

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Курашкін Сергій Федорович

УДК 621.313.17: 621.316.95

**МЕТОД І ПРИСТРІЙ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
РЕЖИМІВ РОБОТИ ЗАГЛИБНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук

Мелітополь – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Таврійському державному агротехнологічному університеті Міністерства аграрної політики України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор **Овчаров Володимир Васильович**, Таврійський державний агротехнологічний університет, завідувач кафедри теоретичної і загальної електротехніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Савченко Петро Ілліч**, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, професор кафедри автоматизованих механічних систем;

кандидат технічних наук, доцент **Катюха Анатолій Андрійович**, Таврійський державний агротехнологічний університет, доцент кафедри автоматизованого електроприводу.

Захист відбудеться « 24 » грудня 2010 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої наукової ради К 18.819.01 в Таврійському державному агротехнологічному університеті за адресою: 72312, м. Мелітополь, пр. Богдана Хмельницького, 18.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету за адресою: 72312, м. Мелітополь, пр. Богдана Хмельницького, 18.

Автореферат розісланий « _____ » _____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Т. Діордієв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досвід експлуатації електрообладнання в сільськогосподарському виробництві показує високу аварійність асинхронних електродвигунів заглибних насосів, що веде до додаткових технологічних збитків, незапланованих ремонтів. Нормований ресурс роботи заглибних електродвигунів становить 14000 годин, фактично вони виходять із ладу значно раніше – реальний ресурс становить 3000...4000 годин. Значна аварійність електродвигунів заглибних насосів обумовлена особливостями їх експлуатації, до специфіки яких, зокрема, відноситься низька якість напруги мережі, недостатній рівень технічного обслуговування.

Особливістю сільських розподільних мереж є змішане підключення трифазних і однофазних споживачів, що приводить до асиметрії напруг і струмів. Живлення споживачів здійснюється за допомогою повітряних ліній електропередачі, що мають значну довжину, у зв'язку із чим частими є випадки обриву й замикання проводів. Аварійність асинхронних електродвигунів через асиметрію напруги живлення, у тому числі через обрив фази, досягає 44% від їх загальної кількості. Існуючі пристрої діагностування й захисту заглибних електродвигунів від аварійних режимів мають недостатню експлуатаційну надійність. Дослідження, які спрямовані на аналіз особливостей режимів роботи заглибних електродвигунів в умовах агропромислового комплексу, на розробку методів функціонального діагностування, обґрунтування параметрів діагностування й на підставі цього розробку пристроїв діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибних електродвигунів, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до плану науково-дослідної роботи Таврійського державного агротехнологічного університету на 2005-2010 роки за науково-технічною програмою № 1 «Розробка наукових систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» (державний реєстраційний номер 0102U000678), підпрограмою 1.6. «Розробка методів і засобів технічного сервісу електрообладнання та ресурсоенергозбереження», напрямком 1.6.4. «Розробка пристрою функціонального діагностування заглибних електронасосів».

Метою роботи є підвищення експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів шляхом функціонального діагностування режимів їх роботи на базі математичної моделі процесів витрати ресурсу ізоляції в період їх експлуатації.

Задачі дослідження:

1. Провести аналіз шляхів підвищення експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів.
2. Аналітично дослідити теплові перехідні процеси заглибного електродвигуна як гетерогенного тіла у функції струмових навантажень.
3. Дослідити режими роботи заглибного електродвигуна під впливом зовнішніх факторів.
4. Розробити математичну модель діагностування витрати ресурсу ізоляції заглибного електродвигуна в процесі його роботи й обґрунтувати параметри діагностування.
5. Розробити пристрій функціонального діагностування режимів роботи заглибного електродвигуна.

6. Експериментально перевірити роботу пристрою діагностування в експлуатаційних умовах.

Об'єкт дослідження – теплові процеси, що протікають в асинхронному електродвигуні заглибного насоса під дією експлуатаційних впливів.

Предмет дослідження – закономірності витрати ресурсу ізоляції електродвигуна заглибного насоса у функції параметрів експлуатаційних впливів.

Методи дослідження. Процес нагріву асинхронного електродвигуна заглибного насоса досліджувався за допомогою еквівалентних теплових схем заміщення, операторного методу розв'язання диференціальних рівнянь, матричного розрахунку. Дослідження режимів роботи заглибного електродвигуна під впливом зовнішніх факторів проводилося за допомогою методу симетричних складових трифазної системи величин, загальних методів і символічного методу розрахунку лінійних електричних кіл. Обробка даних здійснювалася за допомогою програмного забезпечення Microsoft Office Excel і Maple 9.5.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Одержала подальший розвиток теорія теплових перехідних процесів асинхронного електродвигуна заглибного насоса як гетерогенної системи в частині визначення парціальних складових усталеного перевищення температури обмотки й постійної часу нагріву.
2. Розроблено алгоритм визначення параметрів еквівалентної теплової схеми заміщення заглибного електродвигуна як системи трьох тіл на підставі дослідів холодного ходу й короткого замикання.
3. Уперше запропоновано коефіцієнт перетворення енергії в електродвигуні заглибного насоса, що враховує втрати активної потужності в ньому й швидкість витрати ресурсу ізоляції, що дозволяє інтегровано оцінювати режим роботи електродвигуна з урахуванням завантаження насоса, асиметрії напруги, неповнофазного режиму.
4. Уперше запропонована математична модель функціонального діагностування режимів роботи електродвигуна заглибного насоса з обґрунтуванням параметрів діагностування.

Практична значимість отриманих результатів. На підставі результатів дослідження розроблено пристрій функціонального діагностування режимів роботи заглибного електродвигуна й обґрунтовано його уставки, що дозволяє підвищити експлуатаційну надійність електродвигунів заглибних насосів.

Запропонована методика практичного визначення параметрів теплової моделі заглибного електродвигуна як системи трьох тіл.

За результатами досліджень розроблена проектно-конструкторська документація на пристрій функціонального діагностування режимів роботи асинхронного електродвигуна заглибного насоса, виготовлено експериментальний зразок, який впроваджений і пройшов виробничі випробування в Кам'янському міжрайонному управлінні водного господарства Запорізької області, Генічеському виробничому управлінні водоканалізаційного господарства Херсонської області.

Особистий внесок здобувача. У наукових роботах, написаних в співавторстві внесок пошукача полягає у наступному: у роботі [1] обґрунтовано застосування електричної моделі теплової схеми заміщення заглибного електродвигуна для безпере-

рвного діагностування теплових процесів, що відбуваються в ньому; у роботі [5] проведені теоретичні дослідження з розрахунку швидкості теплового зносу ізоляції асинхронного електродвигуна в залежності від впливу коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності та коефіцієнта завантаження; у роботах [6, 7] розроблена методика визначення параметрів і втрат потужності теплової схеми заміщення заглибного електродвигуна; у роботах [8, 10] автор застосував у пристроях діагностування режимів роботи асинхронних електродвигунів результати дослідження, які були отримані у попередніх роботах з визначення впливу несиметрії напруги живлення на швидкість зносу ізоляції; у роботі [9] проведено аналіз процесу перетворення електроенергії, визначені умови нормального режиму перетворення електричної енергії в заглибному електродвигуні, складений алгоритм розрахунку поточного перевищення температури обмотки статора; у роботі [12] автором визначені параметри схеми заміщення однієї фази заглибного електродвигуна та проведено аналіз його режиму роботи під час схльостування проводів лінії електропередачі; у роботі [13] визначені корені характеристичного рівняння теплової схеми заміщення, проведена апроксимація парціальних складових перевищення температури обмотки з метою застосування отриманої залежності у пристрої функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибного електродвигуна.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи заслухувалися й обговорювалися на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів і студентів (місто Мелітополь, ТДАТУ, 1998-2010 роки; місто Харків, ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2009, 2010 роки), міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика в АПК» (місто Мелітополь, ТДАТА, 2002 рік).

