

ТАВРІЙСЬКА ДЕРЖАВНА АГРОТЕХНІЧНА АКАДЕМІЯ

Попова Ірина Олексіївна

УДК 631.37:621.313.13 (474.3)

**КОНТРОЛЬ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ
ПРИ НЕСИММЕТРІЇ НАПРУГ МЕРЕЖІ**

05.09.16 –Електротехнології та електрообладнання
в агропромисловому комплексі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Мелітополь – 2003

Дисертація є рукопис

Робота виконана у Таврійській державній агротехнічній академії (ТДАТА) Міністерства аграрної політики України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Овчаров Володимир Васильович,
Таврійська державна агротехнічна академія,
завідувач кафедри теоретичної та загальної
електротехніки

Офіційні опоненти доктор технічних наук, доцент
Труфанов Іван Дмитрович,
Запорізький Національний технічний
університет,
професор кафедри “Електропривід та
автоматизація установок”

кандидат технічних наук, доцент
Мунтян Володимир Олексійович,
Таврійська державна агротехнічна академія,
доцент кафедри електропостачання сільського
господарства

Провідна установа: **Харківський державний технічний
університет сільського господарства**
кафедра застосування електроенергії
у сільському господарстві,
Міністерство аграрної політики України,
м. Харків

Захист відбудеться.....2003 р. о.....годині на
засіданні спеціалізованої вченої ради К 18.819.01 Таврійської державної
агротехнічної академії за адресою:
72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, пр. Б.Хмельницький, 18. Навчальний
корпус 1, зал засідань вченої ради академії.

Автореферат розісланий “ “ 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Діордієв В.Т.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досвід експлуатації електрообладнання в сільському господарстві свідчить: аварійність основного елемента електроприводу – асинхронного двигуна – значна, що завдає сільськогосподарському виробництву додаткові збитки через непередбачене припинення роботи цілого ряду технологічно зв'язаного обладнання, недодану продукцію та незаплановані ремонти електрообладнання. Щорічно в сільськогосподарському виробництві з ладу виходять 15 – 25 % асинхронних двигунів. Фактичний термін їх безвідмовної роботи складає 20 – 50 % часу, встановленого заводом-виготовлювачем. Велика аварійність асинхронних двигунів обумовлена особливостями експлуатації їх в агропромисловому комплексі, до специфічних умов якої слід віднести низьку якість напруги в мережі, зокрема, її несиметрію.

Сільські розподільчі мережі 0,38 / 0,22 кВ відзначаються великою довжиною та змішаним підключенням однофазних і трифазних споживачів, тому в них має місце неприпустима несиметрія напруг; у реальних умовах експлуатації несиметричний режим є звичайним режимом зазначених сільських мереж. Аварійність асинхронних двигунів, яка пов'язана з їх роботою при несиметрії напруг мережі, досягає 45 % від загальної кількості тих, що виходять з ладу. Існуючі пристрої діагностування та захисту асинхронних двигунів від аварійних режимів мають недостатню експлуатаційну надійність і не передбачають створення умов для полегшення роботи асинхронних двигунів у аварійних режимах, що свідчить про їх низьку ефективність. Тому дослідження, які спрямовані на вивчення особливостей режимів роботи асинхронних двигунів в умовах постійної несиметрії напруг мережі та на розробку пристроїв контролю, діагностування і полегшення режиму роботи цих двигунів при несиметрії напруг мережі є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Роботу виконано відповідно до плану наукових досліджень Таврійської державної агротехнічної академії на 2001 – 2005 роки за науково-технічною програмою № 1 “Розробка наукових систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України” (державний реєстраційний номер 0102V000678): підпрограма 1.10 “Розробка методів і засобів технічного сервісу електроустаткування і економії енергоресурсів”; напрямок 1.10.3 “Розробка методики діагностування електродвигунів”.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів із короткозамкнутим ротором шляхом контролю і полегшення їх несиметричних режимів в експлуатаційних умовах сільськогосподарського виробництва.

