визначаємо еталонні параметри двигуна.

Крок 2. Проводиться вимірювання струмів, напруг та температури довкола установки.

Крок 3. Проводиться розрахунок діагностичних показників.

Крок 4. Розкладання струмів та напруг через швидке перетворення Фур'є в гармонічний спектр.

Крок 5. Проводиться спетрально-струмовий аналіз струмів та напруг

Крок 6. Розрахунок якості електропостачання.

Крок 7. Порівняння показників якості електропостачання з критичними даними згідно ДСТУ EN 50160:2014, якщо перевищують критичне відхилення, то повідомлення в систему, якщо ні то крок 8.

Крок 8. Розрахунок енергетичних параметрів.

Крок 9. Розрахунок схеми заміщення в осях d і q .

Крок 10. Проводиться діагностика технічного стану за спектрами струмів та напруг(тобто порівнюються спектри струму і напруги однієї фази, якщо піки в двох спектрах на тій же частоті то механічного ушкодження немає, якщо ж піки є на різній частоті, то є ушкодження), якщо є наявність ушкоджень, то повідомлення в систему, якщо немає то крок 11.

Крок 11. Розрахунок втрат та ККД.

Крок 12. Створюється масив з даними $\xi_d = |U, I, P_1, S, \cos \varphi, \eta, \Delta P, W|$.

Крок 13. Проводиться діагностика енергетичного стану (порівняння енергетичних параметрів розрахованих за даною моделлю ξ_d з даними еталонної моделі або попереднього діагностування ξ_e)

Крок 14. Прогнозування залишкового ресурсу, енергії, що споживається та втрат.

Крок 15. Розрахунок терміну наступного діагностування.

Крок 16. Збереження результатів у базі даних.

За діагностичними показниками проводиться розрахунок енергетичних параметрів. Після проведення їх аналізування визначаються аварійні режими, проводиться діагностування технічного та енергетичного стану, прогнозується

залишковий ресурс. Перед визначенням енергетичного стану і прогнозуванням визначається наявність, або відсутність аварійного режиму, оскільки у випадку аварії подальші дії недоцільні.

Проведений аналіз факторів які впливають на технічний та енергетичний стан НУ з СД вказує на доцільність використання електричних параметрів, тобто, миттєвих значень напруг і струмів фаз, та врахування температури середовища навколо ЕМС для корекції прогнозу залишкового ресурсу. Для визначення технічного й енергетичного стану НУ з СД необхідно використовувати діагностичні показники, що являють собою зміну значень сигналів протягом певного інтервалу часу.

Спочатку аналізується зміна напруги на обмотках статора, а потім – струм. Несиметричні й аварійні режими роботи двигуна виявляються за допомогою контролю напруги фазних обмоток за ПЯЕ. Внаслідок зміни параметрів живильної мережі змінюється струм статора. Неможливо однозначно встановити причину зміни струму статора, якщо спочатку досліджувати його без додаткових перевірок параметрів, які впливають на нього (величини навантаження, відхилення ПЯЕ від припустимих тощо).

Проходження теплового процесу в усталеному режимі визначається за діагностичною ознакою - перевищенням СКЗ номінального струму. Це можливо, оскільки втрати внаслідок нагрівання обмоток визначаються саме цим перевищенням. Механічні дефекти, їх розвиток до виникнення аварії можна виявити завчасно, застосувавши метод спекрально-струмового аналізу.

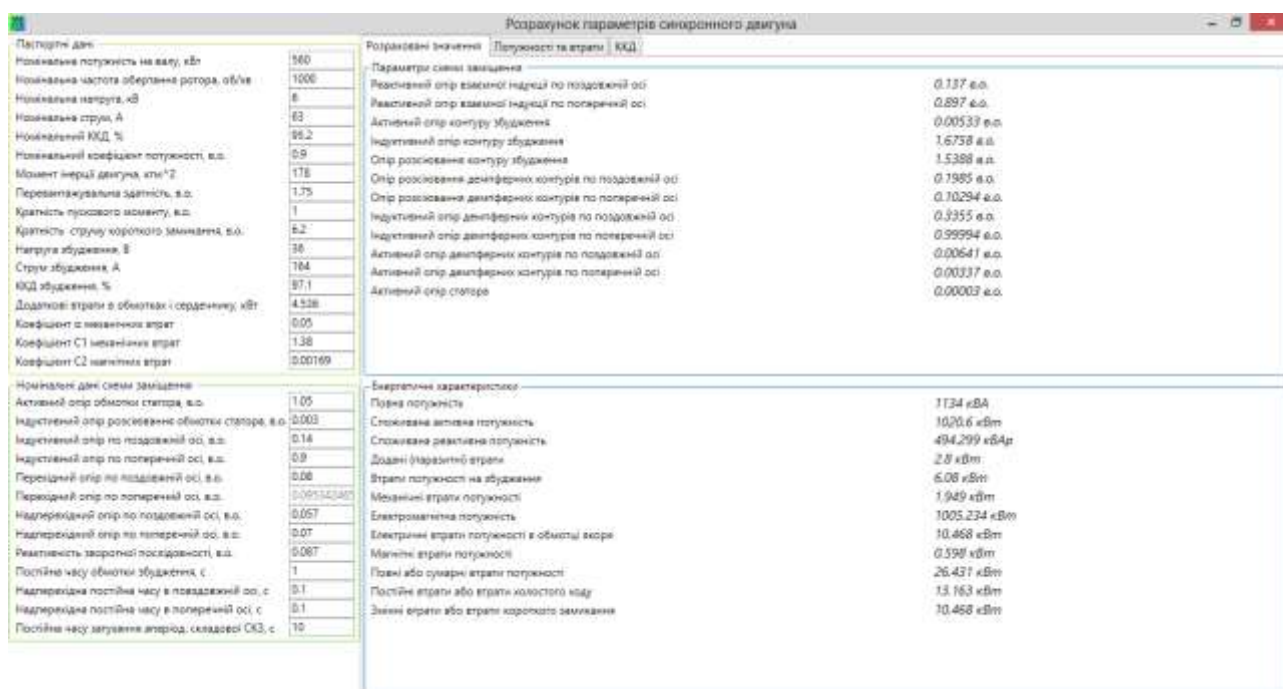
За енергетичними моделями СД розраховуються наступні діагностичні параметри (ПЯЕ, параметри процесу енергоспоживання та процесу енерговикористання). Під час діагностування проводиться порівняння поточних значень діагностичних параметрів з їх еталонними значеннями. Після ввімкнення системи, через певні інтервали часу в процесі роботи виконується алгоритм самодіагностування.