Публікації. Основні положення й результати дисертаційної роботи опубліковані в 13 статтях за період з 1998 по 2010 р.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 88 найменувань та додатків. Обсяг основного тексту складає 120 сторінок, містить 38 ілюстрацій і 13 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 145 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми досліджень; сформульована мета й завдання дослідження; висвітлено зв'язок роботи з програмами, планами та темами науково-дослідної роботи; визначено її новизну та практичну значимість для сільськогосподарського виробництва, визначено особистий внесок здобувача в надрукованих роботах; надано інформацію щодо апробації отриманих результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Стан питання контролю експлуатаційних режимів роботи електродвигунів заглибних насосів» розглянуто і проаналізовано специфічні умови експлуатації асинхронних електродвигунів заглибних насосів у сільськогосподарському виробництві.

Аналіз існуючого стану контролю експлуатаційних режимів роботи електродвигунів заглибних насосів показав, що згідно зі статистичними даними основна

причина виходу з ладу заглибних електродвигунів є ушкодження ізоляції обмотки (80...90%) через відсутність або недостатній рівень експлуатаційного обслуговування, роботу в неповнофазному режимі, зниження опору ізоляції, низьку надійність сільських електромереж.

Розкрито механізм розвитку виходу заглибного електродвигуна з ладу під дією початкових дефектів технологічного походження та експлуатаційних впливів, які ведуть до ушкодження ізоляції обмотки статора.

Показано, що стратегії обслуговування заглибних електродвигунів, які застосовуються в теперішній час – обслуговування за потребою, планово-профілактичне і планово-діагностичне обслуговування не дозволяють контролювати поточний розвиток ушкодження і зносу окремих елементів його конструкції. Тоді як функціональне діагностування базується на стратегії раннього попередження процесів ушкодження і зносу ізоляції обмоток. Сутність цього методу складається в безперервному контролі параметрів, що характеризують поточний технічний стан ізоляції і своєчасну подачу сигналу обслуговуючому персоналу про аномальний розвиток процесів в електричній машині з метою подальшого більш глибокого діагностування її технічного стану під час технологічної паузи, що дозволяє не вимикати електродвигун з технологічного процесу, якщо це можливо. Відключення електродвигуна слід розглядати як крайню міру.

Дослідженню експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів присвятили свої роботи Ю.М. Бабаханов, А.І. Белоусов, М.М. Гамзаєв, В.М. Гетманенко, А.А. Мамедов, О.А. Пястолов, В.Г. Семак, Г.Г. Счастливий, В.П. Таран, Г.М. Федоренко та інші інженери та вчені.

Показано, що існуючі методи та засоби, які підвищують експлуатаційну надійність водопідйомних установок, далеко не завжди забезпечують необхідний рівень надійності, не враховується значна перевантажувальна здатність заглибних електродвигунів, що визначає необхідність подальшого розвинення засобів безперервного діагностування експлуатаційних режимів.

В роботі сформульована наукова гіпотеза про те, що, якщо застосувати діагностування за струмовим методом із моделюванням теплових процесів, які відбуваються в заглибному електродвигуні, та розробити метод і пристрій функціонального діагностування, то, використовуючи їх, можливо досягти поліпшення експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів. Для цього передбачено:

- аналітично дослідити теплові перехідні процеси заглибного електродвигуна як гетерогенного тіла;
- дослідити вплив експлуатаційних умов на режими роботи заглибного електродвигуна;
- розробити математичну модель діагностування режиму роботи заглибного електродвигуна;
- розробити пристрій діагностування.

У **другому розділі** «Аналітичне дослідження теплових процесів заглибного електродвигуна під дією експлуатаційних впливів» вирішувалася перша наукова задача.

Заглибний електродвигун з точки зору нагріву його активних елементів був представлений еквівалентною тепловою схемою заміщення (рис. 1), як гетерогенна система трьох тіл – обмотки статора (1), обмотки ротора (2), сталі (3).

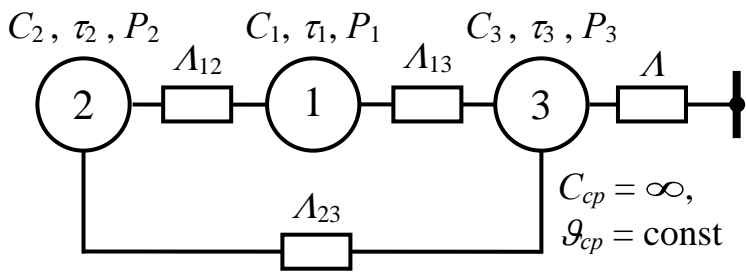


Рис. 1. Теплова схема заміщення електродвигуна ПЭДВ.

На схемі наведені наступні умовні позначення:

C_1, C_2, C_3 – теплоємності відповідних тіл, Дж/°С;

τ_1, τ_2, τ_3 – перевищення температур відповідних тіл над температурою навколишнього середовища, °С;

P_1, P_2, P_3 – втрати активної потужності у відповідних тілах, Вт;

$\Lambda_{12}, \Lambda_{13}, \Lambda_{23}$ – теплові провідності

між відповідних тілами, Вт/°С;

Λ – теплова провідність між сталлю і навколишнім середовищем, Вт/°С;

C_{cp} – теплоємність навколишнього середовища, Дж/°С;

g_{cp} – температура навколишнього середовища, °С.

Була складена система диференційних рівнянь теплового балансу електродвигуна для кожного тіла:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + (\Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha k^2 P_{1н}) \tau_1 - \Lambda_{12} \tau_2 - \Lambda_{13} \tau_3 &= k^2 P_{1н}; \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} - \Lambda_{12} \tau_1 + (\Lambda_{12} + \Lambda_{23}) \tau_2 - \Lambda_{23} \tau_3 &= k^2 P_{2н}; \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} - \Lambda_{13} \tau_1 - \Lambda_{23} \tau_2 + (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) \tau_3 &= P_3, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де k – кратність сили струму навантаження;

$P_{1н}$ і $P_{2н}$ – втрати активної потужності відповідно в обмотці статора і ротора при номінальному навантаженні, Вт;

t – поточний час, с;

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу провідників обмотки, 1/°С.

Розв'язання системи рівнянь (1) відносно перевищення температури обмотки статора τ_1 проводилося операторним методом, для чого система була записана в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned} (pC_1 + \Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha k^2 P_{1н}) \tau_1 - \Lambda_{12} \tau_2 - \Lambda_{13} \tau_3 &= \frac{k^2 P_{1н}}{p}; \\ - \Lambda_{12} \tau_1 + (pC_2 + \Lambda_{12} + \Lambda_{23}) \tau_2 - \Lambda_{23} \tau_3 &= \frac{k^2 P_{2н}}{p}; \\ - \Lambda_{13} \tau_1 - \Lambda_{23} \tau_2 + (pC_3 + \Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) \tau_3 &= \frac{P_3}{p}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор.