Для досягнення цієї мети поставлено наступні *задачі дослідження*:

1. Розробити математичну модель процесу витрати ресурсу ізоляції асинхронних двигунів із короткозамкнутим ротором при несиметрії напруг сільської мережі і різному ступені завантаження робочих машин.
2. Розробити математичну модель процесу витрати ресурсу ізоляції асинхронних двигунів із короткозамкнутим ротором при полегшенні аварійних режимів.
3. Експериментально дослідити і перевірити математичні моделі витрати ресурсу ізоляції асинхронних двигунів із короткозамкнутим ротором.
4. Розробити пристрій контролю, діагностування, полегшення режимів, сигналізації і захисту асинхронних двигунів із короткозамкнутим ротором при несиметрії напруг мережі.

Об'єкт дослідження – процес витрати ресурсу ізоляції асинхронних двигунів із короткозамкнутим ротором при несиметрії напруг мережі і різному завантаженні робочих машин.

Предмет дослідження – закономірності теплового зносу ізоляції обмоток асинхронних двигунів із короткозамкнутим ротором приводу робочих машин при несиметрії напруг мережі та при різному їх завантаженні.

Методи дослідження. Для одержання теоретичних залежностей використано метод симетричних складових трифазної системи величин, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл. Обробку вихідних даних експериментальних досліджень здійснено математико-статистичними методами на ЕОМ із використанням кореляційного методу аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблено нову математичну модель режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг сільської мережі, яка дозволяє за коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності, коефіцієнтом завантаження робочої машини, з урахуванням особливостей електроприводу оцінювати швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна.
2. Отримано нову математичну модель режимів роботи асинхронного двигуна із короткозамкнутим ротором при глибокій несиметрії і полегшенні режиму за рахунок об'єднання нульових точок обмотки статора двигуна і джерела живлення на час завершення технологічного процесу.
3. Обґрунтовано граничні значення напруги зворотної послідовності для включення пристроїв, які поліпшують якість електричної енергії мережі або полегшують режим роботи асинхронного двигуна.
4. На основі теоретичних і експериментальних досліджень вперше встановлено зв'язок між швидкістю теплового зносу ізоляції двигуна і коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності, коефіцієнтом завантаження асинхронного двигуна для робочих машин із різними робочими характеристиками.

5. Розроблено новий пристрій контролю, діагностування, полегшення режиму роботи, сигналізації і захисту групи асинхронних двигунів потокової технологічної лінії при несиметрії напруг мережі, новизна якого підтверджена патентом на винахід № 42932 А (Україна), який видано 15.11.2001 року, та патентом на винахід № 50344 А (Україна), який видано 15.10.2002 року.

Практичне значення отриманих результатів. Полягає в розробці пристрою, що діагностує режими роботи групи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі за рахунок контролю напруги зворотної послідовності і температури обмотки статора кожного асинхронного двигуна. Він забезпечує включення пристрою, що покращує якість електроенергії мережі при досягненні несиметрії напруги по зворотній послідовності обґрунтованого граничного значення, а також включення полегшуючого режиму роботи для кожного двигуна при глибокій несиметрії на час завершення технологічного процесу. На базі отриманих математичних моделей розроблені комп'ютерні програми розрахунків параметрів пристроїв діагностування та захисту асинхронних двигунів. Використання діагностуючого пристрою дозволить підвищити експлуатаційну надійність електродвигунів потокової технологічної лінії.

За результатами досліджень розроблено проектно-конструкторську документацію на пристрій діагностування режимів роботи асинхронного двигуна, виготовлено дослідний зразок, який впроваджений і пройшов виробничі випробування в СВК “Преслав” Приморського району Запорізької області.