4.3. Програмне забезпечення автоматизованого робочого місця діагностування енергетичного та технічного стану насосних установок з синхронними двигунами

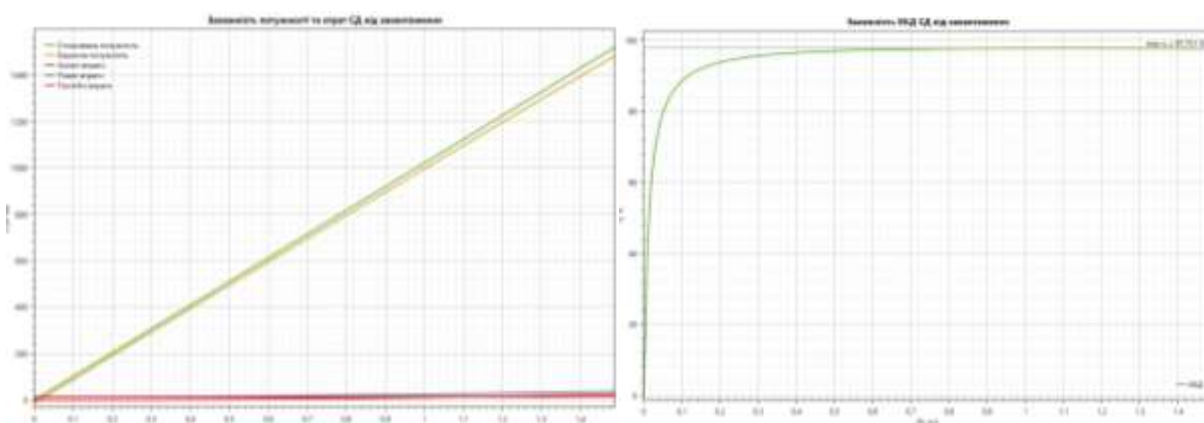
Розроблене автором програмне забезпечення для реалізації діагностування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами на ПЕОМ складається з трьох програм: “Еталонна модель СД”, “Діагностування параметрів СД”, “Визначення залишкового ресурсу СД” [157,159].

Розроблено програму розрахунків параметрів еталонної моделі “Еталонна модель СД” на основі еталонної моделі та методики розрахунків робочих параметрів СД за паспортними даними в середовищі DELPHI [72, 78, 132]. На рис. 4.3 наведено 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 СД типу СД2-85/47-8У3 з паспортними даними: потужність 500 кВт; номінальна частота обертання 750 об/хв; Струм статора 57 А; $\cos\varphi$ 0,9; ККД 94,3%; напруга збудження 38 В; струм збудження 166 А.

Масиви миттєвих значень трифазних струмів і напруг є вхідними даними для програми “Діагностування параметрів СД”, а також параметри двигуна для номінального режиму з еталонної моделі двигуна [132]. Програма формує протокол у вигляді текстового файлу з параметрами двигуна відповідно до діагностичної моделі. У стандартному mat-форматі програмного середовища MATLAB зберігається вхідний файл для програми “Діагностування параметрів СД”. Він містить послідовності значень фазних струмів і напруг для трьох фаз за певний період часу. Програма написана в середовищі Visual Studio 2012 мовою програмування Visual Basic Net. За допомогою середовища MATLAB Simulink мовою програмування С згенеровано додаткові модулі.



а



б

Рис. 4.3 Інтерфейс програми “Еталонна модель СД”:

а – головний інтерфейс користувача; б – вікна з залежностями енергетичних показників від навантаження

Результати аналітичних досліджень процесу перетворення енергії насосною установкою системи водопостачання з СД типу СД2-74/33-8УЗ потужністю 250 кВт наведено на рис. 4.4, 4.5. Для моделювання роботи установки використано експериментальний ГЕН в умовах неякісної напруги живлення.

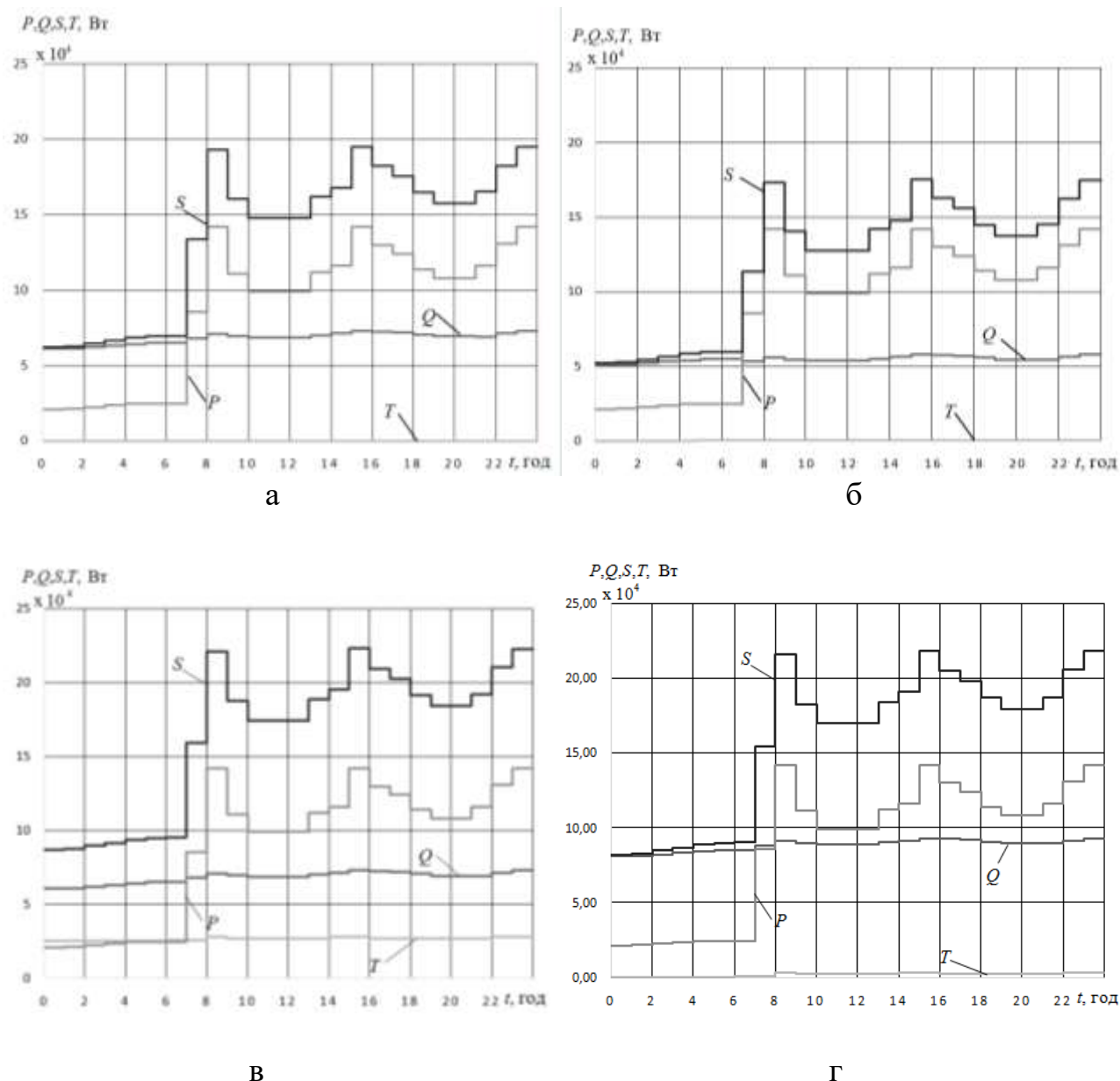


Рис. 4.4 Добові графіки споживаних з мережі потужностей (активної, реактивної, повної та потужності спотворення) при зміні навантаження у випадку: а - відсутності відхилень ПЯЕ; б - відхилення напруги від номінальної на 10%; в - впливу граничних показників несинусоїдальності; г - впливу граничних показників несиметрії