Рішення системи (2) відносно $\tau_1(p)$ отримало вигляд:

$$\tau_1(p) = \frac{p^2 b_1 + p c_1 + d_1}{p(p^3 a + p^2 b + p c + d)}, \quad (3)$$

де $a, b, c, d, b_1, c_1, d_1$ – коефіцієнти;

$$a = C_1 C_2 C_3; \quad (4)$$

$$b = C_1 C_2 (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_1 C_3 (\Lambda_{12} + \Lambda_{23}) + C_2 C_3 (\Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha k^2 P_{1H}); \quad (5)$$

$$c = \Lambda_{12} (C_1 + C_2) (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_1 \Lambda_{23} (\Lambda + \Lambda_{13}) + C_2 \Lambda_{13} (\Lambda + \Lambda_{23}) + C_3 (\Lambda_{13} \Lambda_{12} + \Lambda_{13} \Lambda_{23} + \Lambda_{12} \Lambda_{23}) - \alpha k^2 P_{1H} (C_2 \Lambda_{13} + C_2 \Lambda_{23} + C_3 \Lambda_{12} + C_3 \Lambda_{23} + C_2 \Lambda); \quad (5)$$

$$d = \Lambda_{12} \Lambda_{23} \Lambda + \Lambda_{12} \Lambda_{13} \Lambda + \Lambda_{13} \Lambda_{23} \Lambda - \alpha k^2 P_{1H} (\Lambda_{12} \Lambda + \Lambda_{12} \Lambda_{13} + \Lambda_{12} \Lambda_{23} + \Lambda_{23} \Lambda + \Lambda_{13} \Lambda_{23}); \quad (6)$$

$$b_1 = C_2 C_3 k^2 P_{1H}; \quad (7)$$

$$c_1 = C_2 k^2 P_{1H} (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + C_3 k^2 P_{1H} (\Lambda_{12} + \Lambda_{23}) + C_3 k^2 P_{2H} \Lambda_{12} + C_2 P_3 \Lambda_{13}; \quad (8)$$

$$d_1 = \Lambda_{12} k^2 (P_{1H} + P_{2H}) (\Lambda + \Lambda_{13} + \Lambda_{23}) + k^2 P_{1H} \Lambda_{23} (\Lambda + \Lambda_{13}) + k^2 P_{2H} \Lambda_{13} \Lambda_{23} + P_3 (\Lambda_{13} \Lambda_{12} + \Lambda_{13} \Lambda_{23} + \Lambda_{12} \Lambda_{23}); \quad (9)$$

Оригінал $\tau_1(t)$ зображення (3) отримав вигляд:

$$\tau_1(t) = \frac{d_1}{d} + \frac{b_1 p_1^2 + c_1 p_1 + d_1}{p_1 (3a p_1^2 + 2b p_1 + c)} e^{p_1 t} + \frac{b_1 p_2^2 + c_1 p_2 + d_1}{p_2 (3a p_2^2 + 2b p_2 + c)} e^{p_2 t} + \frac{b_1 p_3^2 + c_1 p_3 + d_1}{p_3 (3a p_3^2 + 2b p_3 + c)} e^{p_3 t}, \quad (10)$$

де p_1, p_2, p_3 – корені характеристичного рівняння, $1/c$.

Залежність (10) – рівняння нагріву обмотки статора електродвигуна в функції часу для випадку трьох тіл (обмотки статора, сталі, ротора). Кожне тіло впливає на нагрів обмотки і доля цього впливу змінюється згідно з експоненціальним законом.

Перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища $\tau_1(t)$ залежить від конструктивних параметрів заглибного електродвигуна (теплоємності активних частин, теплопровідності між ними), а також від змінних параметрів (втрат активної потужності в тілах), які залежать від кратності сили струму.

Визначення еквівалентних теплових провідностей між тілами та навколишнім середовищем проводилося за результатами дослідів холостого ходу і короткого замикання, для чого була складена система рівнянь теплового балансу:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{12x} \Lambda_{12} + \tau_{13x} \Lambda_{13} &= P_{1x}; \\ \tau_{12k} \Lambda_{12} + \tau_{13k} \Lambda_{13} &= P_{1k}; \\ -\tau_{12x} \Lambda_{12} + \tau_{23x} \Lambda_{23} &= P_{2x}; \\ -\tau_{13k} \Lambda_{13} - \tau_{23k} \Lambda_{23} + \tau_{3k} \Lambda &= P_{3k}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де P_{1x} і P_{2x} – втрати активної потужності відповідно в обмотці статора і ротора в досліді холостого ходу, Вт;

$P_{1к}$ і $P_{3к}$ – втрати активної потужності відповідно в обмотці статора і магнітопроводі в досліді короткого замикання, Вт;

τ_{12x} , τ_{13x} , τ_{23x} – різниця між перевищеннями температур тіл еквівалентної теплової схеми заміщення в досліді холостого ходу, °С;

$\tau_{12к}$, $\tau_{13к}$, $\tau_{23к}$ – різниця між перевищеннями температур тіл еквівалентної теплової схеми заміщення в досліді короткого замикання, °С.

Одержані рівняння для визначення еквівалентних теплових провідностей:

$$A_{12} = \frac{\tau_{13к}P_{1x} - \tau_{13x}P_{1к}}{\tau_{12x}\tau_{13к} - \tau_{12к}\tau_{13x}}; \quad (12)$$

$$A_{13} = \frac{\tau_{12x}P_{1к} - \tau_{12к}P_{1x}}{\tau_{12x}\tau_{13к} - \tau_{12к}\tau_{13x}}; \quad (13)$$

$$A_{23} = \frac{(\tau_{12x}\tau_{13к} - \tau_{12к}\tau_{13x})P_{2к} + \tau_{12к}(\tau_{13x}P_{1к} - \tau_{13к}P_{1x})}{\tau_{23к}(\tau_{12x}\tau_{13к} - \tau_{12к}\tau_{13x})}; \quad (14)$$

$$A = \frac{\tau_{12x}[\tau_{13к}(\tau_{23к}P_{3x} - \tau_{23x}P_{2к}) - \tau_{13x}\tau_{23к}P_{1к}] - \tau_{13x}\tau_{12к}[\tau_{23к}P_{3x} - \tau_{23x}(P_{2к} - P_{1к})]}{\tau_{23к}\tau_{3x}(\tau_{12x}\tau_{13к} - \tau_{12к}\tau_{13x})} + \frac{\tau_{12к}P_{1x}[\tau_{13x}\tau_{23к} + \tau_{13к}\tau_{23x}]}{\tau_{23к}\tau_{3x}(\tau_{12x}\tau_{13к} - \tau_{12к}\tau_{13x})}. \quad (15)$$

Дані дослідів холостого ходу і короткого замикання були взяті з протоколу параметричних дослідів заглибного електродвигуна ПЭДВ 2,8-140 заводу «Южгидромаш» (місто Бердянськ). Після розв'язання рівнянь (12) – (15) було отримано значення еквівалентних теплових провідностей: $A_{12} = 28,8$ Вт/°С, $A_{13} = 25,0$ Вт/°С, $A_{23} = 22,8$ Вт/°С, $A = 51,1$ Вт/°С.

Підставивши значення коефіцієнтів у (10), було отримано рівняння нагріву електродвигуна як системи трьох тіл:

$$\tau_1 = \tau_{1y}'(1 - e^{-t/T'}) + \tau_{1y}''(1 - e^{-t/T''}) + \tau_{1y}'''(1 - e^{-t/T'''}), \quad (16)$$

де τ_{1y}' , τ_{1y}'' , τ_{1y}''' – усталені значення парціальних перевищень температури обмотки над температурою навколишнього середовища, °С;

T' , T'' , T''' – парціальні постійні часу нагріву обмотки, с.

Останні знаходяться за виразами:

$$T' = -\frac{1}{P_1}; \quad T'' = -\frac{1}{P_2}; \quad T''' = -\frac{1}{P_3}. \quad (17)$$

На рис. 2 показані залежності $\tau_1 = f(t)$ для двох випадків:

– крива 1, якій відповідає рівняння нагріву електродвигуна як гомогенного тіла:

$$\tau_1 = \tau_{1y}'(1 - e^{-t/T'}), \quad (18)$$

де τ_{1y}' – усталене значення перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, °С;

T' – перша парціальна постійна часу нагріву обмотки, с;

– крива 2, якій відповідає рівняння нагріву електродвигуна (16) як гетерогенного тіла.