Особистий внесок здобувача. Особисто автору належать наступні матеріали дисертаційної роботи:

- теоретично і експериментально встановлений взаємозв'язок між швидкістю теплового зносу ізоляції двигуна і коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності, коефіцієнтом завантаження асинхронного двигуна та коефіцієнтом, що враховує зміну швидкості обертання при зміні моменту опору робочої машини;
- обґрунтовані і визначені граничні значення величини коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності для включення пристроїв, що покращують якість електричної енергії мережі і полегшують режим роботи кожного асинхронного двигуна потокової лінії при глибокій несиметрії мережі з урахуванням швидкості теплового зносу його ізоляції;
- розроблена методика визначення параметрів асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі з урахуванням коефіцієнта завантаження і особливостей механічних характеристик робочих машин;
- обґрунтована і розроблена схема заміщення датчика температури на базі аналога лямбда-діода.

У співавторстві розроблено:

- математичну модель витрат ресурсу ізоляції асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі, а також при глибокій несиметрії напруг (особистий внесок 80 %, співавтор – Овчаров В.В.);

- структурну і принципову схему блоків пристрою діагностування несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів потокової технологічної лінії (особистий внесок 80 %, співавтор – Овчаров В.В.);
- принципову схему аналога лямбда-діода як датчика температури (особистий внесок 80 %, співавтор – Жарков В.Я.);
- принципову схему аналога лямбда-діода як датчика напруги (особистий внесок 60 %, співавтор – Чураков А.Я.).

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи заслуховувалися і обговорювалися на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів і студентів (м. Мелітополь, ТДАТА, 1998 – 2002 рр.), міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” (м. Харків, ХДТУСГ, 2000 р.), міжнародній науково-технічній конференції “Енергетика в АПК” (м. Мелітополь, ТДАТА, 2002 р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковано в 10 статтях, отримано 2 патенти України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел (119 найменувань джерел) та 11 додатків. Загальний об’єм роботи складає 209 сторінок машинописного тексту, з них основний зміст роботи складає 148 сторінок. Дисертація містить 25 таблиць, 39 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, розкрито стан наукової задачі та її значення, сформульовано мету і задачі дослідження, основні положення, що складають наукову новизну і практичне значення роботи.

У *першому розділі* “**Стан питання і задачі дослідження**” розглянуто особливості роботи асинхронних двигунів електроприводу сільськогосподарських машин. Проаналізовано стан експлуатації цих двигунів у сільськогосподарському виробництві та специфічні умови експлуатації, зокрема, несиметрію напруг сільської мережі, наслідки якої – збільшення втрат електричної енергії, підвищення нагріву, зниження експлуатаційної надійності асинхронних двигунів.

Питання впливу несиметрії напруг на режими роботи сільських мереж і окремих її споживачів розглянуто в працях Гетьманенка В.М., Грундуліса А.О., Данилова В.М., Корчемного М.О., Левіна М.С., Мартиненка І.І., Мусіна А.М., Овчарова В.В., Рожавського С.М., Тубіса В.Ф. і інших вчених.

Існуючі методи дослідження режимів роботи асинхронних двигунів, як правило, не враховують залежності їх від несиметрії напруги, завантаження робочих машин та особливостей їх механічних характеристик. За критерії оцінки режимів роботи асинхронних двигунів беруться, як правило, сила струму та температура обмотки, не використовується такий об’єктивний показник, як швидкість витрати ресурсу ізоляції обмоток двигунів.

З аналізу літературних джерел встановлено, що пристрої діагностування режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі здійснюють

контроль струму (максимального, мінімального і нульової послідовності), кута зсуву фаз між споживаними струмами, теплової дії струму, напруги (прямої, зворотної і нульової послідовностей) і температури (обмотки статора, сталі статора і корпусу). Існуючі пристрої відключають двигуни під час виконання технологічного процесу при досягненні граничного значення контрольованого параметру, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат на ліквідацію наслідків аварійного відключення.