Вхідні дані програми “Визначення залишкового ресурсу СД” це значення повних втрат у двигуні, які отримуються з програми “Діагностування СД”, номінальні втрати – з програми “Еталонна модель СД”, стала нагрівання

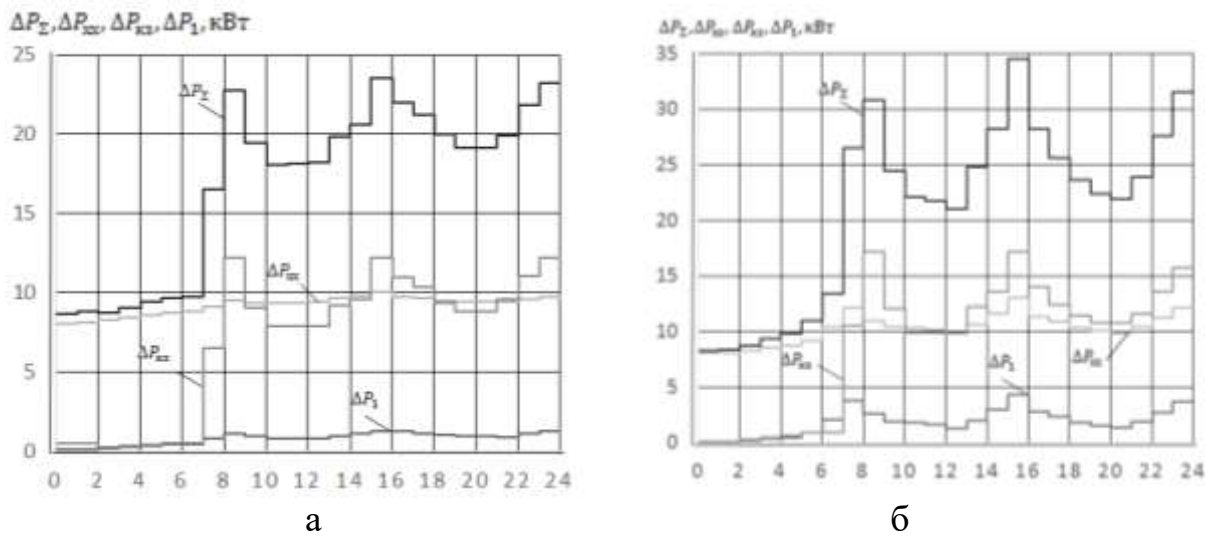
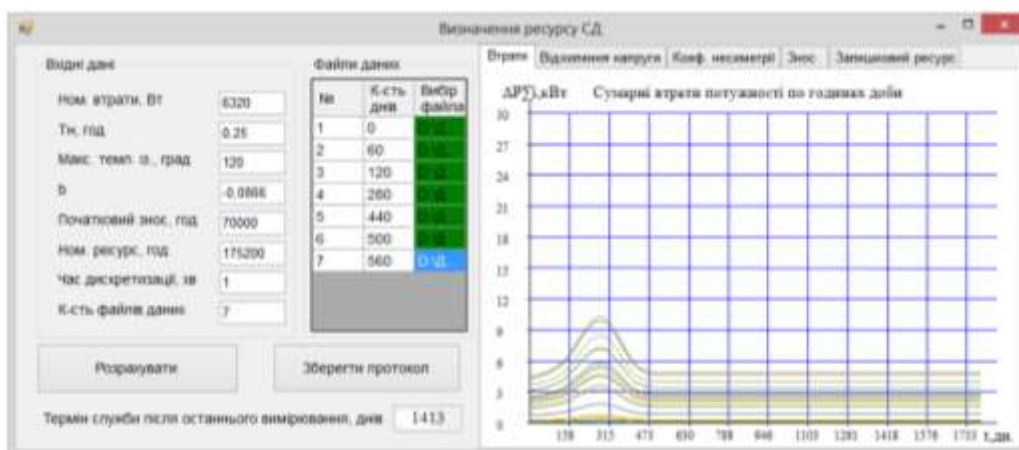


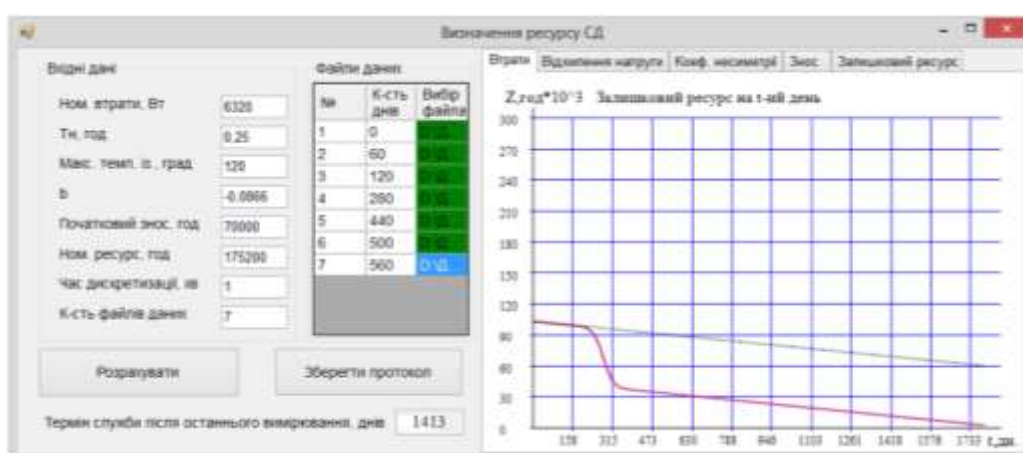
Рис. 4.5 Добові графіки втрат СД (повні, змінні, постійні та додані) в умовах зміни навантаження у випадку: а – відсутності відхилень ПЯЕ; б – впливу граничних значень ПЯЕ (відхилення, несиметрії та несинусоїдальності напруги)

двигуна, параметрів ізоляції (допустимої температури), зношеності ізоляції за час експлуатації, номінального терміну служби. За допомогою методу опору визначається попередня зношеність ізоляції. За допомогою програми можна визначити попередню зношеність ізоляції за час експлуатації, якщо відомий режим роботи ЕМС до початку діагностування Розрахунок залишкового ресурсу двигуна у залежності від дії сукупності експлуатаційних факторів та формування протоколу прогнозованого і номінального залишкових ресурсів у часі виконує програма “Визначення залишкового ресурсу СД”. Для апроксимації значень вхідних параметрів у періоди між вимірюваннями і прогнозуванням їх на майбутнє застосовується метод експоненціального згладжування.

