

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**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

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації управління електротехнічними комплексами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент,  
**Печеник Микола Валентинович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», доцент кафедри автоматизації  
електромеханічних систем та електроприводу

**Офіційні опоненти** доктор технічних наук, професор,  
**Мазуренко Леонід Іванович**  
Інститут електродинаміки НАН України  
завідувач відділу електромеханічних систем

доктор технічних наук, професор,  
**Чорний Олексій Петрович**  
Кременчуцький національний університет імені  
Михайла Остроградського,  
директор інституту електромеханіки, енергозбереження  
і систем управління

Захист відбудеться „11” квітня 2017 р. о 16<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.20 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. № 22, ауд. № 316.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий „\_\_” березня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



А.М. Ковальчук

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Основними причинами низької якості функціонування синхронних електроприводів (СЕП) 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.

**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 прогнозової 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: [3, 8, 9] – аналіз сучасних методів регулювання якості електроенергії та їх вплив на СЕП НУ; [1, 11] – визначення електричних аварійних режимів електродвигунів, та ознак які на них вказують; [5, 9, 10] – діагностування енергетичного стану НУ з СД; [7, 12] – запропоновано проводити таксонометричне оцінювання енергетичного та технічного стану НУ з СД; [4, 13] – запропонована методика визначення енергетичного стану електроприводів з синхронними двигунами із використанням миттєвих значень струмів і напруг; [2, 14] – розроблена

еталонна модель та методика розрахунку параметрів СД за паспортними даними; [6] – 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” (смт. 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведено загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність її теми, сформульовано мету й завдання досліджень, зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Вказано на зв’язок роботи з науковими програмами та темами, висвітлено особистий внесок здобувача та наведені його публікації, в яких викладений основний зміст дисертаційної роботи.

**У першому розділі** на основі аналізу виробництва визначено фактори впливу на енергетичний і технічний стан насосних установок з синхронними двигунами. Проведено аналіз методів і засобів діагностування СЕП НУ та на його основі побудовано класифікаційну схему, яка показує доцільність застосування діагностування показників енергетичного та технічного стану і використовує як діагностичні ознаки – поточні значення струмів і напруг, а для уточнення залишкового ресурсу – температуру середовища навколо установки. Значний внесок з питань діагностування і дослідження характеристик електропривода зробили видатні вчені М.Г. Баширов, О.С. Бешта, О.Д. Гольдберг, В.Б. Клепиков, М.Ф. Котеленець, В.Ю. Кучерук, А.В. Луговий, Л.І. Мазуренко, В.В. Овчаров, С.М. Пересада, М.Г. Попович, І.В. Прахов, О.В. Садовий, В.Ф. Сивокобиленко, І.А. Сиромятников, Д.Й. Родькін,

В.М. Чермалих, О.П. Чорний, Conrad U. Brunner, F. Carlsson, E. O. Schweitzer.

Діагностування енергетичного та технічного стану СЕП НУ проводиться для забезпечення ефективного використання фактичного ресурсу електротехнічного комплексу за умови найменшого споживання електроенергії, запобігання аварійним режимам шляхом контролювання показників якості електроенергії.

У другому розділі встановлено фактори які спричиняють найбільший вплив на енергетичний і технічний стан СЕП НУ. З'ясовано, відхилення яких параметрів спричиняє погіршення енергетичного й технічного стану та зменшує ресурс електротехнічної системи.

Узгодженість оцінок експертів за коефіцієнтом конкордації для задачі оцінювання поточного стану СЕН НУ щодо важливості факторів, що впливають на енергетичний та технічний стан насосних установок з СД і визначається за формулою:

$$W = \frac{12 \cdot D}{m^2(k^3 - k)}, \quad (1)$$

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;  $k$  - кількість показників.

Візуалізація факторів впливу на енергетичний та технічний стан насосних установок з синхронними двигунами здійснюється за допомогою діаграми Ісікави (рис. 1). Визначено 12 наступних показників:  $Y1$  – вплив відхилення напруги живлення насосних установок з синхронними двигунами;  $Y2$  – відхилення ККД та  $\cos\phi$  насосних установок з синхронними двигунами від паспортних значень;  $Y3$  – вплив вологості середовища навколо насосних установок з синхронними двигунами;  $Y4$  – вплив вібрації насосних установок з синхронними двигунами;  $Y5$  – вплив температури експлуатації насосних установок з синхронними двигунами;  $Y6$  – якість ремонтів насосних установок з синхронними двигунами;  $Y7$  – вплив запиленості середовища навколо насосних установок з синхронними двигунами;  $Y8$  – вплив несинусоїдальності напруги

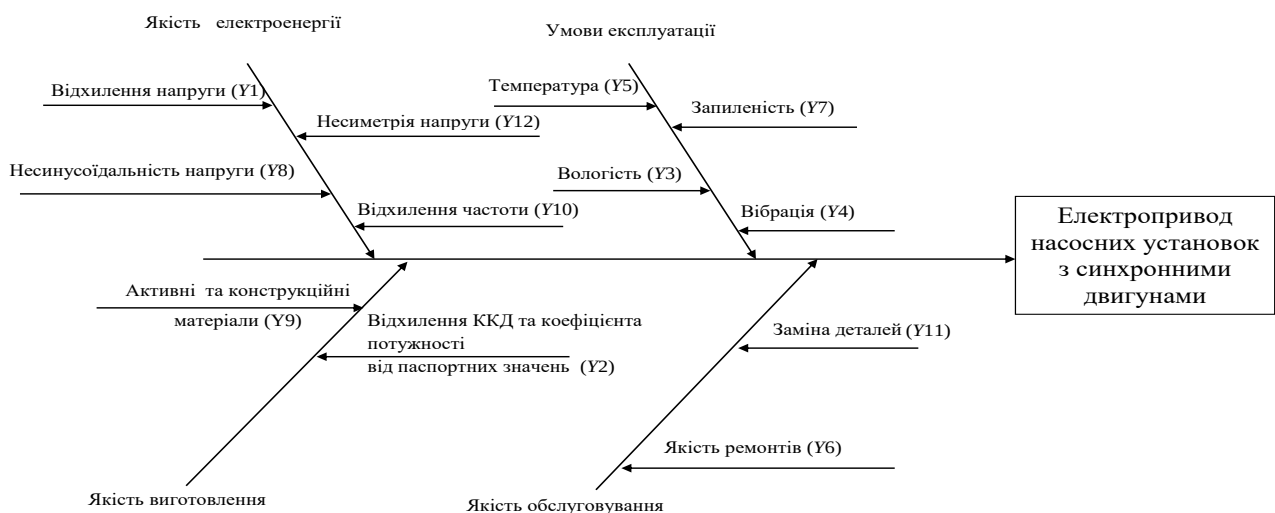


Рис. 1. Діаграма Ісікави факторів впливу на енергетичний та технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами

живлення насосних установок з синхронними двигунами; Y9 – якість конструкційних та активних матеріалів насосних установок з синхронними двигунами; Y10 – вплив відхилення частоти живлення насосних установок з синхронними двигунами; Y11 – якість заміненних деталей та змінених параметрів насосних установок з синхронними двигунами; Y12 – вплив несиметрії напруги живлення насосних установок з синхронними двигунами.

Графічне представлення за діаграмою Парето для визначення "ваги" кожного показника щодо визначення факторів впливу на енергетичний та технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами наведено на рис 2.