Тому при розробці пристроїв діагностування і захисту доцільно передбачити полегшення режиму роботи аварійних двигунів на час завершення технологічного процесу у випадку глибокої несиметрії напруг і при досягненні несиметрії напруг гранично припустимого значення. В роботі поставлена задача дослідити режими роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі з урахуванням коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності, коефіцієнта завантаження робочої машини та особливостей електроприводу і розробити удосконалений пристрій.

В *другому розділі* “**Розробка математичної моделі режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі**” теоретично обґрунтовано математичну модель режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі в сталому режимі і різних завантаженнях та механічних характеристиках робочих машин.

За параметр, що характеризує витрату ресурсу ізоляції асинхронного двигуна, прийнято швидкість теплового зносу ізоляції:

$$\varepsilon = \varepsilon_H \cdot e^{B \left(\frac{1}{\Theta_H} - \frac{1}{\Theta_y} \right)}, \quad (1)$$

де ε_H – номінальна швидкість теплового зносу ізоляції, бгод/год. (дорівнює 1 базовій годині ресурсу ізоляції за 1 годину роботи);

B – параметр, що характеризує клас ізоляції, К;

Θ_H – абсолютна номінальна стала температура обмотки статора, К;

Θ_y – абсолютна фактична стала температура обмотки статора, К.

Абсолютна фактична стала температура обмотки статора:

$$\Theta_y = \tau_y + \vartheta_{cp} + 273, \quad (2)$$

де τ_y – стале перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, °С;

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

Стале перевищення температури обмотки статора:

$$\tau_y = \tau_H \frac{a + k_i^2}{a + 1 - \alpha \tau_H (k_i^2 - 1)}, \quad (3)$$

де τ_H – номінальне перевищення температури обмотки статора, °С;

- a – коефіцієнт втрат потужності;
 k_i – кратність сили струму відносно номінального значення;
 α – температурний коефіцієнт опору матеріалу обмотки статора, $1/^\circ\text{C}$.

При визначенні залежності фазних струмів досліджуваного асинхронного двигуна від несиметрії напруг мережі проаналізовано електричне коло, яке складається з джерела симетричної трифазної електрорушійної сили, симетричної лінії електропередачі (ЛЕП) з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ та несиметричного навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c : статичного навантаження (несиметричного побутового) і симетричного трифазного навантаження (досліджуваній і інші асинхронні двигуни).

Несиметрія напруг у споживача залежить від несиметрії струмів ЛЕП, яка з'єднує даний споживач із джерелом живлення. У досліджуваному колі проведено еквівалентне перетворення:

- несиметричне навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c замінено на еквівалентне симетричне навантаження з фазними опорами Z_{ea} , Z_{eb} , Z_{ec} ;
- симетрична ЛЕП з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ замінена несиметричною ЛЕП з опорами $Z_{елА}$, $Z_{елВ}$, $Z_{елС}$.

Розрахункова схема після еквівалентного перетворення кола показана на рис.1. Введено наступні позначення:

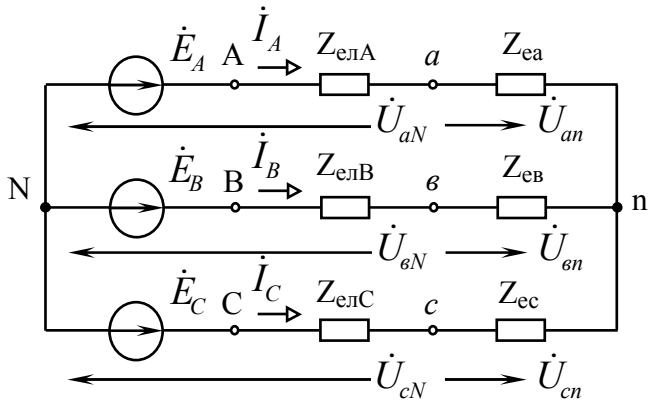


Рис.1. Розрахункова еквівалентна схема трифазного кола.