Головний інтерфейс користувача програми “Визначення залишкового ресурсу СД” з результатами аналітичних досліджень залишкового ресурсу насосної установки з СД типу СД2-74/33-8У3 потужністю 250 кВт при



а



б

Рис. 4.6 Інтерфейс користувача програми “Визначення залишкового ресурсу СД”: а – вікно витрат; б – вікно залишкового ресурсу

збільшенні сумарних витрат в 1,8 рази внаслідок перевантаження наведена на рис. 4.6. Програма написана в середовищі Visual Studio 2012 з підтримкою Net Framework 4.0, код інтерфейсу – Visual Basic. Net, код розрахунку – мова MATLAB.

4.4. Верифікація теоретичних положень і отриманих наукових результатів

В лабораторних умовах експериментально перевірені розроблені методики, моделі, алгоритми та програми діагностування енергетичного та технічного стану ЕП НУ з СД. На основі датчиків струму (гнучких струмовимірювальних

кліщів Fluke i5sPQ3), напруги (щупів напруги VPS40), температури, комутаційного пристрою з АЦП типу advantech pcl-1800, ПЕОМ та алгоритмів і програм “Еталонна модель СД”, “Діагностування параметрів СД”, “Визначення залишкового ресурсу СД” (рис. 4.7) створено мобільний комплекс для діагностування енергетичного та технічного стану ЕМС. Комплекс використовується для роботи в режимі комп’ютерного експерименту та для проведення лабораторних стендових досліджень.

За допомогою комплексу проводились два експерименти: з виявлення пошкодження обмоток СД і збільшення навантаження двигуна до його відмови.



Рис. 4.7 Структурна схема мобільного комплексу для діагностування енергетичного та технічного стану ЕП НУ з СД

Моделювання пошкодження здійснено шляхом припаювання в лобовій частині однієї з фаз обмотки перемички. СД типу ЕСС-54-4У2 ($P_H = 5$ кВт, $n_H = 1500$ об/хв, $U_H = 230$ В, $\eta_H = 80,2\%$, $\cos\varphi_H = 0,8$) навантажувався за допомогою навантажувального пристрою «Тормоз ПТ-2,5М» відповідно до ГЕН СД промислового насоса (рис. 4.8).

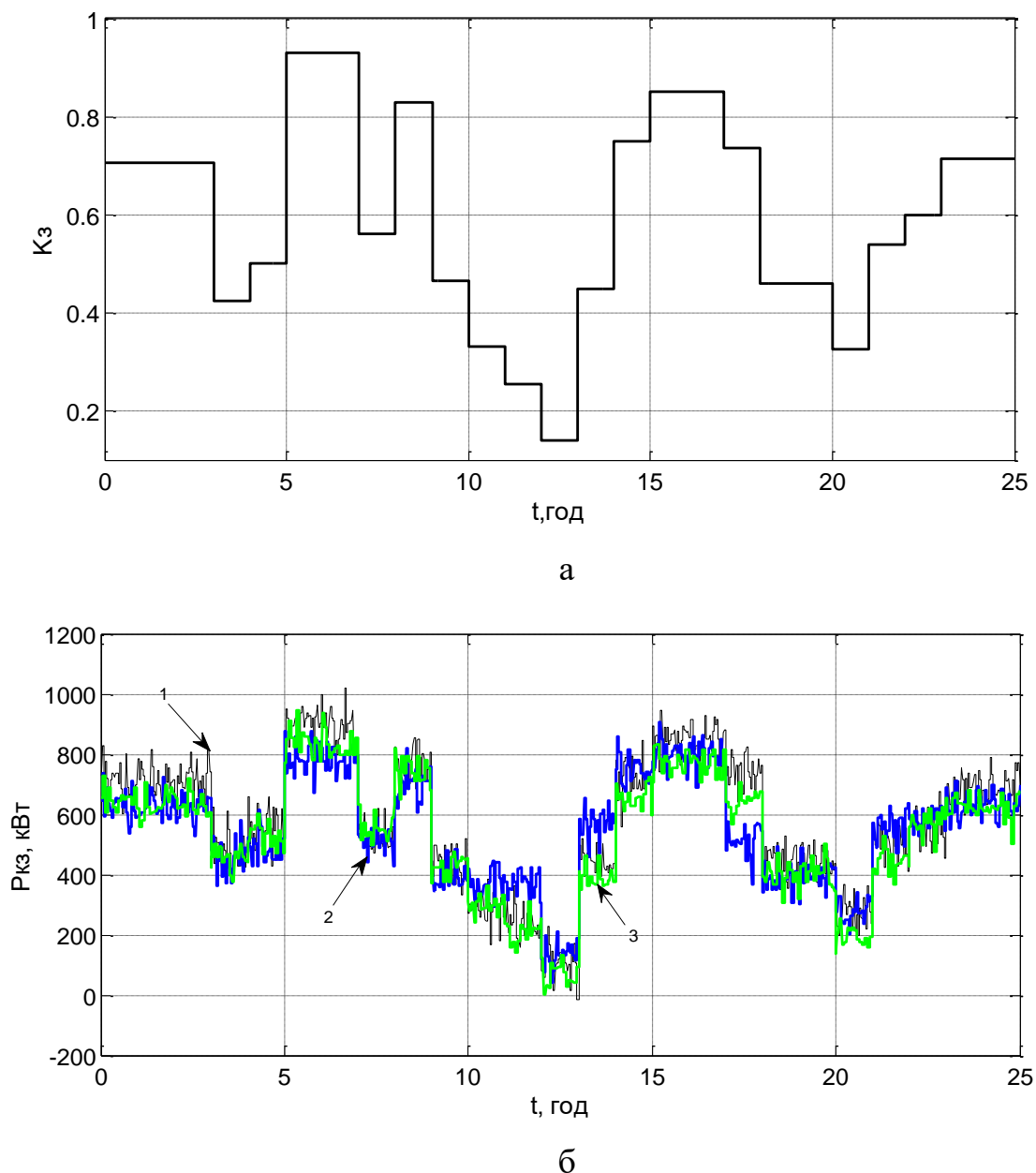


Рис. 4.8 Графіки електричного навантаження (а) та змінних втрат у часі (б) СД промислової насосної установки: 1 – неушкоджений двигун; 2 – ушкоджений двигун, визначені згідно пунктів 6.2.3-6.2.5 ГОСТ 25941-83; 3 – ушкоджений двигун, за допомогою комплексу діагностування

Виявлено збільшення втрат в обмотці в середньому на 20% та зменшення активного опору обмотки статора двигуна на 18%. Сумарні змінні втрати зросли на 19% (рис. 4.8, б). Результати які було отримано підтвердили наявність несправностей в обмотках статора двигуна.