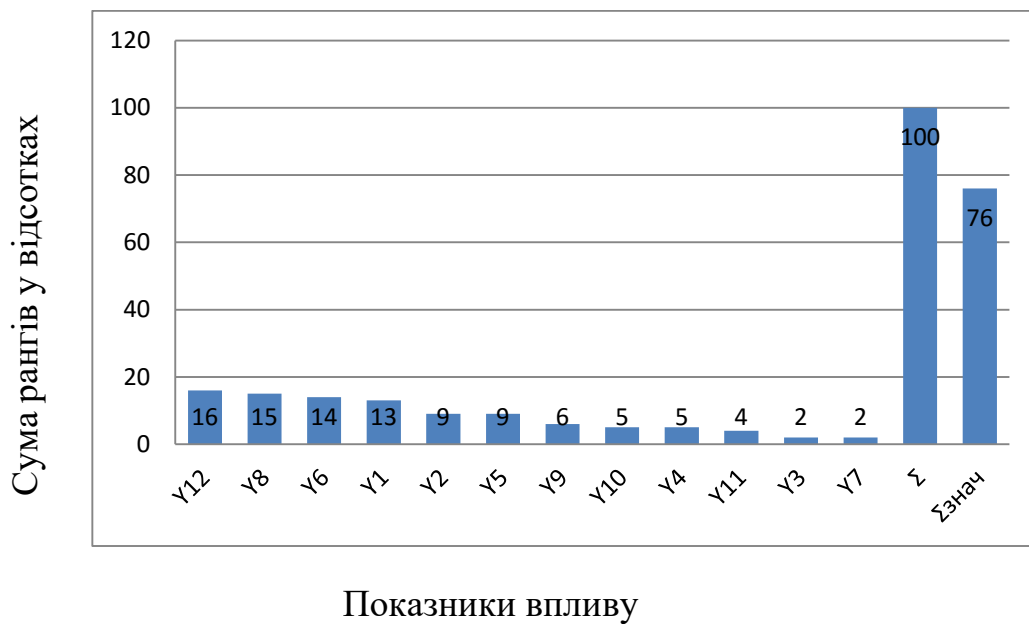


Рис. 2. Діаграма Парето показників впливу на енергетичний та технічний стан електроприводу насосних установок з синхронними двигунами

За результатами аналізу сукупності відібраних показників зроблено висновок, що найбільший вплив на енергетичний та технічний стан СЕП НУ спричиняють, несиметрія напруги живлення – Y12; несинусоїдальність напруги живлення – Y8; якість технічного обслуговування і ремонтів – Y6; відхилення напруги живлення – Y1; режим навантаження – Y2; умови експлуатації – Y5; якість активних та конструкційних матеріалів двигунів – Y9.

Визначені ознаки аварійних режимів синхронних двигунів за допомогою яких визначаються негативні фактори впливу на НУ з СД.

Для моделювання випадкових процесів електроспоживання НУ з СД і апроксимації автокореляційних функцій використано загасаючі експонентні і експонентно-косинусні вирази (табл. 1). Розрахунок коваріаційної функції проводиться за формулою:

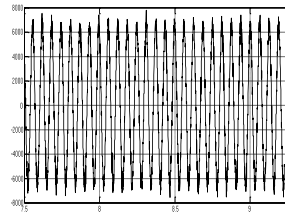
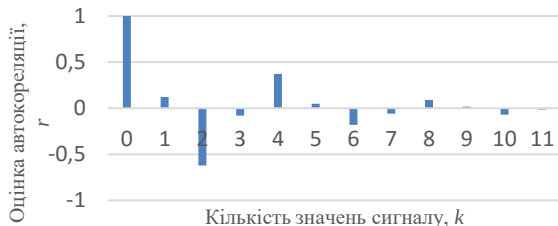
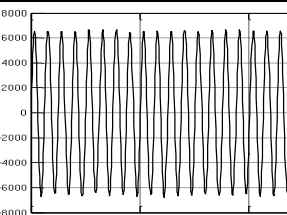
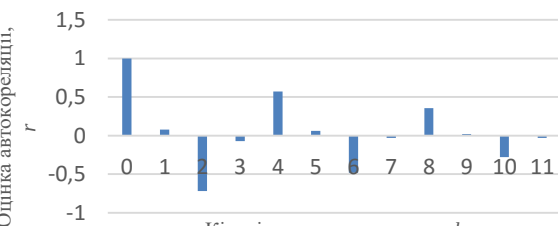
$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (z_t - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z}), \quad (2)$$

де  $k=0, 1, 2, 3, \dots, k$  – вибіркова оцінка автоковаріації;  $\bar{z}$  – середнє значення часового ряду струмів та напруг;  $z_t$  – миттєве значення струмів та напруг;  $N$  – об'єм вибірки.



Таблиця 1.

Автокореляційні функції та види моделей процесів струмів та напруг НУ з СД

| № | Назва сигналу                                           | Сигнал                                                                            | Кореляційна функція та вид моделі                                                                                                                                                   |
|---|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Сигнал струму<br>фази «А»<br>двигуна<br>СД2-74/33-8У3;  |  |  $\rho_x(\delta) = e^{-\alpha \delta } \cos \omega_0 \delta$                                      |
| 2 | Сигнал напруги<br>фази «В»<br>двигуна<br>СД2-85/47-8У3; |  |  $\rho_x(\tau) = e^{-\alpha \tau } (\cos \omega_0 \tau - \alpha / \omega_0 \sin \omega_0  \tau )$ |

Обчислення оцінок автокореляційної функції  $r_k$  при затримці  $k$  виконується за наступною формулою:

$$r_k = \frac{c_k}{c_0}, \quad (3)$$

де  $c_0$  – автоковаріаційна функція при  $k=0$ .

Для того щоб діагностувати сигнали струмів і напруг у розділі запропоновані математичні моделі індивідуальних графіків електричних навантажень (ГЕН) на основі методу цифрового рекурсивного формуючого фільтра дозволяють моделювати стаціонарні стохастичні процеси заздалегідь невизначеної тривалості та заощаджувати ресурси установок. Розглянуті в роботі графіки визначення кроку дискретизації доцільно використовувати в практиці досліджень режимів роботи насосних установок з СД із урахуванням реальних робочих режимів.

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

$$z = \exp \left[ -360 \left( K_{2U}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right) \right], \quad (4)$$

де  $K_{2U}$  – коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності;  $U_v$  – напруга несинусоїдальності;  $v$  – порядок гармонічної складової напруги. Середнє значення відносної зношеності ізоляції СД НУ за період часу  $T$

$$\bar{\chi} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\theta}{\theta_H} dt, \quad (5)$$

де  $\theta = ce^{h\tau}$  – зношеність ізоляції в умовах змінного навантаження;  $\theta_H$  – зношеність ізоляції в умовах постійного навантаження.

Відповідно до типового ГЕН насосної установки в умовах неякісної напруги живлення і зміни навантаження виконано моделювання роботи СД потужністю 250 кВт показало, що відносне зношення є діагностичною ознакою (рис. 3).