Для номінального режиму роботи електродвигуна ці рівняння мають вигляд:

$$\tau_1 = 26,5(1 - e^{-t/496}); \quad (19)$$

$$\tau_1 = 26,5 - 18,3(1 - e^{-t/496}) - 4,3(1 - e^{-t/66}) - 3,8(1 - e^{-t/20}). \quad (20)$$

Як видно з кривих, на початку процесу нагріву обмотки статора є суттєві розходження, які сягають 30%, а по мірі нагріву зменшуються до прийнятних 1-5%. Таким чином, більш точною є гетерогенна модель нагріву електродвигуна, в той час як більшість систем діагностування заглибних електродвигунів базується на моделі нагріву електродвигуна, як гомогенного тіла.

Криву нагріву електродвигуна 2 як системи трьох тіл можна апроксимувати сумою двох експонент. Результат апроксимації представлено на рис. 2.

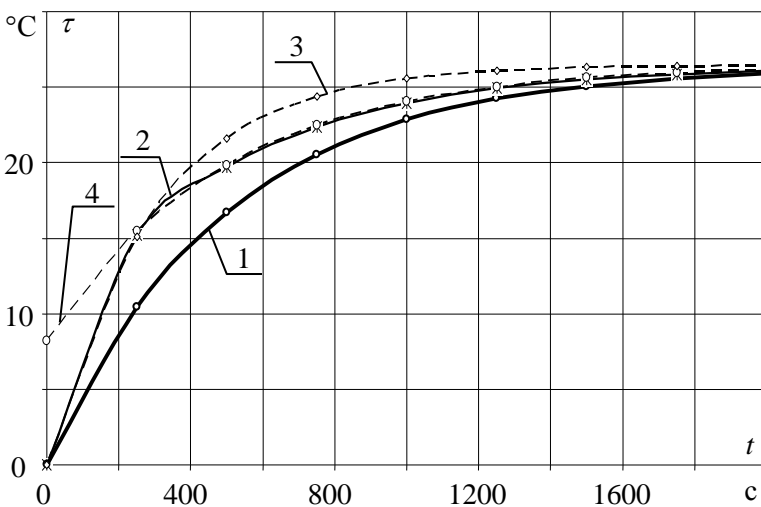


Рис. 2. Залежності $\tau_1(t)$ для електродвигуна ПЭДВ 2,8-140.

Перша експонента моделює швидкий процес нагріву на початковій стадії з холодного стану і характеризується сталою часу $4T''$ (крива 3):

$$\tau_1 = \tau_{1y}(1 - e^{-t/4T''}); \quad (21)$$

Підставивши значення, отримано:

$$\tau_1 = 26,5(1 - e^{-t/264}). \quad (22)$$

Друга експонента моделює процес нагріву з гарячого стану і характеризується сталою часу T' (крива 4):

$$\tau_1 = \tau_{1y}(1 - e^{-t/T'}) + (\tau_{1y}' - \tau_{1y})e^{-t/T'}; \quad (23)$$

Підставивши значення, отримано:

$$\tau_1 = 26,5(1 - e^{-t/496}) + 8,2e^{-t/496}. \quad (24)$$

Таким чином, криву нагріву заглибного електродвигуна як гетерогенного тіла можна описати двома рівняннями: на першій ділянці – рівнянням (21), на другій ділянці – рівнянням (23). Ці рівняння застосовуються для моделювання теплового процесу, що відбувається у обмотці статора електродвигуна, і у пристрої функціонального діагностування.

У **третьому розділі** «Дослідження режиму роботи заглибного електродвигуна під впливом зовнішніх факторів» вирішувалася друга наукова задача.

Було досліджено режими роботи електродвигуна під час асиметрії напруги живлення, міжфазного короткого замикання та обриву фази живлення.

У загальному випадку асиметрії напруга живлення ідеального джерела електричної енергії нами представлена як система електрорушійних сил прямої, зворотної і нульової послідовностей:

$$\dot{E}_1 = \frac{E_n}{3}(k_A + k_B + k_C); \quad (25)$$

$$\dot{E}_2 = \frac{E_H}{3} \left(k_A + k_B e^{j120^\circ} + k_C e^{-j120^\circ} \right); \quad (26)$$

$$\dot{E}_0 = \frac{E_H}{3} \left(k_A + k_B e^{-j120^\circ} + k_C e^{j120^\circ} \right), \quad (27)$$

де k_A, k_B, k_C – коефіцієнти асиметрії фаз;

E_H – діюче номінальне значення фазної електрорушійної сили, В;

$\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{E}_0$ – комплекси діючих значень електрорушійних сил відповідно прямої, зворотної і нульової послідовностей, В.

Комплекси фазних струмів електродвигуна знайдені наступним чином:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A}; \quad (28)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{1A} e^{-j120^\circ} + \dot{I}_{2A} e^{j120^\circ}; \quad (29)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{1A} e^{j120^\circ} + \dot{I}_{2A} e^{-j120^\circ}, \quad (30)$$

де $\dot{I}_{1A}, \dot{I}_{2A}$ – комплекси діючих значень струмів прямої й зворотної послідовностей, А;

$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – комплекси діючих значень відповідно струмів фаз А, В, С, А.

У роботі визначено залежність ковзання електродвигуна від кратності симетричних складових напруги прямої і зворотної послідовностей та кратності завантаження електродвигуна:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (31)$$

де $\dot{a} = k_\zeta - \dot{\delta}_0$;

$$b = -2(k_\zeta - \dot{\delta}_0) - (1 - s_i)^2 \left(\frac{k_{u1}^2}{s_i} - m_r k_{u2}^2 \right); \quad (32)$$

$$c = \dot{\delta}_0 (1 - s_i)^2 + (k_\zeta - \dot{\delta}_0); \quad (33)$$

$$k_{u1} = \frac{U_1}{U_i}, \quad k_{u2} = \frac{U_2}{U_i}; \quad (34)$$

k_3 – кратність завантаження електродвигуна;

m_0 – відносний момент рушання електродвигуна;

s_H – номінальне ковзання електродвигуна;

m_n – відносний пусковий момент електродвигуна;

k_{u1}, k_{u2} – кратність напруги симетричної складової прямої й зворотної послідовностей;

U_1, U_2 – діючі значення напруги симетричних складових відповідно прямої й зворотної послідовностей, В;

U_H – номінальне діюче значення фазної напруги, В.

Знайдені опори Г-образної схеми заміщення електродвигуна в функції ковзання:

$$z_{1\dot{a}} = \frac{z_0 z'_1}{z_0 + z'_1}; \quad (35)$$

$$z_{2\dot{a}} = \frac{z_0 z'_2}{z_0 + z'_2}; \quad (36)$$

$$z_0 = r_1 + jx_1 + \frac{r_\mu jx_\mu}{r_\mu + jx_\mu}; \quad (38)$$

$$z'_1 = \left(r'_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j(x'_1 + x''_2); \quad (39)$$

$$z'_2 = \left(r'_1 + \frac{r''_2}{2-s} \right) + j(x'_1 + x''_2), \quad (40)$$

де $r_1, x_1, r'_1, x'_1, r''_2, x''_2, r_\mu, x_\mu$ – параметри схеми заміщення однієї фази електродвигуна, Ом.

Комплекси діючих значень струмів прямої й зворотної послідовностей для фази A електродвигуна розраховані наступним чином:

$$\dot{I}_{1A} = \frac{\dot{A}_{1A}}{z_{1A}}; \quad (41)$$

$$\dot{I}_{2A} = \frac{\dot{A}_{2A}}{z_{2A}}; \quad (42)$$

де z_{1A}, z_{2A} – комплекси повних опорів прямої та зворотної послідовностей фази A , Ом.

Останні знаходяться за виразами:

$$z_{1A} = z_\delta + z_{\bar{e}} + z_{1\bar{a}}; \quad (43)$$

$$z_{2A} = z_\delta + z_{\bar{e}} + z_{2\bar{a}}, \quad (44)$$

де z_m – комплекс повного опору фази силового трансформатора, Ом;

z_n – комплекс повного опору фази лінії електропередачі, Ом.