Відповідно до ГОСТ 25941-83 «Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия» значення ККД визначалось безпосереднім шляхом за методом тарованої допоміжної машини (4.9).

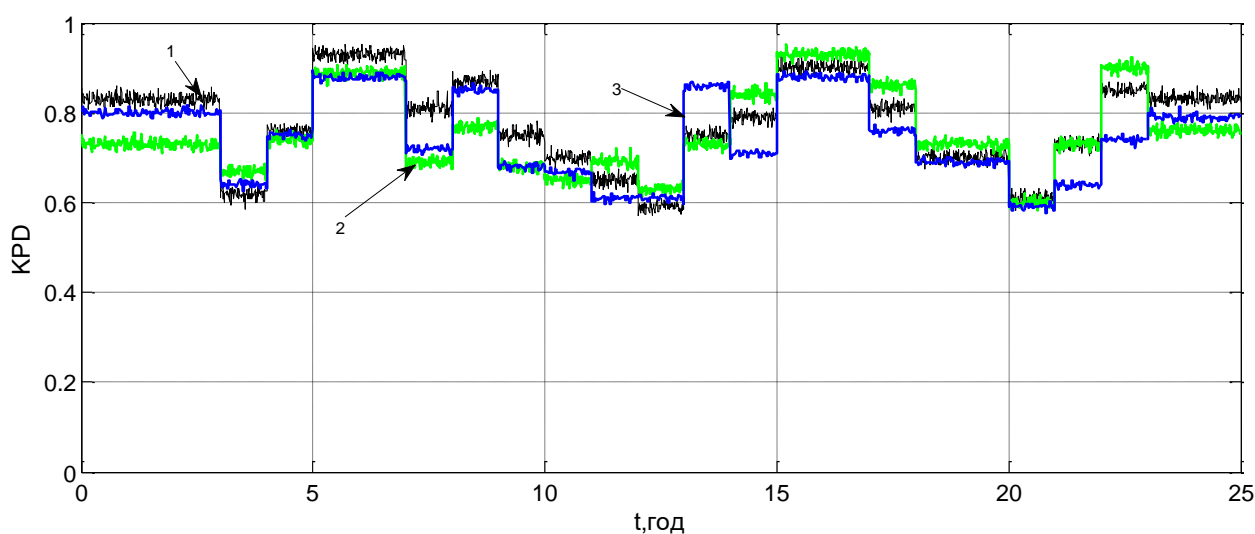
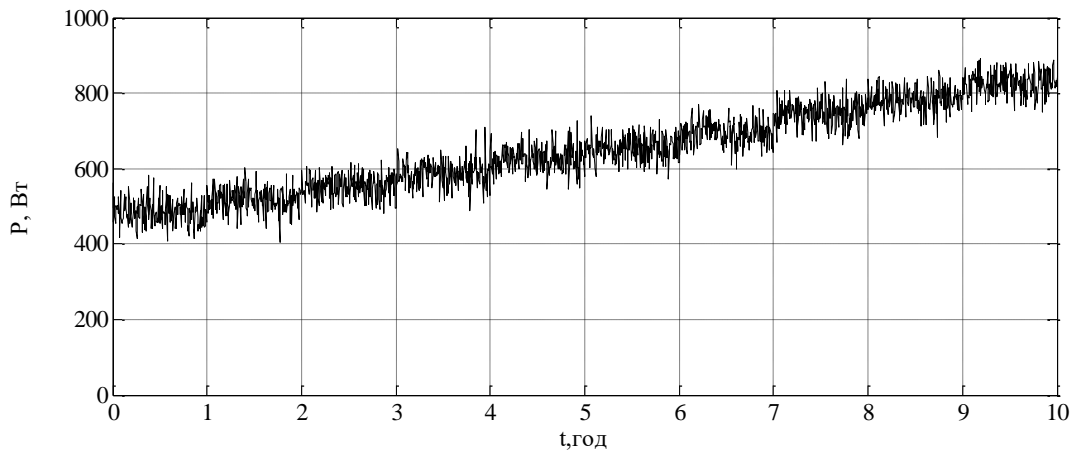
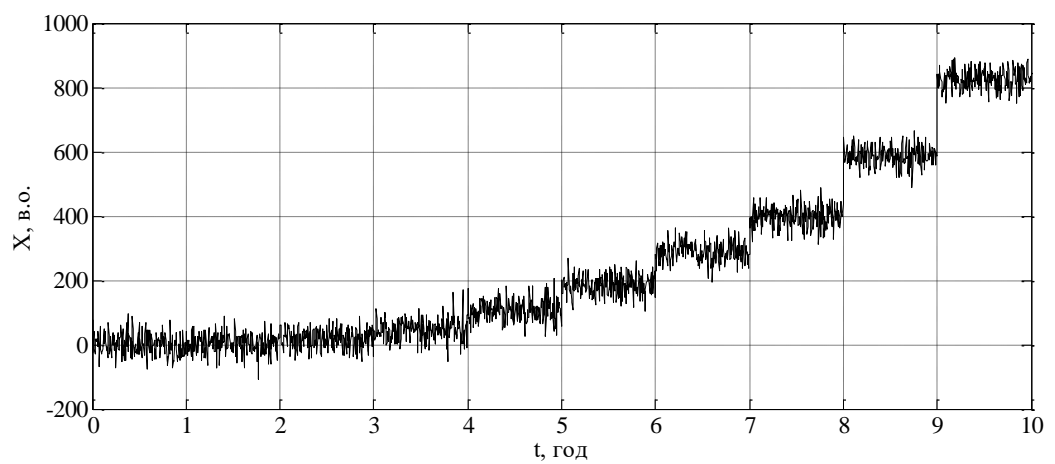


Рис. 4.9 Графіки зміни ККД у часі: 1 – неушкоджений двигун;
 2 – ушкоджений двигун, визначені згідно пунктів 6.2.3-6.2.5 ГОСТ 25941-83;
 3 – ушкоджений двигун, за допомогою комплексу діагностування