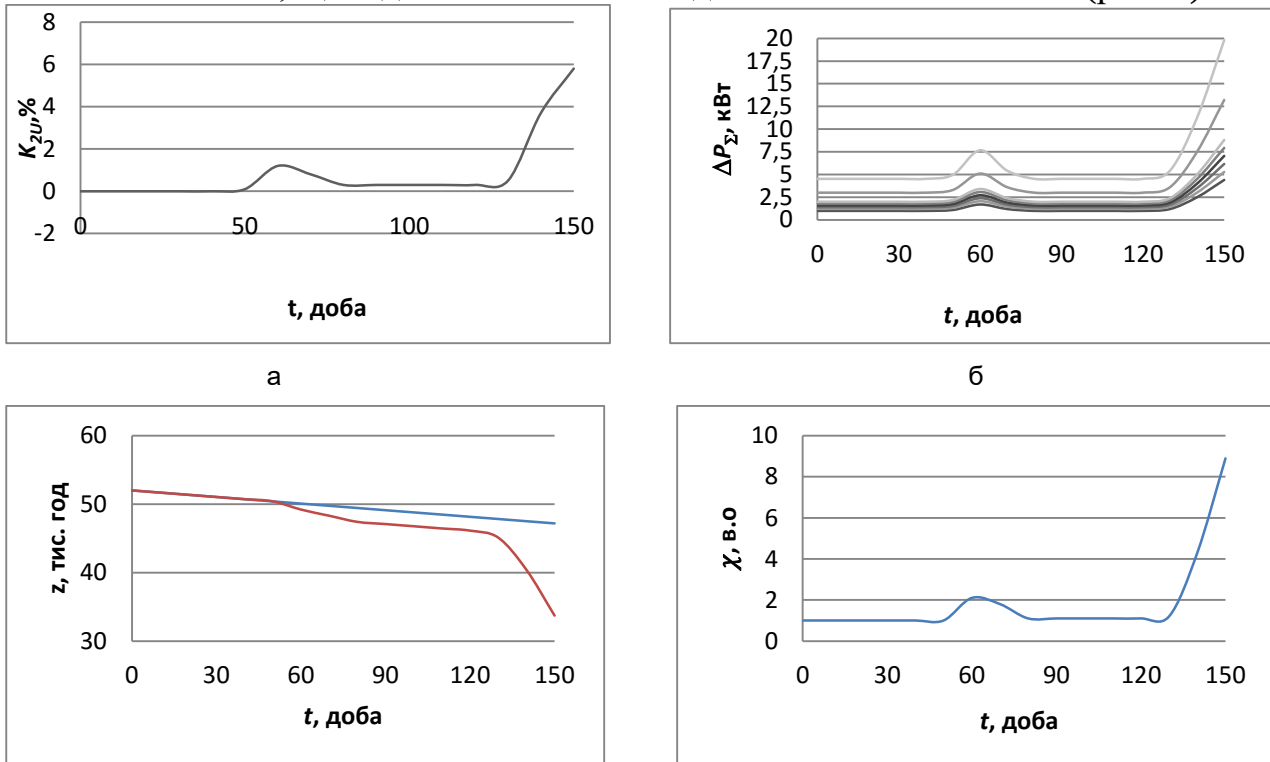


Рис. 3. Результати моделювання характеристик СД насосної установки в умовах несиметрії напруги живлення: а - коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності( $K_{2U}$ ); б - повні втрати за годинами добового ГЕН( $\Delta P_{\Sigma}$ ); в - залишковий ресурс( $z$ ); г - відносне зношення ( $\chi$ )

Відносне зношення у даному випадку збільшується в 3,2 рази, а залишковий ресурс за найбільшої несиметрії зменшується з 760 днів до 318. Математичне моделювання режимів роботи синхронного електроприводу насосної установки відповідно до експериментального ГЕН (рис. 4) в режимах неякісної напруги

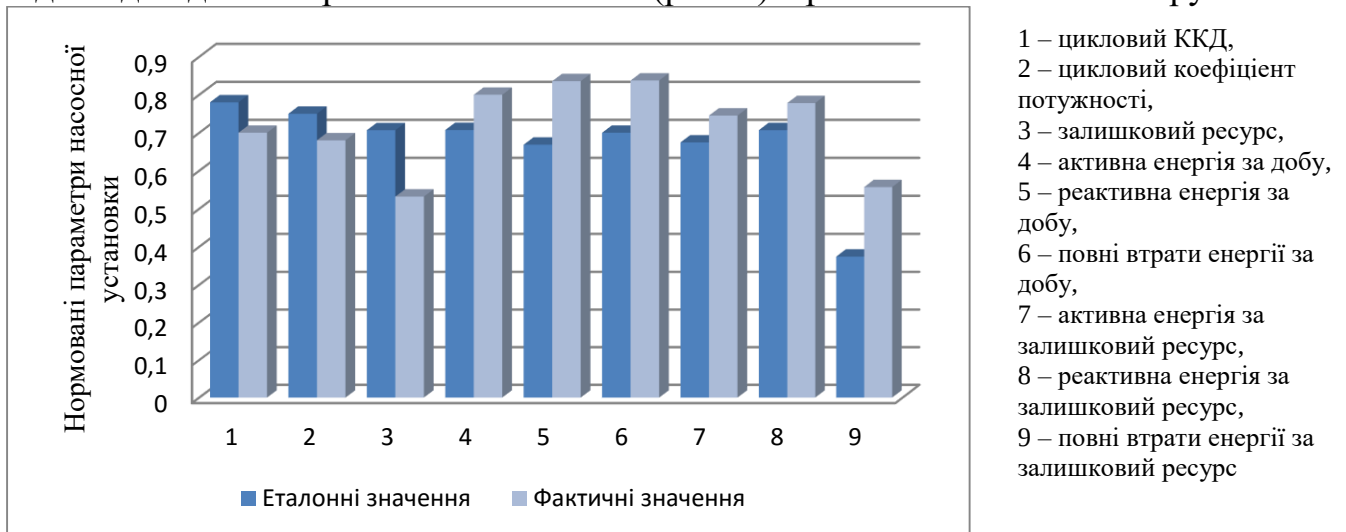


Рис. 4. Результати математичного моделювання параметрів насосної установки 250 кВт

дозволило підтвердити адекватність моделей. Дослідження СЕП НУ:  $P_H = 250$  кВт, з нормованим терміном служби 30 000 год. Усталене відхилення напруги лежить у межах 5 %, коефіцієнт несиметрії – 1 %, зношення – 15 640 год. Як видно з рис. 4, застосування діагностування енергетичного та технічного стану ЕП НУ з СД дозволяє визначати ефект від зниження споживання активної енергії до 12 %, реактивної – до 25 %, підвищення в 1,8 разів залишкового ресурсу (до паспортного його значення), підвищення ККД до 7 %, коефіцієнта потужності – до 8,5 %, а також зниження втрат до 13 %.

Встановлено, що для визначення технічного стану та механічних несправностей насосної установки з СД можливо використовувати методи складових втрат, і спектрального аналізу струмів, і напруг та показник відносної зношеності ізоляції.

У третьому розділі розроблено математичні моделі та запропонований на їх основі алгоритм та методики діагностування СЕП НУ дозволяють визначити їх технічний і енергетичний стан за результатами вимірювань струмів і напруг. Модель діагностування СЕП приведена на рис. 5.