$$\frac{\dot{U}_{aN}}{\dot{E}_A} = m; \quad \frac{\dot{U}_{bN}}{\dot{E}_B} = n; \quad \frac{\dot{U}_{cN}}{\dot{E}_C} = p; \quad (4)$$

$$\frac{Z_{ad}}{Z_{ea}} = \alpha; \quad \frac{Z_{bd}}{Z_{eb}} = \beta; \quad \frac{Z_{cd}}{Z_{ec}} = \gamma, \quad (5)$$

де Z_{ad} , Z_{bd} , Z_{cd} – комплекси повних фазних опорів досліджуваного двигуна, Ом.

Опори несиметричної еквівалентної ЛЕП у залежності від несиметрії напруг мережі визначаються наступним чином:

$$Z_{елА} = \frac{Z_a(1-m)}{\alpha m}; \quad Z_{елВ} = \frac{Z_b(1-n)}{\beta n}; \quad Z_{елС} = \frac{Z_c(1-p)}{\gamma p}. \quad (6)$$

Використавши метод симетричних складових і розклавши напруги \dot{U}_{Aa} , \dot{U}_{Bb} , \dot{U}_{Cc} на симетричні складові \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_0 , прийнявши фазу А за основну для розрахункових схем прямої, зворотної і нульової послідовностей кола, складено систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1; \\ 0 &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елА} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \\ a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елВ} (a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2); \\ a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елС} (a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де \dot{E}_1 – комплекс ЕРС фази джерела живлення, яка прийнята рівною за модулем номінальній фазній напрузі асинхронного двигуна, В;
 Z_1, Z_2 – повні опори обмоток асинхронного двигуна прямої й зворотної послідовностей, Ом;
 a – фазний множник.

Визначивши із системи рівнянь (7) струми прямої \dot{I}_1 і зворотної \dot{I}_2 послідовностей, а також напруги прямої \dot{U}_1 , зворотної \dot{U}_2 і нульової \dot{U}_0 послідовностей, знайдено сили фазних струмів $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ асинхронного двигуна:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2. \quad (8)$$

При несиметрії напруг мережі фазні струми асинхронного двигуна різні, тому використано середньоквадратичне значення фазного струму:

$$I_{c.f.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}, \quad (9)$$

де I_i – сила струму у i -ій фазі двигуна, А;
 n – кількість фаз.

Аналіз системи рівнянь (7) показав, що струми у фазах асинхронного двигуна залежать від несиметрії напруг мережі (симетричних складових напруг прямої U_1 і зворотної U_2 послідовностей) і повних опорів обмоток (прямої і зворотної послідовностей), тобто:

$$I = f(U_1, U_2, Z_1, Z_2). \quad (10)$$

У загальному випадку для обертових машин $Z_1 > Z_2$. Використавши параметри спрощеної Г-образної схеми заміщення, комплекси повних опорів струмам прямої й зворотної послідовностей визначено таким чином:

$$Z_1 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r1})}{Z_m + Z_s + Z_{r1}}; \quad Z_2 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r2})}{Z_m + Z_s + Z_{r2}}, \quad (11)$$

$$\text{де } Z_m = r_1 + j(x_1 + x_{\mu}); \quad Z_s = r_1' + jx_1'; \quad Z_{r1} = r_2''/s + jx_2''; \quad Z_{r2} = r_2''/(2-s) + jx_2''. \quad (12)$$

Повні опори фаз асинхронного двигуна є функцією ковзання s . Для визначення залежності ковзання від несиметрії напруг мережі прийнято:

$$M = M_1 - M_2; \quad (13)$$

$$M = M_c, \quad (14)$$

де M_1, M_2 – моменти, що залежать від напруг прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей, які прикладені до обмоток двигуна, Н·м;
 M_c – момент опору робочої машини, Н·м.