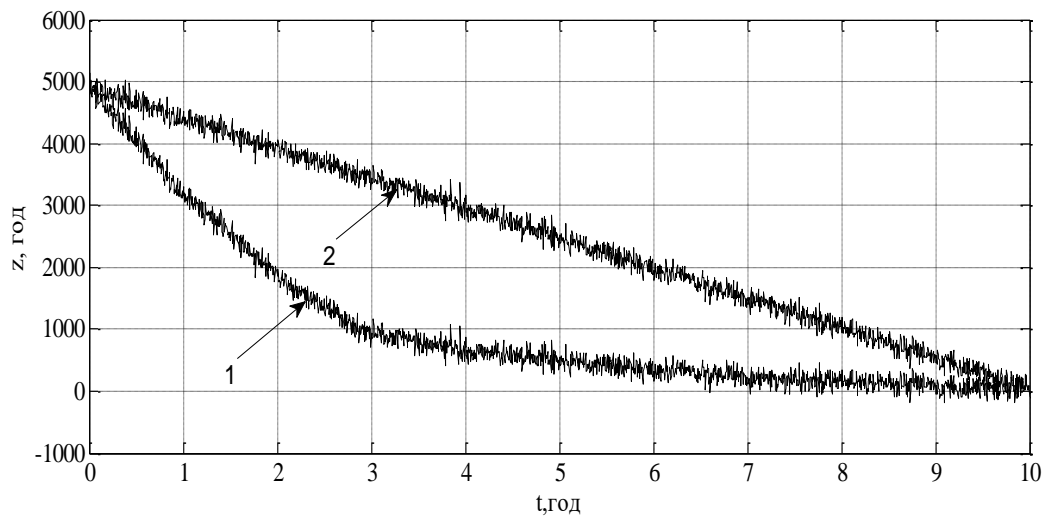
Дослідження показало, що мінімальні значення похибки визначення змінних втрат і ККД розташовуються в області навантажень близьких до номінального. При цьому похибка ККД дорівнює 3,5% а найбільше значення відносної похибки за втратами сягає 6%.



а



б



в

Рис. 4.10 Графіки зміни в часі сумарних втрат потужності (а), зношування ізоляції (б) та залишкового ресурсу (в) (1 - експериментальне значення, 2 - прогнозоване)

Перевірка достовірності моделі та програми розрахунку залишкового ресурсу здійснено шляхом дослідження за методом прискореного експерименту. Вимірювалися параметри СД ЕСС-54-4У2 ($P_H = 5$ кВт, $n_H = 1500$ об/хв, $U_H = 230$ В, $\eta_H = 80,2\%$, $\cos\varphi_H = 0,8$), прогнозування залишкового ресурсу та його порівняння зі встановленим дослідним шляхом. Навантаження здійснювалось до 150% від початкового з дискретністю близько 5%. Кожен рівень навантаження тривав 1 годину (рис. 4.10).

В результаті було прогнозовано, що СД вийде з ладу в кінці 10 години роботи за даних умов експерименту. Реально відмова двигуна сталась наприкінці 12 години. За експериментом відносна похибка прогнозування залишкового ресурсу, не перевищує 20%, оскільки в програму не було внесено значень початкового ресурсу двигуна та похибки моделі старіння ізоляції.

Перевірка методик, моделей, алгоритмів та програм на розробленому мобільному комплексі підтвердила достатню точність визначення енергетичних показників НУ з СД. Доцільність енергетичного підходу до виявлення ушкоджень несправностей двигуна, а також високу точність прогнозування залишкового ресурсу.

Висновки до розділу 4

1. Розроблені алгоритми, програмне забезпечення та схемно-технічні рішення (“Еталонна модель СД”, “Діагностування параметрів СД”, “Визначення залишкового ресурсу СД”) за рахунок використання мобільного комплексу дозволяють автоматизувати процес АРМ енергетики.

2. Комп’ютерні програми, розроблені у дисертаційній роботі формують протоколи діагностування, що дало змогу під час їх використання визначати технічний, енергетичний стан і залишковий ресурс синхронних електроприводів насосних установок. При цьому мобільний комплекс забезпечує достатню точність проведення експериментальних досліджень як в режимі комп’ютерного експерименту, так і в стендових випробуваннях.

3. Експериментальна перевірка на мобільному комплексі показала високу точність визначення енергетичних показників синхронних двигунів у робочому режимі за допомогою розроблених моделей, методик і програм. (відносна похибка визначення змінних втрат не перевищує 6%, а ККД - 3,5%), що підтверджує доцільність використання енергетичного підходу до своєчасного виявлення ушкоджень електроприводу насосних установок з синхронними двигунами з високою точністю прогнозування залишкового ресурсу (відносна похибка не перевищує 20%).

Основні результати досліджень, наведено в наукових працях автора [124, 129, 132, 148, 157].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримали подальший розвиток методи діагностування електромеханічних систем і на цій основі вирішено актуальне завдання підвищення якості функціонування насосних установок з синхронними двигунами шляхом застосування засобів діагностування їх енергетичного і технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу синхронних електроприводів насосних установок.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному:

1. На підставі аналізу існуючих рішень в сфері підвищення якості функціонування електромеханічних систем обґрунтовано актуальність подальшого розвитку методів діагностування синхронного електроприводу насосних установок, які визначають одну із найбільш поширених груп механізмів загальнопромислового призначення.

2. Отримав подальший розвиток метод діагностування стану електромеханічних систем з синхронними двигунами за рахунок застосування системного поточного контролю енергетичних і технічних параметрів електроприводів, що дозволило визначити залишковий ресурс роботи елементів електротехнічного комплексу.

3. Аналіз підходів до діагностування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами за рахунок розробки класифікаційної схеми, яка виявляє доцільність використання фактичних експлуатаційних параметрів (струмів та напруг з урахуванням температури середовища навколо установки), для спектрального аналізу струмів і напруг та статистичних методів і, які в свою чергу, дозволяють визначати енергетичний та технічний стан досліджуваних установок.

4. Розроблено діаграми Ісікави та Парето для визначення основної групи суттєвих факторів, які дозволили встановити рівень енергетичного і технічного стану електроприводів насосних установок, а саме: якість напруги живлення, режим навантаження та умови експлуатації.

5. Запропоновано принципи визначення кроку дискретизації з використанням програмно-технічних засобів за рахунок використання методів спектрального аналізу, що дозволило обробляти діагностичні параметри з середньоквадратичною похибкою відновлювання сигналу, яка не перевищує 7 %.

6. Верифікація результатів моделювання енергетичних показників показала відповідність результатів теоретичних досліджень за допомогою розроблених моделей і методик діагностування насосних установок з синхронними двигунами результатам експериментальної перевірки в промислових умовах. Відносна похибка розрахунку узагальнених діагностичних параметрів не перевищує 4%, що є достатнім для інженерної практики.

7. Розроблено мобільний комплекс технічних засобів, використання якого дозволяє оцінити вірогідність результатів досліджень відносно прогнозованих оцінок залишкового ресурсу, що підтверджується матеріалами лабораторних експериментів НУ з СД типу ЕСС-54-4У2 потужністю 5 кВт (найбільше значення відносної похибки визначення ККД – 3,5 %, залишковий ресурс –18%).

8. Розроблені моделі, методики і алгоритми для засобів діагностування СЕП НУ за рахунок визначення енергетичного і технічного стану насосних установок та надання рекомендацій щодо підвищення якості їх роботи дозволяє підвищити ефективність функціонування технологічного комплексу вцілому.