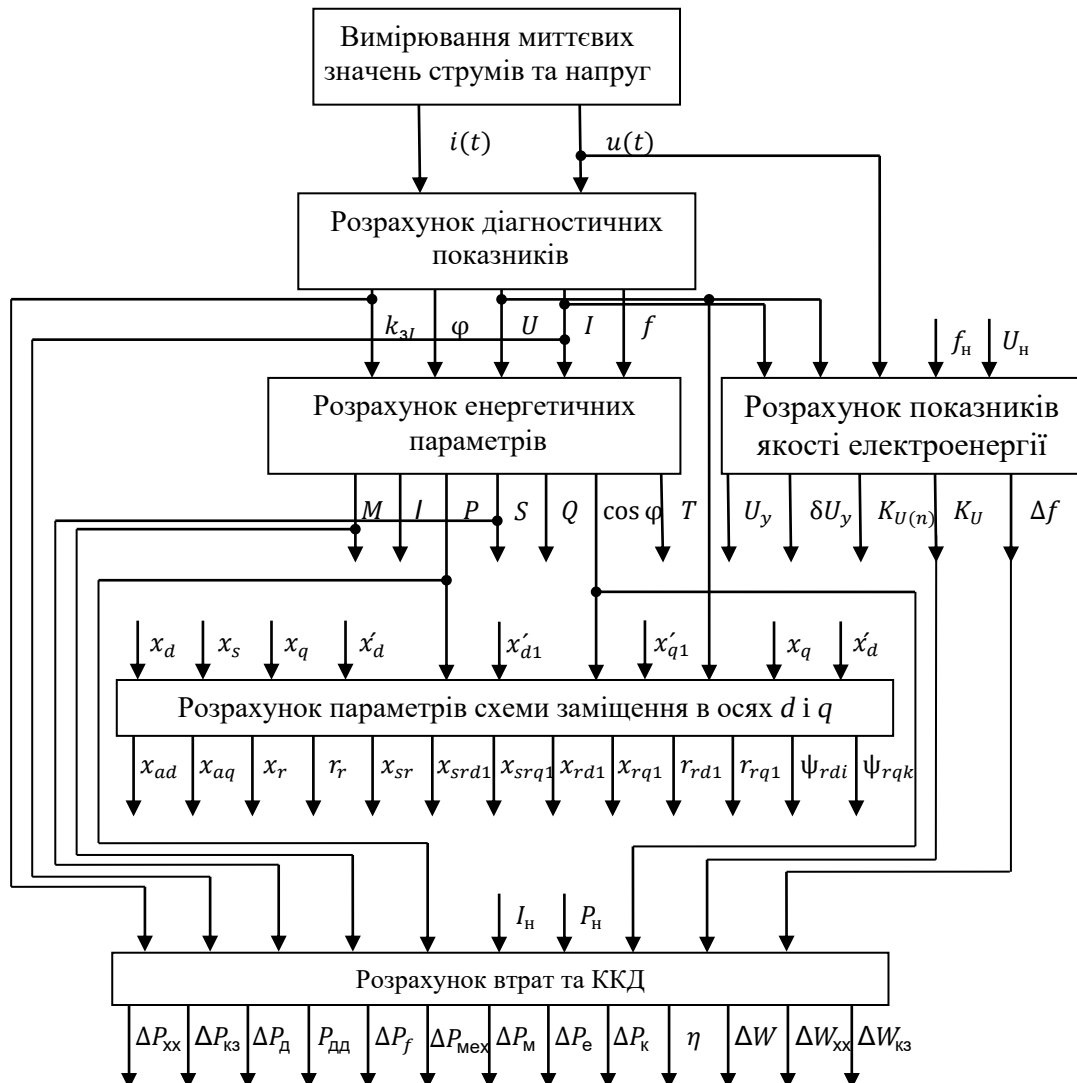


Рис. 5. Структурна схема моделі діагностування енергетичного стану синхронного електроприводу насосних установок

Математична модель (рис. 5) розроблена з урахуванням якості напруги живлення (відхилення, несиметрія та несинусоїдальність напруги, відхилення частоти), величини і характеру навантаження, додаткових втрат через несинусоїдальність та несиметрію напруги. Наприклад, розрахунок повних втрат проводився за формулою:

$$dP_S = dP_{xx} + dP_{кз} + dP_D + dP_{дд}, \quad (6)$$

де  $dP_{xx} = \frac{r_f I_f^2}{\eta_f} + C_1 n^\alpha + C_2 f_1^{1,5}$  – постійні втрати, або втрати холостого ходу;

$dP_{кз} = k_3^2 \Delta P_{кн}$  – змінні втрати або втрати короткого замикання;

$dP_D = 3I_H^2 r_{2p} k_{3I}^2$  – додані втрати;  $dP_{дд} = k_M P \sum_{n=2}^m K_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} + dP_D \frac{U_{M2}^2}{Z_{2M}^2}$  додаткові втрати, зумовлені несиметрією та несинусоїдальністю. Залежність ККД від коефіцієнтів завантаження  $k_3$ , потужності  $\cos \varphi$  та впливу показників якості напруги живлення:

$$\eta = 1 - \frac{dP_{xx} + dP_{кз}}{k_3 S_H \cos \varphi + dP_{xx} + dP_{кз} + dP_{дд}}. \quad (7)$$

Адекватність розроблених моделей і методик діагностування СЕП НУ підтверджують проведені дослідження впливу зниження якості напруги живлення та величини навантаження на енергетичні характеристики СД (рис. 6).