Визначено, що асиметрія напруги живлення приводить до зростання фазних струмів в одних фазах та зменшення в інших відносно номінального значення I_n .

Під час міжфазного короткого замикання (схлюстування проводів лінії електропередачі), наприклад фаз B і C , струм здорової фази визначався наступним чином:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{3(z_m + z_n + z_\delta)}, \quad (45)$$

де z_δ – комплекс повного опору фази електродвигуна, Ом.

Останній знаходився зі схеми заміщення (рис. 3):

$$z_{\bar{a}} = \frac{z_0 z'}{z_0 + z'}; \quad (46)$$

$$z' = \left(r'_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j(x'_1 + x''_2), \quad (47)$$

Визначено, що під час міжфазного короткого замикання електродвигун переходить в однофазний режим, струм здорової фази підвищується втричі відносно номінального значення. Ковзання електродвигуна збільшується до величини вище критичної, що приводить до його «перекидання». При періодичному зникненні схлюстування електродвигун повторно запускається. В залежності від періоду замикання пуски можуть бути частими, що приводить до неприпустимого перегріву обмотки статора.

Під час обриву фази заглибний електродвигун переходить в однофазний режим, сили струмів інших фаз підвищуються відносно номінального значення в 1,5 рази.

У **четвертому розділі** «Розробка математичної моделі діагностування витрати ресурсу ізоляції заглибного електродвигуна та обґрунтування параметрів діагностування» вирішувалася третя наукова задача.

Для обґрунтування критерію діагностування електродвигуна було записано вираз швидкості зносу ізоляції:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_y + g_{cp} + 273} \right)}, \quad (48)$$

де ε_n – номінальна швидкість теплового зносу ізоляції, бгод/год;

θ_n – абсолютна номінальна температура ізоляції даного класу, К;

B – показник, що характеризує ізоляцію даного класу, К.

Усталене перевищення температури ізоляції обмотки над температурою навколишнього середовища знаходилося за виразом:

$$\tau_\delta = \tau_i \frac{a + k^2}{a + 1}, \quad (49)$$

де τ_n – номінальне перевищення температури ізоляції, °С;

a – коефіцієнт втрат.

Введено поняття коефіцієнтів втрат електроенергії k_n та витрати ресурсу ізоляції k_p :

$$k_i = \frac{a + k^2}{a + 1}; \quad (50)$$

$$k_\delta = e^{B \left(\frac{1}{\theta_i} - \frac{1}{\tau + g_{\bar{n}\delta} + 273} \right)}, \quad (51)$$

де τ – поточне перевищення температури ізоляції, °С.

Останнє знаходилось наступним чином:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T'}} \right) + \tau_{noch} e^{-\frac{t}{T'}}, \quad (52)$$

де τ_{noch} – початкове перевищення температури обмотки статора, °С.

Дослідивши залежності $k_n = f(k)$, $k_p = f(k)$, які наведені відповідно на рис. 4, рис. 5, визначено умови нормального режиму перетворення електричної енергії і витрати ресурсу ізоляції в заглибному електродвигуні:

$$k_i \leq 1; k_\delta \leq 1. \quad (53)$$

За результатами теоретичних досліджень була розроблена математична модель функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибного електродвигуна, за якою розраховуються:

– середнє квадратичне діюче значення струму на i -ій ділянці часу

$$I_{\bar{n}\hat{i}} = \sqrt{\frac{I_{Ai}^2 + I_{Bi}^2 + I_{Ci}^2}{3}}, \quad (54)$$

де I_{Ai} , I_{Bi} , I_{Ci} – діючі значення фазних струмів на i -ій ділянці часу, А;

– коефіцієнт завантаження електродвигуна за струмом на i -ій ділянці часу

$$k_i = \frac{I_{\bar{n}\bar{\epsilon}.i}}{I_i}; \quad (55)$$

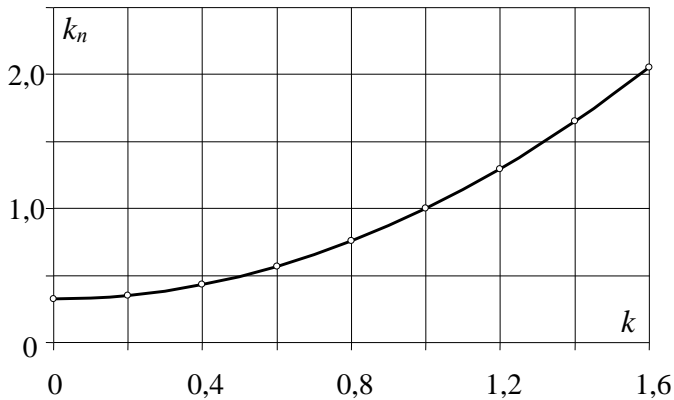


Рис. 4. Залежність $k_n = f(k)$ для електродвигуна ПЭД 2,8-140.

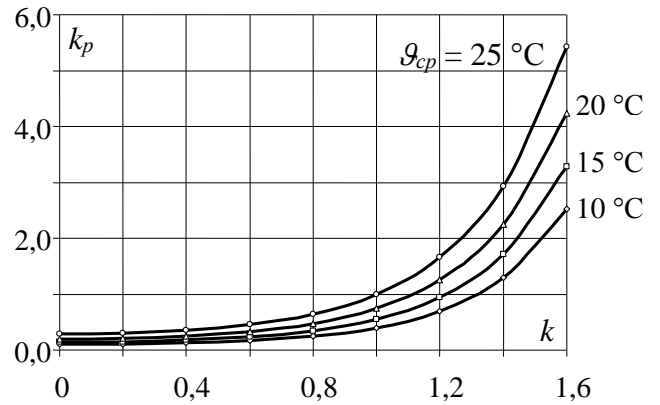


Рис. 5. Залежність $k_p = f(k)$ для електродвигуна ПЭД 2,8-140.

– усталене перевищення температури обмотки статора на i -ій ділянці часу

$$\tau_{i\delta} = \frac{d_i}{d_{1i}}, \quad (56)$$

де d_i, d_{1i} – коефіцієнти теплової моделі заміщення електродвигуна ПЭДВ;

– поточне перевищення температури обмотки статора на i -ій ділянці часу

$$\tau_i = \tau_{iy} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T'}} \right) + \tau_{(i-1)} e^{-\frac{\Delta t}{T'}}, \quad (57)$$

де Δt – дискретність діагностування, с;

– коефіцієнт перетворення електроенергії на i -ій ділянці часу

$$k_i = \frac{a + k^2}{a + 1}; \quad (58)$$

– коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції на i -ій ділянці часу

$$k_{\delta i} = e^{B \left(\frac{1}{\theta_i} - \frac{1}{\tau_i + \theta_{\bar{n}\bar{\delta}} + 273} \right)}. \quad (59)$$

Показано, що під час виникнення перевантаження, внаслідок аномального експлуатаційного режиму, перевищення температури обмотки електродвигуна за час перевантаження t_n досягає максимального значення τ_{\max} , а після відключення електродвигуна, за час охолодження t_o – знижується до номінального перевищення температури τ_n . В той же час, швидкість зношення ізоляції обмотки зростає з номінального ϵ_n до максимального значення ϵ_{\max} . Як наслідок, виникає додатковий тепловий знос ізоляції E_δ за час перевантаження і охолодження (рис. 6).