Напруги прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей мережі, а також коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності визначено так:

$$\dot{U}'_1 = 1/3(\dot{U}_{ab} + a \dot{U}_{bc} + a^2 \dot{U}_{ca}); \quad (15)$$

$$\dot{U}'_2 = 1/3(\dot{U}_{ab} + a^2 \dot{U}_{bc} + a \dot{U}_{ca}) ; \quad (16)$$

$$\kappa_{U2\%} = (U_2' / U_{нл}) \cdot 100, \quad (17)$$

де $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ – комплекси лінійних напруг мережі, В;
 $U_{нл}$ – номінальна лінійна напруга мережі, В.

Рівняння системи “робоча машина – асинхронний двигун” має вигляд:

$$M_0 + (k_3 M_{с.н.} - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x = M_1 - M_2, \quad (18)$$

де M_0 – момент опору тертя частин робочої машини, Н·м;
 $M_{с.н.}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;
 s_H – номінальне ковзання;
 k_3 – коефіцієнт завантаження;
 x – коефіцієнт, що характеризує механічну характеристику робочої машини.

Таким чином:

$$s = f(U_1, U_2, M_0, M_{с.н.}, s_H, x). \quad (19)$$

Для дослідження залежності (19) було лінійаризовано робочі ділянки механічних характеристик: 1) при номінальній напрузі мережі; 2) при симетричній складовій напруги прямої послідовності; 3) при симетричній складовій напруги зворотної послідовності (рис.2) і визначено моменти M_1 і M_2 :

$$M_1 = \frac{s}{s_H} \left(\frac{U_1'}{U_{нл}} \right)^2 M_H ; \quad (20)$$

$$M_2 = M_{П2} (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = M_{П2} s, \quad (21)$$

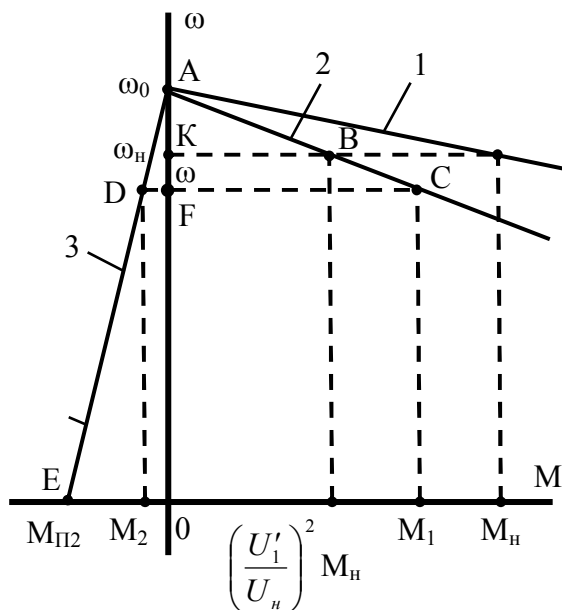


Рис.2. Лінійаризовані робочі ділянки механічних характеристик.

$$\text{де } M_{П2} = \left(\frac{U_2'}{U_{нл}} \right)^2 M_{П}. \quad (22)$$

Одержано такі рівняння ковзання у функції несиметрії напруг мережі і коефіцієнта завантаження робочої машини:

при
 $x = 0$:

$$s = \frac{\kappa_3}{\frac{u_1}{s_H} - u_2^2 m_{П}} ; \quad (23)$$

$x = 1$:

$$s = \frac{m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{1-s_H}}{\frac{\kappa_3 - m_0}{1-s_H} + \frac{1}{s_H} u_1^2 - m_{П} u_2^2} ; \quad (24)$$