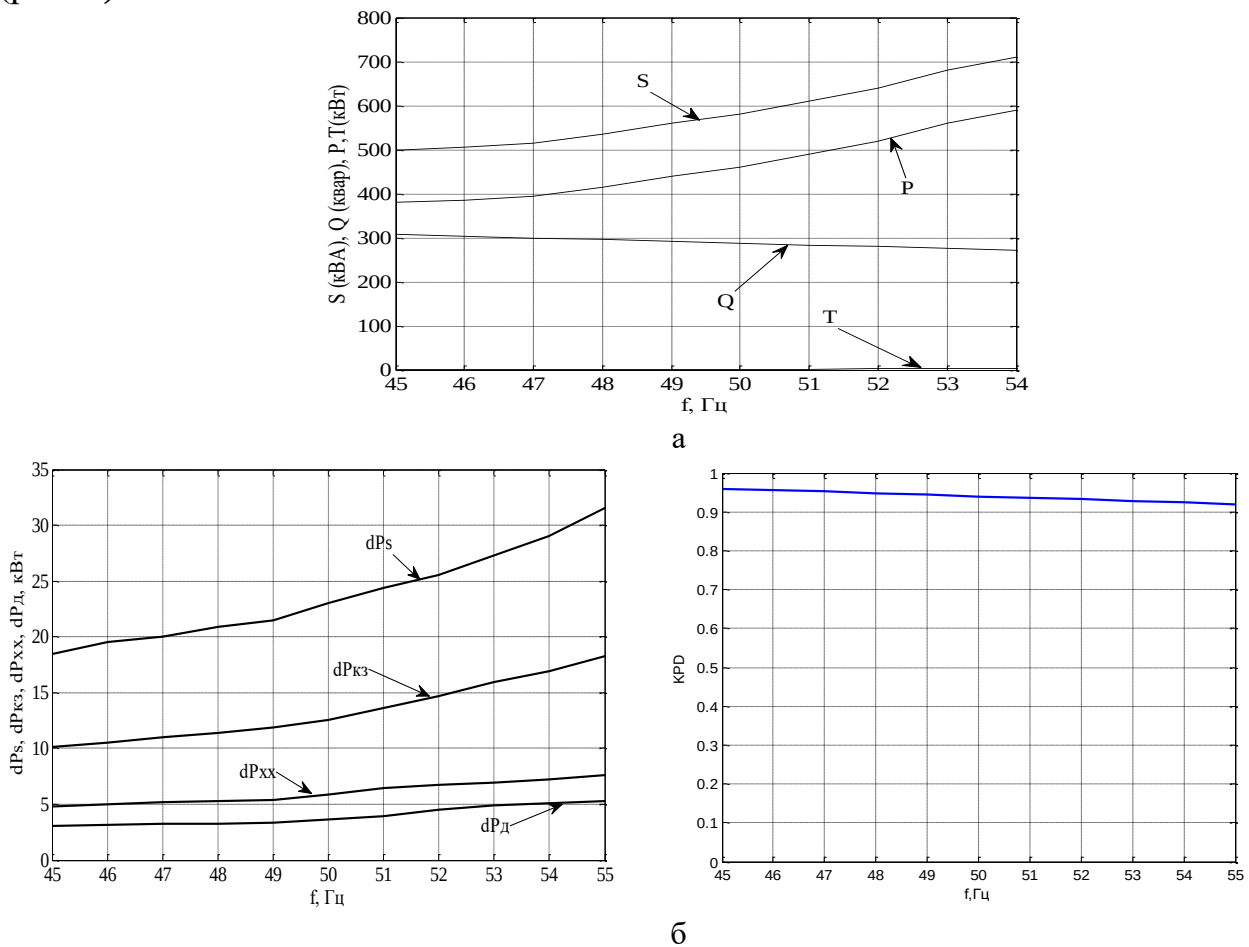


Рис. 6. Залежності параметрів СД від відхилення частоти мережі при номінальних завантаженнях і напруги: а – режим енергоспоживання ( $P, Q, S, T$ ), б – процес енерговикористання ( $dP_S, dP_{кз}, dP_{xx}, dP_D, \eta$ )

Модель діагностування дозволяє проводити значні обсяги досліджень, пов'язаних з розв'язуванням практичних задач розрахунку й аналізування енергетичних характеристик для підвищення якості функціонування НУ з СД.

Порівняння даних показує (рис. 7), що моделі дозволяють з достатньою для практики точністю розрахувати ККД СД в залежності від завантаження. Максимальне значення відносної похибки визначення ККД – 2 % для еталонної моделі двигуна (ЕМД) і 3,5 % для моделі діагностування параметрів процесів перетворення електроенергії (МДЕ), а коефіцієнта потужності – 3,4 % та 5,7 % відповідно. Відносна похибка розрахунку параметрів і характеристик СД не перевищує 6 %.

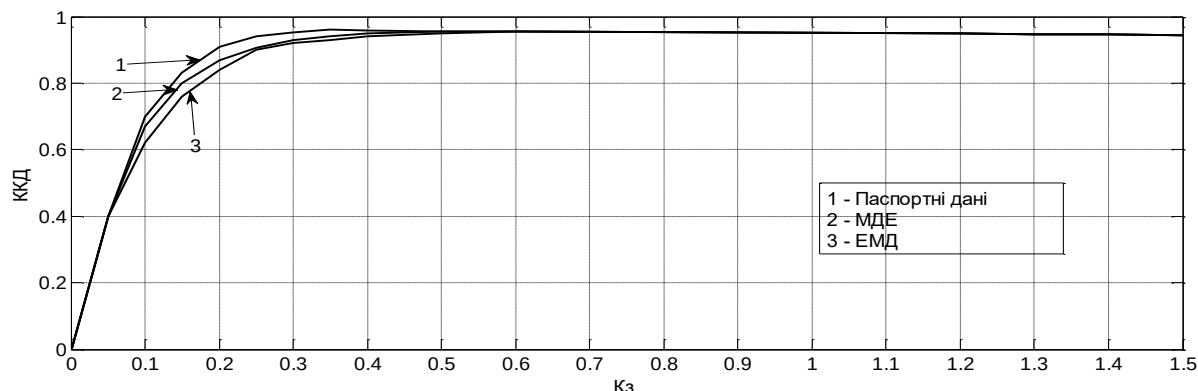


Рис. 7. Результати моделювання коефіцієнта корисної дії СД типу СД2-85/47-8УЗ в залежності від завантаження

Для виявлення стану роботи СЕП НУ запропоновано використання таксонометричного аналізу, який дозволяє зробити висновок про те, в які із моментів періодів діагностування показники якості напруги живлення негативно впливають на електропривод насосної установки. Для цього побудуємо матрицю  $P$ , в якій  $s$ -й вектор-стовпець елементів – час діагностування установки, а  $i$ -й вектор-рядок елементів – признаки оцінювання досліджуваної установки (несиметрія, несинусоїдальність, відхилення напруги, відхилення частоти напруги живлення).

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1i} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{s1} & \dots & P_{si} & \dots & P_{sn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{b1} & \dots & P_{bi} & \dots & P_{bn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

У зв'язку з тим, що ознаки оцінювання мають різні фізичні властивості, їх було пронормовано за шкалою від 0 до 1.

Мірою близькості між режимами роботи СЕП була вибрана евклідова відстань, що визначалась за формулою:

$$D_{i0} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{bi} - P_{b0})^2}, \quad (9)$$

де  $P_{bi}$  – поточні показники якості напруги живлення;  $P_{b0}$  – нормальний режим роботи електроприводу.

Чим менше значення евклідової відстані  $D_i$ , тим менший негативний вплив спричиняють показники напруги живлення на СЕП НУ і вище її залишковий ресурс. Візуалізація результатів розрахунків впливу якості напруги живлення на повну енергію СД НУ 1Д1250-125 приведені на дендрограмі рис. 8.

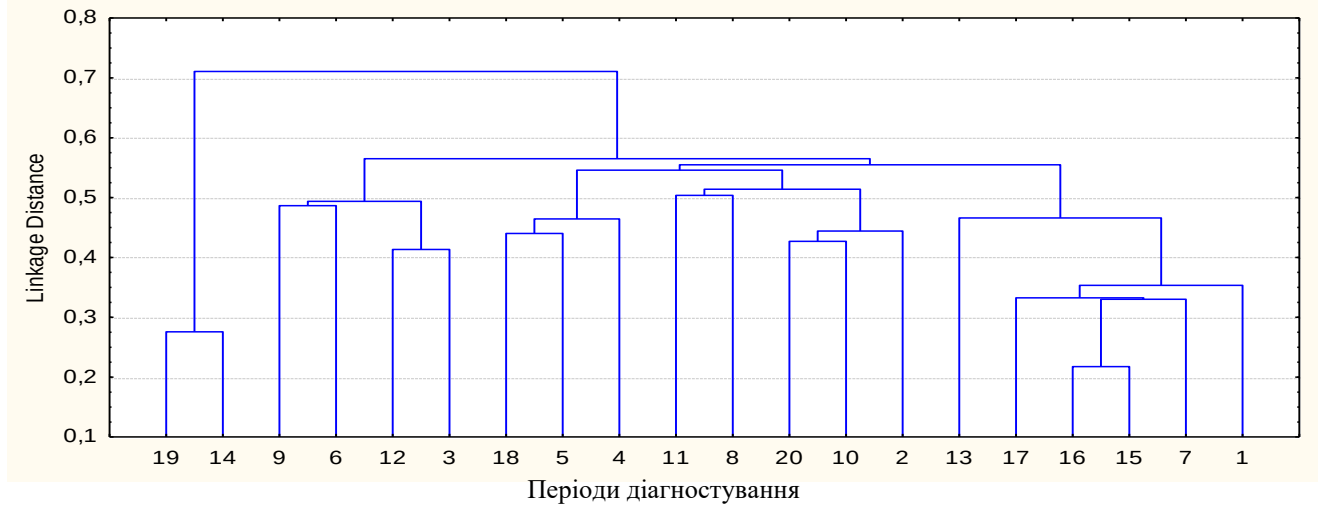


Рис. 8. Дендрограма сумарного впливу показників якості напруги живлення на повну енергію СД НУ 1Д1250-125

З дендрограми видно, що налічується 3 класи роботи електроприводу, тобто нормальний (18, 5, 4, 11, 8, 20, 10, 2, 13, 17, 16, 7, 1), передаварійний (9, 6, 12, 3) та аварійний (19, 14) режими роботи. Робота СЕП НУ в аварійному режимі відбувалась при відхиленні напруги, що становило 13 %.