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. Zhezhelenko I.V. Electromagnetic compatibility in electric power supply systems: textbook for institutions of higer education: translation from Ukrainian by S.I Kostritska and L.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Sayenko; editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. – 2nd edition. – D. : National Mining University, 2013. – 239 p.
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. Калинов А. П. Анализ методов идентификации электромагнитных параметров синхронных двигателей / А. П. Калинов // Зб. наук, праць КНТУ. Техшка в сількогосподарському виробництві галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград, 2004. -Вип. 15.-С. 110-119.
7. Adrian MUNTEANU Determination of the Power Transformer Efficiency Monitoring the Electrical Insulation Parameters /Adrian MUNTEANU, Lucian IULIAN //Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures Vol. 6 (XXIII), 2009. P. 121-124

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, 2008. – 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. Калинов А. П. Анализ методов идентификации электромагнитных параметров синхронных двигателей / А. П. Калинов // Зб. наук, праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград, 2004. -Вип. 15.-С. 110-119.
12. Енергозбереження. Системи електроприводу. Метод аналізу та вибору 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. Праховник А.В. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України. / [А.В. Праховник, В.В. Прокопенко, В.І. Дешко та ін.]. – Луганськ: вид-во "Місячне сяйво", 2009. - 696 с.
15. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / [За заг. ред. А. К. Шидловського]. — К.: Українські енциклопедичні знання, 2005. –512 с.
16. Thomson W. T. Diagnosing Faults in IM Engineering Ideal / W. T. Thomson // Electrical Review. - №215. - 1984. - P. 21-22.
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. Peng F. Z. Definitions and compensation of non-active current in power systems / F. Z. Peng, L. M. Tolbert, Qian Zhaoming. // Power Electronics Specialists Conference, 2002. - P. 1779-1784.

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 «Гірництво»: 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. Cruz S. M. A. Rotor cage fault diagnosis in three-phases induction motors, by the synchronous reference frame current / S. M. A. Cruz, J. M. Cardoso // Park's Vector Approach. International conference on electrical machines (ICEM-2000), Helsinki University of technology, Espoo, Finland. - P. 776-780.

29. Надточий В. М. Экспертные системы диагностики электрооборудования / В. М. Надточий // Электричество. - 1991. - № 8. - С. 9-16.

30. Ромашихин Ю. В. Алгоритмы системы определения параметров двигателей переменного тока / Ю. В. Ромашихин, Д. И. Родькин // Вісник КДПУ. Зб. наук, праць КДПУ ім. М.Остроградського. Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2010. - Вип. 4(63), ч. 2. - С. 130-134.

31. Башарин А.В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский //— Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. — 392 с, ил.

32. Shepherd W. Power factor correction in nonsinusoidal systems by the use of capacitance / W. Shepherd, P. Zakikhani // IEEE Transactions on Industry Applications, 1995. - P. 542-554.

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. Пересада С.М., Экспериментальное тестирование алгоритмов управления машиной двойного питания / С.М. Пересада, И.А. Шаповал, С.В. Король // Технічна електродинаміка 2003. – ч. 2. – С. 29-35.
35. Закладний О.М. Электропривод: навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 316 с.
36. Gzamecki L. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts In Electrical Systems With Nonsinusoidal Waveforms and Assymetry / L. Gzamecki // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No 3, 1996, P. 1244-1250.
37. Агунов М. В. Об Энергетических соотношениях в электрических цепях с несинусоидальными режимами / М. В. Агунов, А. В. Агунов // Электричество. - 2005. - №4. - С. 53-56.
38. 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.
39. Воробьев В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
40. Седуш В.Я. Раннее диагностирование электромеханических систем / [В.Я. Седуш, В.М. Кравченко, В.Ф. Борисенко, В.А. Сидоров] // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2009. - № 19. – С. 152-156.
41. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. / Д.И. Родькин. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
42. 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.

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

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

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

46. 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.

47. Гуринович А.Д. Экономическая эффективность скважинных насосных систем SQE с регулируемым приводом / А.Д. Гуринович, Е.В. Хмель // Энергоэффективность. - 2006. - №7. – С. 24-26.

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

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

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

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

52. 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.

53. 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.

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

55. 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.

56. Мамчур Д.Г. Підходи до визначення стану ізоляції електричних машин/ Д.Г. Мамчур, Ю.Г. Осадчук // Вісник КДПУ. Випуск 4/2006 (39). Частина 1. С. 122-129

57. 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.

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

59. 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.

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

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

62. 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.

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

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

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

66. Иноземцев Е.К. Ремонт и эксплуатация электродвигателей с непосредственным водяным охлаждением / Е.К. Иноземцев. – М.: Энергия, 1980. - 112 с.

67. Кокорев А.С. Электрослесарь по ремонту электрических машин: Учеб. для СПТУ / А.С. Кокорев. - [3-е изд.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 175 с.

68. Партс Р.Р. О способе вынутаго ротора/ Р.Р. Партс // Электричество.- 1961.- №6. - С.88.

69. Розен В.П. Таксонометрическое оценивание энергетического и технического состояния насосных установок с синхронными двигателями / В.П. Розен, Н.В. Печеник, Т.Ю. Оборонов // The scientific heritage. Budapest, Hungary, – 2016 – № 4 (4) – P. 90.

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

71. Косорлуков И.А. Прогнозирование жизненных циклов электроустановок 6 ÷ 35 кВ на основе математического моделирования и оценки рисков отказов: автореф. дис. на диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.03. «Электротехнические комплексы и системы»/ И.А. Косорлуков. – Самара, 2013. – 20.(1)с.

72. Айфичер Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: практический подход, пер. с англ. / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. - [2-е изд.]. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 992 с.

73. Закладний О.М. Вплив якості напруги живлення на електропривода з синхронними двигунами / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», – 2012. – Вип. 22. – С. 173-181.

74. Шпилов В.В. Об одном методе классификации объектов контроля радиоэлектронного оборудования / В.В. Шпилов // Контроль. Диагностика. – 2006. - №7. – С.25-29.

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

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

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

78. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.
79. Купер Дж. Вероятностные методы анализа сигналов и систем / Дж. Купер, А. Макгиллем. – М.: Мир, 1989. – 376 с.
80. Прохоренков А.М. Определение классификационных характеристик случайных процессов / А.М. Прохоренков, Н.М. Качала // Измерительная техника. - 2008. - №4. – С. 7-10.
81. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
82. Справочник по электрическим машинам в двух томах. Том I / [Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова]. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 456с.
83. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю.А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 240 с.
84. Денисенко Н. А. Автокорреляционные функции тока и напряжения в системах электроснабжения / Н. А. Денисенко, И. Хофман // Электричество. – 1985. – № 1. – С. 42–45.
85. Андреев М.В. Прикладний статистичний аналіз високочастотних випадкових процесів у дискретному часі / М.В. Андреев // Систем. дослідж. та інформ. технології. — 2002. — № 4. — С. 61-79.
86. Новицький І.В. Випадкові процеси: Навчальний посібник. — Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – 124с.
87. Мидлтон Д. Введение в статистическую теорию связи / Д. Мидлтон. - М.: Сов. Радио, 1961, т.1. - 160с.
88. Прохоров С. А. Аппроксимативный анализ случайных процессов / С. А. Прохоров. – Самара: Гос. аэрокосм. ун-т, 2001.- 380 с.
89. 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.