$x = 2$:

$$s_{1,2} = \frac{-\epsilon \pm \sqrt{\epsilon^2 - 4dc}}{2d}, \quad (25)$$

$$\text{де } d = \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2}; \quad \epsilon = m_{II} u_2^2 - \frac{1}{s_H} u_1^2 - 2 \frac{(\kappa_3 - m_0)}{(1 - s_H)^2}; \quad c = m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2};$$

$$m_0 = \frac{M_0}{M_H}; \quad \kappa_3 = \frac{M_c}{M_{c.H}}; \quad m_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}; \quad u_1 = \frac{U'_1}{U_{нл}}; \quad u_2 = \frac{U'_2}{U_{нл}}. \quad (26)$$

Швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна в сталому режимі роботи залежить від несиметрії напруг мережі, технічних даних двигуна і робочої машини, коефіцієнта завантаження робочої машини, виду її механічної характеристики, температури навколишнього середовища. Таким чином:

$$\epsilon = f(U'_1, U'_2, B, \Theta_H, \mathcal{G}_{CP}, \tau_H, a, \alpha, r'_1, r_2'', x_1', x_2'', s_H, s_K, \kappa_3, M_0, M_{c.H}, x). \quad (27)$$

Отримано залежності $I_{c.ф.} = f(\kappa_{U2\%}, \kappa_3)$ і $\epsilon = f(\kappa_{U2\%}, \kappa_3)$ для асинхронного двигуна 4A90L4Y3 (рис.3).