Для комплексного оцінювання режиму роботи СЕП НУ запропоновано таксонометричний показник:

$$D = 1 - D_{i0}/D_0, \quad (10)$$

де  $D_0$  визначається за формулою:

$$D_0 = \sum_{i=1}^N \frac{D_{i0}}{N} + \beta \cdot S_0, \quad (11)$$

де  $S_0$  – середньоквадратичне відхилення евклідових відстаней показників якості напруги живлення;  $\beta$  – коефіцієнт надійності (приймається 2,5).

Зведені таксонометричні показники впливу якості напруги живлення на енергетичні показники синхронних електроприводів насосних установок наведені в табл. 2

Таблиця 2

Таксонометричний показник впливу якості напруги живлення на енергетичні показники синхронних електроприводів 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 2 можна зробити висновок, що найбільший негативний вплив на енергетичні показники діагностованої НУ 1Д1250-125 спричиняє саме відхилення якості напруги живлення.

У четвертому розділі наведено перевірку основних теоретичних положень дисертаційної роботи на основі експериментальних досліджень та результати розробки комплексу програмного забезпечення.

З використанням датчиків струму, напруги, температури, комутаційного пристрою з аналогово-цифровим перетворювачем та алгоритмів і програм “Еталонна модель СД”, “Діагностування параметрів СД”, “Визначення залишкового ресурсу СД” створено мобільний комплекс для поточного діагностування енергетичного та технічного стану НУ (рис. 9).

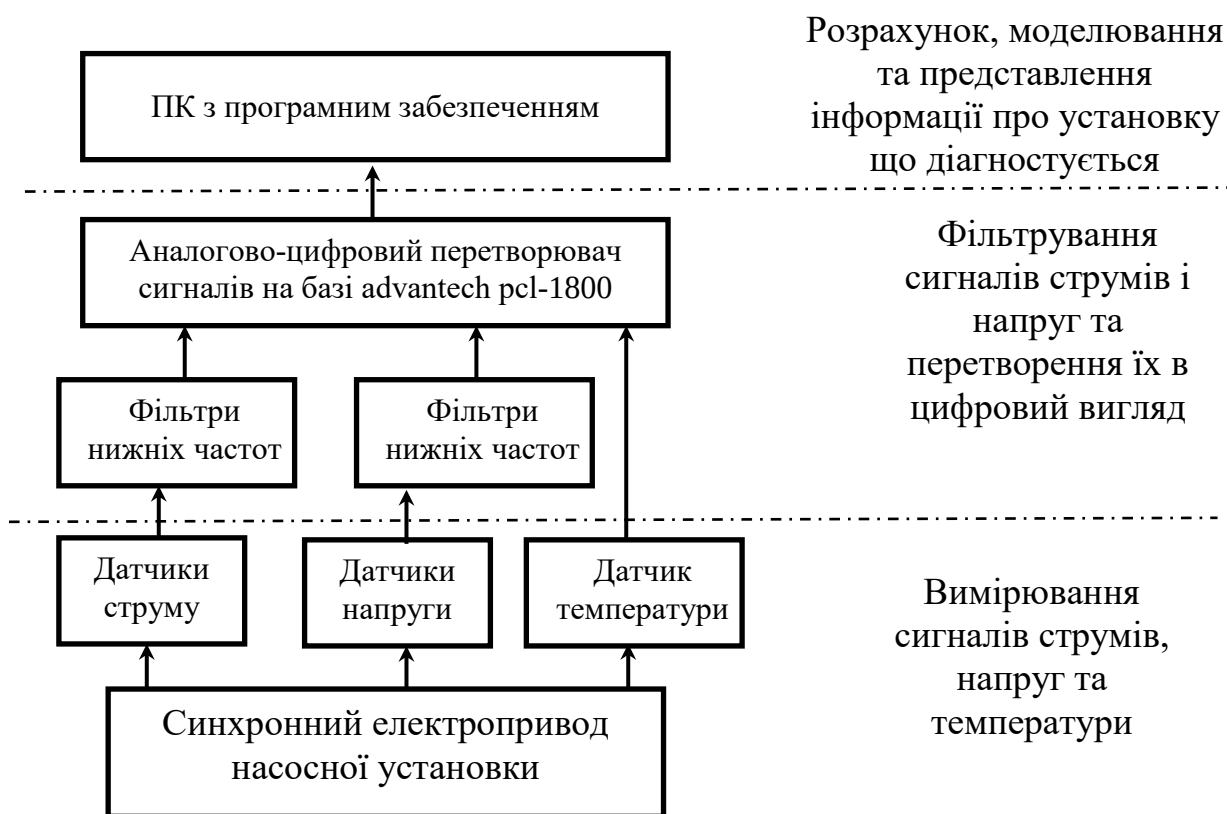


Рис. 9. Структурна схема мобільного комплексу для діагностування енергетичного та технічного стану СЕП НУ

Для реалізації на апаратному рівні поставлених завдань розроблено схему системи діагностування енергетичного та технічного стану СЕП НУ (рис. 10). У дисертаційній роботі використовується наступна послідовність дій для діагностування СЕП НУ: вимірювання миттєвих значень струмів та напруг; розрахунок діагностичних показників; розрахунок показників якості електроенергії (ПЯЕ); спектральний аналіз струмів та напруг; розрахунок енергетичних параметрів (процес енергоспоживання); діагностика технічного стану; діагностика енергетичного стану; визначення залишкового ресурсу; розрахунок ККД, споживаної енергії та її втрат (процес енерговикористання); встановлення терміну наступного діагностування.