Знайдено, що додатковий припустимий тепловий знос ізоляції на один аварійний випадок $E_{\delta, np}$ залежить від кількості теплових перевантажень за різними причинами:

$$E_{\partial.np} = \frac{1}{n} \left(\frac{D_n}{T_m} - N \exp B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_n \frac{a + k_\phi^2}{a + 1} + \vartheta_{cp} + 273} \right) \right), \quad (60)$$

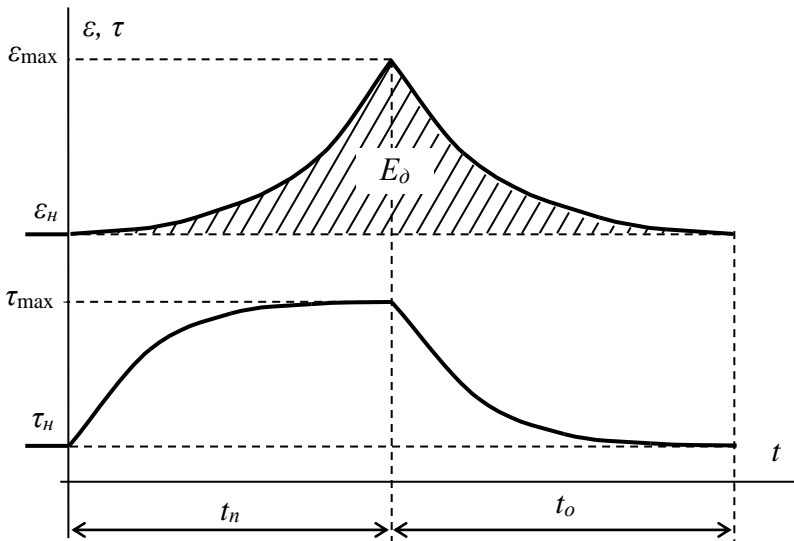


Рис. 6. Залежності $\tau = f(t)$, $\varepsilon = f(t)$ під час перевантаження електродвигуна.

де n – ймовірне число теплових перевантажень на протязі року;
 D_n – базовий строк служби ізоляції обмотки статора електродвигуна, бгод;
 T_m – моральний строк служби електродвигуна, років;
 N – число годин роботи електродвигуна за рік, год;
 k_ϕ – еквівалентний середньорічний коефіцієнт завантаження електродвигуна.

Ймовірна кількість теплових перевантажень на протязі року за статистичними даними складає 50...100 перевантажень, таким

чином припустимий додатковий тепловий знос ізоляції електродвигуна на один аварійний режим складає $E_{np.\partial} = 2...4$ бч.

За результатами теоретичних досліджень складена математична модель для визначення припустимого часу роботи електродвигуна з перевантаженням при температурі навколишнього середовища ϑ_{cp} , додатковому припустимому тепловому зносу ізоляції на один аварійний режим $E_{\partial.np}$, кратності діючого середнє квадратичного значення сили електричного струму k :

$$E_{\partial.np} = E_{\partial.n} + E_{\partial.o}, \quad (61)$$

$$E_{\partial.n} = \int_0^{t_n} \varepsilon_n dt; \quad (62)$$

$$\varepsilon_n = \varepsilon_n e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_n + \vartheta_{cp} + 273} \right)}; \quad (63)$$

$$\tau_n = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T'}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (64)$$

$$E_{\partial.o} = \int_0^{t_o} \varepsilon_o dt; \quad (65)$$

$$\varepsilon_o = \varepsilon_n e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_o + \vartheta_{cp} + 273} \right)}; \quad (66)$$

$$\tau_o = \tau_{\max} e^{-\frac{t}{T'}}; \quad (67)$$

$$\tau_{\max} = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T'}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t_n}{T'}}; \quad (68)$$

$$\tau_n = \tau_{\max} e^{-\frac{t_o}{T'}}; \quad (69)$$

де $E_{\partial.n}$, $E_{\partial.o}$ – відповідно додатковий тепловий знос ізоляції під час перевантаження і охолодження, бгод;

ε_n – швидкість зносу ізоляції під час перевантаження, бгод/год;

τ_n – поточне перевищення температури ізоляції під час перевантаження, °С;

ε_o – швидкість зносу ізоляції під час охолодження, бгод/год;

τ_o – поточне перевищення температури ізоляції під час охолодження, °С.

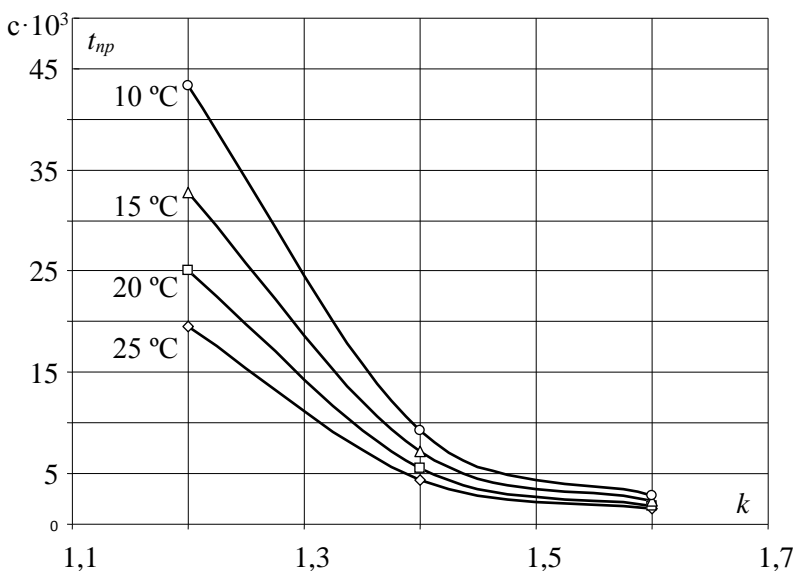


Рис. 7. Залежність $t_{np} = f(k, \vartheta_{cp})$ при $E_{\partial.np} = 2,7$ бч.

Згідно моделі визначено припустимий час роботи електродвигуна з перевантаженням. Для $E_{\partial.np} = 2,7$ бгод залежності $t_{np} = f(k, \vartheta_{cp})$ наведені на рис. 7.

Проведена апроксимація отриманих залежностей за методом найменших квадратів і визначені рівняння регресії для різних температур навколишнього середовища, наприклад для $\vartheta_{cp} = 25$ °С:

$$y = 154250x^2 - 476925x + 369690.$$

Отримані рівняння використовуються в пристрої функціонального діагностування електродвигуна

заглибного насосу для визначення припустимого часу роботи електродвигуна під час перевантаження за струмом, яке виникає з різних причин.

У **п'ятому розділі** «Розробка пристрою діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибного електродвигуна» вирішувалася четверта наукова задача.

За результатами досліджень були сформульовані технічні вимоги до пристрою функціонального діагностування, які передбачають:

- контроль фазних струмів заглибного електродвигуна;
- відключення електродвигуна від мережі під час тривалого впливу струму перевантаження і надструмів;
- відключення заглибного електродвигуна від мережі при досягненні коефіцієнтами перетворення електричної енергії й витрати ресурсу ізоляції гранично припустимих значень;

- відключення заглибного електродвигуна від мережі під час обриву однієї з фаз;
- відключення заглибного електродвигуна від мережі під час позаштатного зникнення навантаження («сухий хід» насоса);
- дистанційну передачу даних про аномальний режим роботи електродвигуна за допомогою GSM-модему.

Структурна схема пристрою діагностування наведена на рис. 8.