90. Прохоров С.А. Прикладной анализ случайных процессов. – Самара, 2007. - 585с.

91. Щелкалин В. Н. Системный анализ в прогнозировании взаимосвязанных случайных процессов / В. Н. Щелкалин– Технологический аудит и резервы производства Выпуск № 4 (13). том 5. 2013. – 18-19 с.

92. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. - М.: Наука, 1970. - 688 с.

93. Прохоров С.А. Аппроксимативный анализ вероятностных характеристик случайных процессов / С.А. Прохоров. - Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 13-17. - 209 с.

94. 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.

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

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

97. 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.

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

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

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

101. Закладний О.М. Вплив якості напруги живлення на електромеханічні системи із синхронними двигунами / О.М. Закладний, О.О. Закладний,

Т.Ю. Оборонов // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина.». Зб. тез доповідей. – К.: НТУУ «КПІ». – 2012. – С 72-79.

102. 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.

103. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами: автореф. дис. на здобуття канд. тех. наук: спец. 05.09.03. «електротехнічні комплекси та системи»/ О.О. Закладний. – Київ, 2011. – 20.(1)с.

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

105. Закладной А.Н. Влияние качества напряжения питания на работу синхронных двигателей / А.Н. Закладной, О.А. Закладной, Т.Ю. Оборонов, О.С. Ильчук // Проблемы недроиспользования. Сборник научных трудов, часть 1. – г. Санкт-Петербург: НМСУ «Горный». –2012 – С.161-163.

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

107. 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.

108. Мамалыга В.М. Энергосбережение в системах электропривода / В.М. Мамалыга; под. ред. А.В. Новосельцева, А.В. Праховника. – К.: Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 86 с.

109. 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.

110. Гольстрем В.А. Электрический справочник инженера / В.А. Гольстрем, Ю.Л. Кузнецов. – К.: Техніка, 1983. – 448 с.

111. Ключев В.И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1974. – 96 с.

112. 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.

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

114. Сниховский Е.Л. К вопросу формирования алгоритма диагностирования технического состояния парокompрессионных холодильных машин / Е. Л. Сниховский, А. С. Клепанда, И. И. Петухов, А. В. Шерстюк // Вісник НТУ «ХП». 2014. № 11(1054). С. 154-159

115. Алексеев В.В. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования: Учеб. Пособие / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, Э.А. Загривный. – СПб, 2006. – 58 с.

116. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: Навч. посібник / С.М. Довгань.– Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 137 с.

117. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. - Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

118. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / [О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін та ін.] – Кременчук, 2001. – 410 с.

119. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.

120. Островерхов М.Я. Моделирование электромеханических систем в Simulink: Навч. Посібник для студентів вищих технічних закладів / М.Я. Островерхов, В.М. Пижов. – К.: ВД “Стилос”, 2008. – 528 с.

121. Закладний О.М. Ознаки аварійних режимів роботи синхронних двигунів / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов // V Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина.». Зб. тез доповідей. – К.: НТУУ «КПІ». – 2013. – С. 40-44.

122. 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.

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

124. Закладний О.М. Діагностування енергоефективності синхронного електропривода / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. 3/2013 (23). – С. 26-32

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

126. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

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

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

129. Оборонов Т.Ю. Діагностування енергоефективності синхронного електропривода промислових установок протягом життєвого циклу / Т.Ю. Оборонов, О.М. Закладний, О.О. Закладний, В.О. Броницький // Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 36(1009). – С. 480-481.

130. Заміховський Л.М. Контроль технічного стану відцентрових насосних агрегатів систем підтримання пластового тиску / Л.М. Заміховський, Ю.В. Паньків / Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2012р. № 2(43). - 14 с.

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

132. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму «Розрахунок робочих параметрів синхронного електропривода за паспортними даними» / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов, І.В. Притискач, В.О. Броницький. – № 50408; зареєстр. 24.07.2013

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

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

135. Mehala N. Motor current signature analysis and its application in induction motor fault diagnostics / Neelam Mehala, Ratna Dahiya // International journal of systems applications, engineering and development. – 2007. - №2. – С. 29 – 35.

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

137. Schoen Randy R. Motor bearing damage detection using stator current

monitoring / Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farrukh Kamran, Robert G. Barthel // IEEE. Industry application magazine. – 1995. - №. 6. – С. 123-145.

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

139. 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>.

140. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока [Электронный ресурс] / В. Петухов, В. Соколов // Новости электротехники. - 2005. - №1(31). - Режим доступа до журн. : <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php>.

141. 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.

142. 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.

143. Закладний О.М. 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.

144. Печеник М.В. Визначення сукупності факторів впливу на енергоефективність насосних установок з синхронними двигунами на цукрових

заводах / М.В. Печеник Т.Ю. Оборонов, А.М. Терезюк // Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії». Збірник наукових праць. – м. Переяслав-Хмельницький: ДВНЗ «ПХДПУ ім. Григорія Сковороди» – 2016. – С. 256-261.

145. 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.

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

147. 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.

148. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Методика діагностування енергоефективності синхронного електропривода» / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов, В.О. Броницький. – № 50407; зареєстр. 24.07.2013.

149. Закладной А.Н. Модель функционального диагностирования энергоэффективности синхронного электропривода / А.Н. Закладной, О.А. Закладной, Т.Ю. Оборонов, Т.А. Сивцова // Проблемы недропользования. Сборник научных трудов, часть 1. – г. Санкт-Петербург: НМСУ «Горный». – 2013. – С. 219-223.

150. Паньків Ю.В. Організація вібраційного контролю відцентрових насосних агрегатів на кушових насосних станціях систем підтримання пластового тиску / Ю.В. Паньків // Нафтогазова енергетика. 2013. № 2(20). – 143-151 с.

151. 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>.

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

153. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин; Учеб. для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2001. — 327 с.

154. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

155. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – [2-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

156. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов. / В.А. Андреев . – [4-е изд.]. – М.: Выс. шк., 2006. – 639 с.

157. Закладний О.М. Методика розрахунків робочих параметрів синхронного двигуна за паспортними даними / О.М. Закладний, О.О. Закладний, Т.Ю. Оборонов // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – №2. – С. 14-19.

158. Туркин М.А. Исследование динамических свойств ЭМС с синхронным электроприводом [Текст] / М.А. Туркин // Сборник материалов ежегодной научно-технической конференции студентов и аспирантов факультета автоматизации и информатики ЛГТУ, Липецк - 2002 - С 46-48

159. Оборонов Т.Ю. Визначення технічного стану синхронного електропривода // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ», – 2014 – Вип. 25. – С.120-124.

ДОДАТКИ