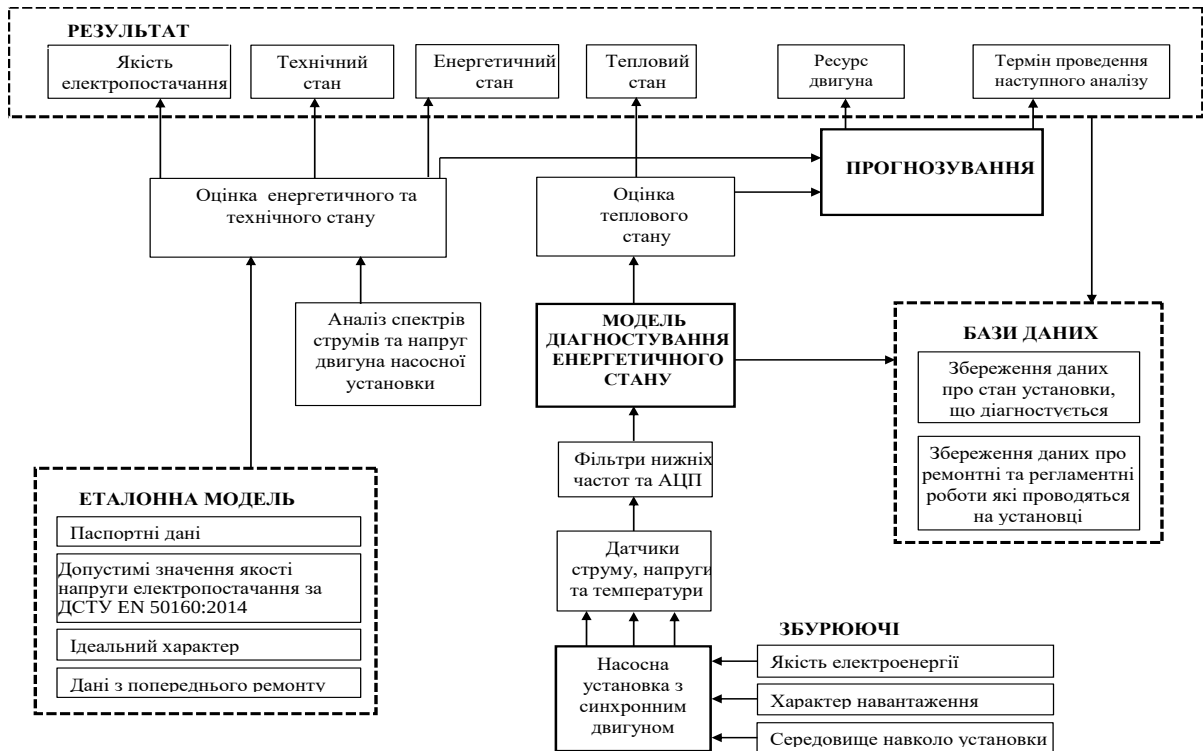


Рис. 10. Структурна схема системи діагностування енергетичного та технічного стану СЕП НУ

За результатами вимірювання проводиться розрахунок енергетичних параметрів СЕП. Після проведення аналізу отриманих результатів визначаються рівні аварійних режимів, проводиться діагностування технічного та енергетичного стану, прогнозується залишковий ресурс електродвигуна. Мобільний комплекс використовується також для роботи в режимі комп'ютерного моделювання та при проведенні експериментальних досліджень.

Результати аналітичних досліджень процесу перетворення енергії насосною установкою системи водопостачання з СД типу СД2-74/33-8У3 потужністю 250 кВт наведено на рис. 11. Для моделювання роботи установки використано експериментальний ГЕН в умовах неякісної напруги живлення.

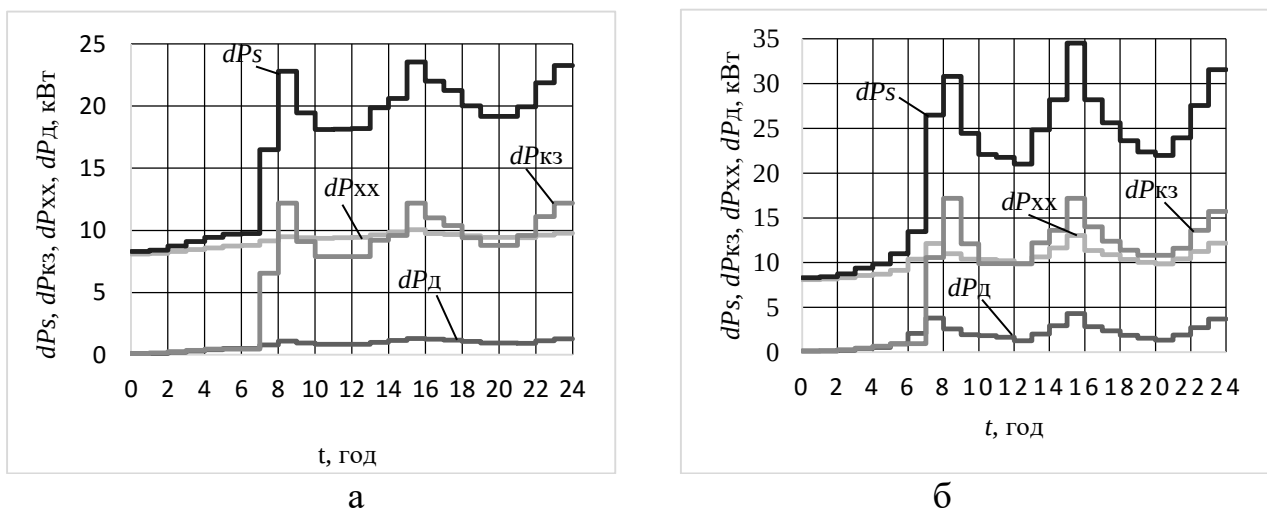


Рис. 11. Добові графіки втрат СД в умовах зміни навантаження у випадку:  
а – відсутність відхилень ПЯЕ, б – вплив граничних значень ПЯЕ.



Як видно з рис. 11, при граничних значеннях ПЯЕ втрати двигуна зросли майже в 1.5 рази. Експериментально перевірені алгоритми, методики, моделі та програми діагностування енергетичного та технічного стану насосних установок з синхронними двигунами, що розроблені для мобільного комплексу. З використанням мобільного комплексу проводились експерименти: з виявлення несправностей обмоток СД НУ типу ЕСС-54-4У2 ( $P_H = 5$  кВт,  $n_H = 1500$  об/хв,  $U_H = 230$  В,  $\eta_H = 80,2$  %,  $\cos\phi_H = 0,8$ ), і збільшення навантаження двигуна до його відмови (рис. 12).

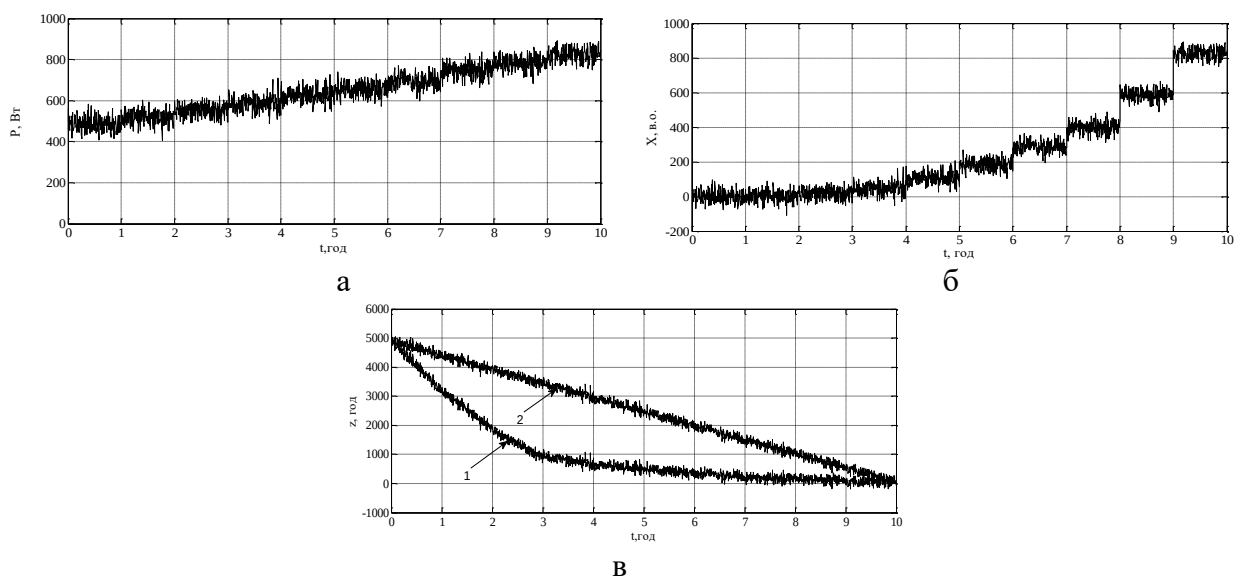


Рис. 12. Графіки зміни в часі а – сумарних втрат потужності, б – рівень зношування ізоляції, в – залишковий ресурс роботи двигуна (1 – експериментальне значення; 2 – прогнозоване)