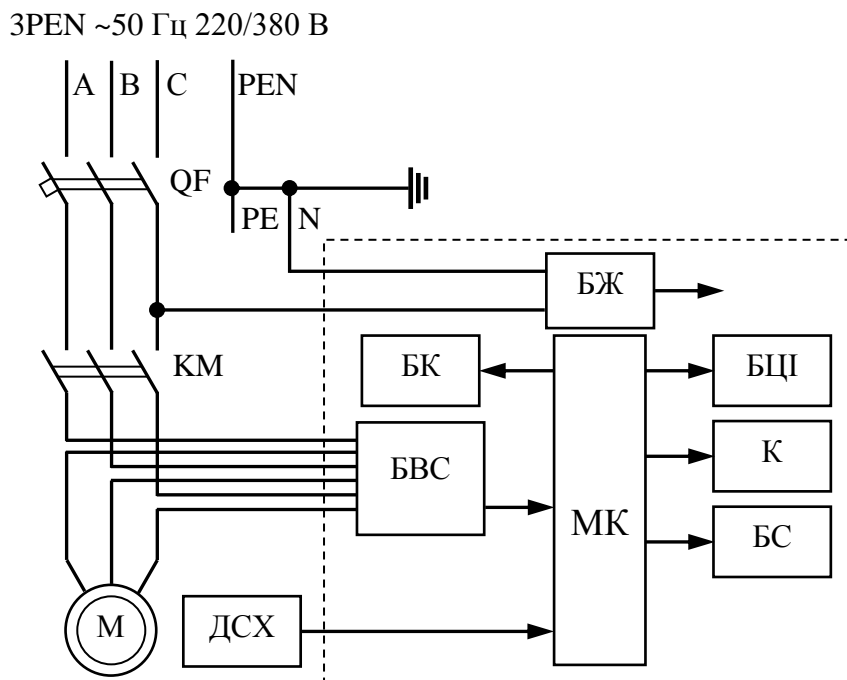


Рис. 8. Структурна схема пристрою діагностування експлуатаційних режимів: QF – автоматичний вимикач; KM – магнітний пускач; М – заглибний електродвигун; БВТ – блок вимірювання фазних струмів; ДСХ – датчик «сухого ходу»; МК – мікроконтролер; БК – блок комутації; БЦІ – блок цифрової індикації; К – клавіатура; БС – блок сполучення; БЖ – блок живлення.

Розроблено принципову електричну схему пристрою діагностування. Алгоритм функціонування пристрою визначається програмним забезпеченням, яке міститься у пам'яті мікроконтролера і дозволяє контролювати тепловий стан заглибного електродвигуна згідно моделі діагностування витрати ресурсу його ізоляції. Пристрій формує попереджувальний сигнал, а також сигнал у разі відключення заглибного електродвигуна через аномальний режим роботи з передачею його на диспетчерський пункт за допомогою GSM-модуля.

Проведено експериментальне дослідження, яке підтвердило адекватність математичної моделі діагностування за силою струму статора електродвигуна. Відносна погрішність визначення температури обмотки не перевищує 3%.

Проведено оцінювання кількісних показників надійності пристрою діагностування: імовірність безвідмовної роботи пристрою складає $p(t) = 0,9$; середній час безвідмовної роботи дорівнює $T_{cp} = 131216,4$ год.

Виробничі випробування пристрою діагностування на свердловині з електродвигуном ПЭДВ 2,8-140 показали, що під час дослідів відмов електродвигуна та елементів пристрою діагностування не було. Очікуваний річний ефект від впровадження пристрою на свердловині з зазначеним електродвигуном склав 206 грн., термін окупності капіталовкладень – 2,6 роки.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень для вирішення науково-технічного завдання, що полягає в обґрунтуванні методу та розробці пристрою діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибних електродвигунів з метою підвищення їх експлуатаційних показників. На базі отриманих результатів дослідження зроблені наступні висновки:

1. Теоретично обґрунтовано необхідність розгляду теплових процесів в заглибному електродвигуні як в гетерогенній системі, що складається з трьох тіл – обмотки статора, обмотки ротора, сталі.
2. Запропоновано алгоритм визначення теплових провідностей між тілами та навколишнім середовищем теплової схеми заміщення заглибного електродвигуна за результатами дослідів холостого ходу та короткого замикання. Для досліджуваного електродвигуна теплові провідності дорівнюють: між обмотками статора і ротора $\Lambda_{12} = 28,8 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$, між обмоткою статора і сталлю електродвигуна $\Lambda_{13} = 25,0 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$, між обмоткою ротора і сталлю електродвигуна $\Lambda_{23} = 22,8 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$, між сталлю електродвигуна і навколишнім середовищем (водою) $\Lambda = 51,1 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$.
3. Отримано рівняння нагріву обмотки статора електродвигуна як системи трьох тіл, що складається з трьох парціальних складових, які мають наступні постійні часу: перша – 496 с, друга – 66 с, третя – 20 с. Проведена апроксимація рівняння нагріву еквівалентною кривою, що має постійну часу першої парціальної експоненти.
4. Визначено, що під час міжфазного короткого замикання системи «силовий трансформатор – лінія електропередачі – заглибний електродвигун», струм здорової фази електродвигуна підвищується в 3 рази відносно номінального струму, ковзання електродвигуна збільшується до величини вище за критичну, що приводить до його «перекидання». Під час обриву однієї фази заглибний електродвигун переходить в однофазний режим, сили струмів інших фаз підвищуються відносно номінального значення приблизно в 1,5 рази.
5. Визначено критерії діагностування заглибного електродвигуна – коефіцієнт втрат електричної енергії k_n та коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції k_p . Під час перевантаження електродвигуна за струмом з різних причин на 40% відносно номінального, коефіцієнт втрат електричної енергії зростає в 1,7 рази, а витрата ресурсу ізоляції – в 3 рази відносно номінального режиму роботи.
6. Запропонована методика функціонального діагностування експлуатаційних режимів роботи на базі розробленої математичної моделі нагріву заглибного електродвигуна, як гетерогенного тіла.
7. Отримані рівняння регресії $t_{np} = f(k, \mathcal{I}_{cp}, E_{d,np})$, які використовуються для визначення припустимого часу роботи електродвигуна з перевантаженням.
8. Розроблено мікропроцесорний пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибного електродвигуна. Експериментальне дослідження підтвердило адекватність математичної моделі діагностування за силою струму статора електродвигуна. Відносна погрішність визначення температури обмотки не перевищує 3%. Ймовірність безвідмовної роботи пристрою складає 0,9; середній час безвідмовної роботи – 131216 годин. Пристрій впроваджено в Кам'янському міжрайонному управ-

лінні водного господарства, Генічеському виробничому управлінню водно каналізаційного господарства. Очікуваний економічний ефект залежить від потужності електродвигуна, який захищається – для електродвигуна ПЭДВ 2,8-140 він складає 206 грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Курашкін С.Ф. Безупинне діагностування теплових процесів асинхронних електродвигунів заглибних насосів / С.Ф. Курашкін, В.В. Овчаров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 1998. – Вип. 1, Т. 7. – с. 7 – 10.
2. Курашкін С.Ф. Теоретичні передумови застосування операторного методу розрахунку електричної моделі теплової схеми заміщення електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2000. – Вип. 1, Т. 17. – с. 85 – 88.
3. Курашкін С.Ф. Моделювання електромеханічних перехідних процесів заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Вісник Харківського Державного Університету сільського господарства. – Харків, 2001. – Вип. 6. – с. 374 – 375.
4. Курашкін С.Ф. Математична модель нагріву заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2001. – Вип. 1, Т. 19. – с. 105 – 108.
5. Експериментальне дослідження режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі / [Курашкін С.Ф., Овчаров В.В., Вовк О.Ю., Попова І.О.] // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2003. – Вип. 15. – с. 153 – 157.
6. Курашкін С.Ф. Визначення параметрів теплової схеми заміщення заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін, І.О. Попова // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. Науково-виробничий журнал. – 2004. – № 1 (6). – с. 39 – 42.
7. Курашкін С.Ф. Дослідження втрат потужності еквівалентної теплової схеми заглибного електродвигуна / С.Ф. Курашкін, В.В. Овчаров // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – Вип. 32. – с. 50 – 54.
8. Пристрій діагностування режимів роботи електродвигунів при несиметрії напруг / [Курашкін С.Ф., Борт С.М., Юдіна О.В., Попова І.О.] // Матеріали науково-технічної конференції магістрів та студентів Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – Вип. 8, Т. 2. – с. 9 – 10.
9. Курашкін С.Ф. Діагностування перетворення електричної енергії в заглибному електродвигуні / С.Ф. Курашкін, С.В. Овчаров, А.В. Островский // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 10, Т. 4. – с. 34 – 38.
10. Курашкін С.Ф. Розробка мікроконтролерного пристрою діагностування режимів роботи асинхронного електродвигуна. / С.Ф. Курашкін, В.В. Кузьменко // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 10, Т. 4. – с. 102 – 106.
11. Курашкін С.Ф. Математична модель і пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи електродвигуна заглибного насосу / С.Ф. Курашкін // Вісник Харківського національного університету сільського господарства «Проблеми енер-

гозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 102. – с. 131 – 132.

12. Курашкин С.Ф. Анализ режима работы асинхронного электродвигателя при схлестывании питающих проводов воздушной линии электропередачи / С.Ф. Курашкин, С.В. Овчаров, А.В. Островский // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Материалы научно-технической конференции. – Харьков: НТУ ХПИ, 2010. – № 29. – с.120 – 125.
13. Курашкин С.Ф. Диагностирование эксплуатационного режима погружного электродвигателя / С.Ф. Курашкин, Р.В. Телюта // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Научный журнал. 2010. – № 8 (78). – с. 60 – 65.

АНОТАЦІЯ

Курашкін С.Ф. Метод і пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибних електродвигунів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, 2010.

Обґрунтована актуальність роботи, розглянутий стан питання, визначена мета й завдання дослідження. Аналіз робіт, що присвячені дослідженню експлуатаційної надійності заглибних електродвигунів, дозволив узагальнити й класифікувати існуючі методи й засоби їх діагностування, а також сформулювати вимоги до пристрою діагностування експлуатаційних режимів роботи заглибних електродвигунів.

Проведено аналіз теплового процесу нагріву заглибного електродвигуна, представленого гетерогенною системою, у результаті якого отримано рівняння нагріву обмотки статора електродвигуна, що містить три парціальні складові. Обґрунтовано, що теплова модель заглибного електродвигуна, розглянута з позиції гомогенного тіла, має істотну розбіжність (до 50%) на початковому етапі нагріву в порівнянні з уточненою гетерогенною системою.

Проведено дослідження впливу зовнішніх експлуатаційних факторів, що впливають на роботу заглибного електродвигуна. По ступеню впливу найнебезпечнішим фактором є періодичне схлостування проводів лінії електропередачі. Не менш складним є обрив фазного проводу лінії електропередачі, який супроводжується ростом струмів в 1,5 рази й підвищеною витратою ресурсу ізоляції.

Для діагностування експлуатаційного режиму роботи заглибного електродвигуна запропоновано використовувати в якості критеріїв його роботи коефіцієнти перетворення електроенергії й витрати ресурсу ізоляції.

Розроблена математична модель діагностування витрати ресурсу ізоляції електродвигуна заглибного насоса, яка покладена в основу пристрою діагностування із застосуванням мікроконтролера. Пристрій дозволяє діагностувати режим роботи заглибного електродвигуна, і у випадку аномального режиму відключати його, формуючи сигнал, який передається на пункт обслуговування за допомогою GSM-модуля. Пристрій впроваджений в Кам'янському міжрайонному управлінні водного господарства Запорізької області, Генічеському виробничому управлінні водоканалізацій-

ного господарства Херсонської області. Очікуваний економічний ефект від впровадження становить 206 грн., строк окупності 2,6 роки.

Ключові слова – витрата ресурсу ізоляції, тепловий знос ізоляції, заглибний електродвигун, коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції, коефіцієнт перетворення електричної енергії, мікропроцесорна система, пристрій діагностування режиму роботи.

АННОТАЦІЯ

Курашкин С.Ф. Метод и устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь, 2010.

Обоснована актуальность работы, рассмотрено состояние вопроса, определены цель и задачи исследования. Анализ работ, посвященных исследованию эксплуатационной надежности погружных электродвигателей, позволил обобщить и классифицировать существующие методы и средства их диагностирования, а также сформулировать требования к устройству диагностирования эксплуатационных режимов работы погружных электродвигателей.

По итогам аналитического исследования тепловых проводимостей эквивалентной тепловой схемы замещения погружного электродвигателя предложена методика их определения из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Проведен анализ теплового процесса нагрева погружного электродвигателя, представленного гетерогенной системой, в результате которого получено уравнение нагрева обмотки статора электродвигателя, состоящее из трех парциальных составляющих. Обосновано, что тепловая модель погружного электродвигателя, рассматриваемая с позиции гомогенного тела, имеет существенное расхождение (до 50%) на начальном этапе нагрева в сравнении с уточненной гетерогенной системой. Полученная кривая нагрева электродвигателя, представленного системой трех тел (статор, обмотка ротора, сталь), аппроксимирована суммой двух экспонент, моделирующих процесс нагрева.

Проведено исследование влияния внешних эксплуатационных факторов, влияющих на работу погружного электродвигателя. По степени влияния наиболее опасным фактором является периодическое схлестывание проводов линии электропередачи системы «силовой трансформатор – линия электропередачи – погружной электродвигатель». Не менее сложным является обрыв питающего провода линии электропередачи, который сопровождается ростом фазных токов в 1,5 раза и повышенным расходом ресурса изоляции.

Для диагностирования эксплуатационного режима работы погружного электродвигателя предложено использовать в качестве критериев его работы коэффициенты преобразования электроэнергии и расхода ресурса изоляции.

Разработана математическая модель диагностирования расхода ресурса изоляции электродвигателя погружного насоса, которая положена в основу устройства диагностирования с применением микроконтроллера. Устройство позволяет диагно-

стировать режим работы погружного электродвигателя, и в случае аномального режима отключать его, формируя сигнал, который передается на пункт обслуживания с помощью GSM-модуля. Устройство внедрено в Каменском межрайонном управлении водного хозяйства Запорожской области, Геническом производственном управлении водоканализационного хозяйства Херсонской области. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 206 грн., срок окупаемости 2,6 года.

Ключевые слова – расход ресурса изоляции, тепловой износ изоляции, погружной электродвигатель, коэффициент расхода ресурса изоляции, коэффициент преобразования электрической энергии, микропроцессорная система, устройство диагностирования режима работы.

SUMMARY

Kurashkin S. Method and device for diagnose submersible motor mode. – Manuscript.

Dissertation on competition of candidate technical science degree on specialty 05.09.03 – electrotecnological complexes and systems. – Tavrian state agrotechnological university, Melitopol, 2010.

There was grounded an actuality of dissertation, state of the question was considered. Purpose and research tasks were determined. Analyzing the scientific works, devoted to submersible motor serviceability, there was generalized and classified an existing methods and devices for their diagnostics. It was formulated the requirements to device for diagnose submersible motor mode as well.

The analysis of heating process of submersible motor presented by heterogeneous system was done. As a result it was received the equation of stator winding heating which consists of three exponents. There was stated that heat model of submersible motor, which was considered as homogeneous body, has an essential divergence (up to 50%) on first stage of the heating in comparison with proposing heterogeneous system.

It was made a research about external working factor influence upon submersible motor functioning. An interconnection of open-wire electrical transmission line, which often appears in rural network, was determined as the most dangerous factor. Another hard mode complex is a breaking phase of open-wire electrical transmission line, which is accompanied the current growing in 1.5 times and raised of the insulation resource consumption.

There was offered to use factor of electric energy losses and consumption of insulation resource factor as criteria for submersible motor mode diagnostics.

It was designed a mathematical model of insulation resource consumption for submersible motor, which was put as a base in device using microcontroller for diagnostics. The device allows to diagnose submersible motor mode. In case of abnormal mode it is able to break off an electric motor, form a signal sent to supervisor service by help of GSM-module. The device was introduced in manufacture. Expected economic effect is 206 UAH, pay-back period is 2.6 years.

Keywords – consumption of insulation resource, heat expenditure of insulation, submersible motor, factor of consumption of insulation resource, factor of electric energy losses, microprocessor system, electric motor mode diagnostics.