В дослідях було забезпечено навантаження двигуна відносно початкового номінального значення з дискретністю у 5 %. Кожен рівень навантаження тривав одну годину. Результати порівняння експериментальних і теоретичних досліджень приведені на рис 12.

Використання упереджувального контролю на основі прогнозованих оцінок дозволило визначити вихід з ладу СД в кінці 10 години роботи за даних умов експерименту. Реально відмова двигуна відбулась наприкінці 12 години. За експериментом відносна похибка прогнозування залишкового ресурсу, не перевищує 18 %.

Запропоновані методики, алгоритми, програми для діагностування електроприводу насосних установок з синхронними двигунами використано для прогнозування залишкового ресурсу та виявлення порушень технологічного режиму електротехнічного комплексу впроваджені на підприємствах ТЗОВ СП «НИВА» (Дубенський цукровий завод) м. Дубно Рівненської обл. (акт впровадження від 03.09.2013), ВП «Жданівський цукровий завод» с. Жданівка Вінницької обл. (акт впровадження від 25.09.2015) та у навчальному процесі кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами КПП ім. Ігоря Сікорського (акт впровадження від 12.10.2016). Очікуваний економічний ефект від впровадження на виробництві може

становити до 400 тис. грн. на ТзОВ СП «НИВА» та до 250 тис. грн на ВП «Жданівський цукровий завод».

## 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.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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 «ХПІ». – 2013. – № 36(1009). – С. 480-481 (включено у довідник міжнародної наукометричної бази даних *Ulrich's Periodical Directory*).

5. 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 (включено у довідник міжнародної наукометричної бази даних *Ulrich's Periodical Directory та Index Copernicus*).

6. 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.

7. 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) – Р. 90 (*Іноземне видання*)

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

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

#### АНОТАЦІЯ

**Оборонов Т.Ю.** Моделі і засоби діагностування енергетичного і технічного стану синхронного електроприводу насосних установок. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ, 2017.

Дисертація присвячена підвищенню якості функціонування синхронного електроприводу насосних установок (СЕП НУ). Рішення які пропонуються в

роботі полягають у контролюванні в реальному часі НУ, та обслуговуванні за фактичним станом установки під час експлуатації. Діагностування поєднує методи аналізування миттєвих значень струмів і напруг СЕП, температури навколо установки й дозволяє визначати енергетичний і технічний стан електротехнічної установки та прогнозувати її залишковий ресурс. Створені програмно-апаратні засоби діагностування СЕП НУ – моделі, методики, алгоритми, програми та схемно-технічні рішення враховують дію експлуатаційних впливів – якість напруги живлення, режим навантаження і температуру навколо механізму. Працездатність та коректність розроблених моделей, методик, алгоритмів і програм підтверджено лабораторними експериментами і впровадженням.

Ключові слова: електромеханічна система, синхронний двигун, насосна установка, показники якості електроенергії, графік електричного навантаження, енергетичний стан, технічний стан.

### ABSTRACT

**Oboronov T.** Models and diagnostic tools of energy and technical condition of synchronous electric drive of pumping units. – Manuscript.

Ph.D. thesis in Engineering Science with a degree 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute " MES of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis work deals with improving of quality of operation of synchronous electric drive pumping units (SED PU). Proposed by the work solutions lie in real-time PU controlling and condition-monitored maintenance (CMM) of the unit during operation. Undertaken researches of the influence of decreasing of quality of input voltage (voltage deviation, frequency deviation, voltage unbalance and voltage nonsinusoidality) and the value of the mechanical load on the energy characteristics of synchronous motors and their analysis confirm validity and adequacy of the developed models and methods of functional diagnostics of electric drive of pumping units.

In this (thesis) it was developed the methodology and software complex for determination of reference model of synchronous motors which allows to detect type of the dependence of coefficient of efficiency on the load intensity, calculate the parameters of equivalent circuit and energy characteristics for rated operating condition of electric drive. It was specified the diagnostic features of electrical and mechanical emergency operation modes of pumping units with synchronous motors which allow to determine the pattern of damage and fulfill their timely repair without disruption of the process.

Diagnostics combines methods of analysis of instantaneous values of current and voltage of SED, temperature around the unit and allows to determine energy and technical condition of SED PU and predict remaining life time. Method of spectral-current analysis allows to detect mechanical damage of the motor and connected to it mechanism in advance. Created soft and hardware of diagnostic of PU with SED –

models, methods, algorithms, programs and system technical (або) engineering solutions take into account the effects of the operation impacts – quality of input voltage, load condition and temperature around mechanism.

Created portable hardware-software complex allows to automatize the process of functional diagnostics of energy efficiency of pump units. It is implemented on the basis of current sensors, voltage, temperature, commutator switch with analog-to-digital converter, PC, developed algorithms and programs "SM reference model", "Diagnostics of SM parameters", "Determination of the remaining life time of SM").

Implementation of developed tools of functional diagnostics of synchronous electric drive of pumping units will allow to save up around 10% of consumed electricity during the average operating life cycle 10 years, that is about twice bigger than its price and also will allow to save up to 50% of the service and repairs costs.

The efficiency and validity accuracy of the developed models, methods, algorithms and programs are confirmed by laboratory experiments and implementations.

Keywords: electromechanical system, synchronous motor, pump unit, electric power quality indexes, electrical load schedule, energy condition, technical condition.

## **АННОТАЦИЯ**

**Оборонов Т.Ю.** Модели и средства диагностирования энергетического и технического состояния синхронного электропривода насосных установок. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, г. Киев, 2017.

Диссертация посвящена повышению качества функционирования синхронного электропривода насосных установок (СЭП НУ). Решение предлагаемых в работе заключаются в контроле в реальном времени НУ, и обслуживании по фактическому состоянию установки во время эксплуатации. Диагностирования сочетает методы анализа мгновенных значений токов и напряжений СЭП, температуры вокруг установки и позволяет определять энергетическое и техническое состояние электротехнической установки и прогнозировать ее остаточный ресурс. Созданные программно-аппаратные средства диагностирования СЭП НУ – модели, методики, алгоритмы, программы и схемно-технические решения учитывают действие эксплуатационных воздействий – качества напряжения питания, режим нагрузки и температуру вокруг механизма. Работоспособность и корректность разработанных моделей, методик, алгоритмов и программ подтверждено лабораторными экспериментами и внедрением.

Ключевые слова: электромеханическая система, синхронный двигатель, насосная установка, показатели качества электроэнергии, график электрической нагрузки, энергетическое состояние, техническое состояние.