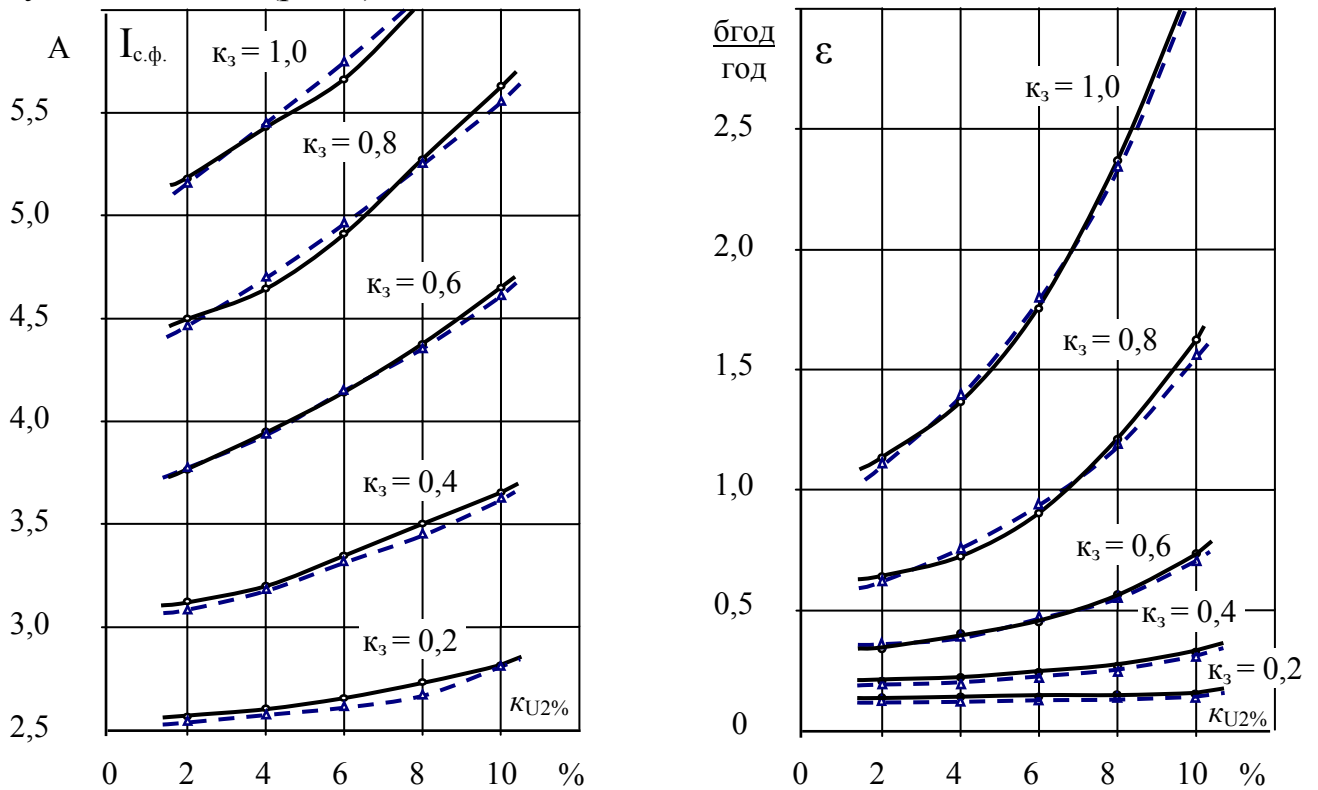


Рис.3. Результати теоретичних (-----) і експериментальних (—) досліджень режимів роботи асинхронного двигуна 4A90L4Y3 при несиметрії напруг мережі та $x = 1$ і $\mathcal{G}_{CP} = 40^\circ\text{C}$.

Аналіз залежностей показав, що швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна залежить від механічної характеристики робочої машини, коефіцієнту несиметрії напруги по зворотній послідовності та коефіцієнту завантаження робочої машини. Наприклад, гранично припустиме значення коефіцієнта

несиметрії напруги по зворотній послідовності для досліджуваного асинхронного двигуна дорівнює 6 %, якщо він працює з коефіцієнтом завантаження 0,8.

Розроблено також математичну модель теплових процесів в асинхронному двигуні при глибокій несиметрії напруг і різному завантаженні робочої машини в залежності від її механічної характеристики. У випадку глибокої несиметрії напруг мережі (обриву проводу ЛЕП) ковзання двигуна залежить від кратності напруг прямої u_1 , зворотної u_2 послідовностей, коефіцієнта завантаження κ_3 та технічних даних двигуна (кратності максимального моменту m_k , критичного ковзання s_k , номінального ковзання s_n при номінальних напрузі і циклічній частоті).

Ковзання двигуна при даному режимі роботи визначено, використавши метод ітерацій, за формулою:

$$s = \frac{s_k}{2 \left[\frac{m_k}{2 \left(m_0 + (\kappa_3 - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x \right)} + \sqrt{\left(\frac{m_k}{2 \left(m_0 + (\kappa_3 - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x \right)} \right)^2 - 1} \right]} \quad (28)$$

Прийнявши $\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0$ для системи рівнянь (7), визначено сили фазних струмів асинхронного двигуна при глибокій несиметрії напруг мережі:

$$\dot{I}_B = a\dot{I}_2(1-a); \quad \dot{I}_C = -a\dot{I}_2(1-a). \quad (29)$$

Таким чином, при глибокій несиметрії напруг мережі для еквівалентного кола (рис.1) сила струмів прямої і зворотної послідовностей, а також сила фазних струмів двигуна в неушкоджених фазах рівні за модулем. Це призводить до зниження обертаючого моменту і зростання сили фазних струмів, що супроводжується підвищенням нагріванням обмоток і підвищенням тепловим зносом ізоляції асинхронного двигуна (рис.4).

У *третьому розділі* “**Аналіз режиму роботи асинхронного двигуна при глибокій несиметрії напруг мережі і з’єднанні нульових точок джерела живлення і обмотки статора**” проаналізовано зміну сили середньоквадратичних фазних струмів і швидкості теплового зносу ізоляції двигуна при роботі в даному режимі в порівнянні з режимом роботи двигуна при глибокій несиметрії з ізольованою нульовою точкою.

При глибокій несиметрії напруг мережі і з’єднанні нульових точок джерела живлення і обмотки статора одночасно із симетричними складовими струмів прямої і зворотної послідовностей є складові струмів нульової послідовності, що викликають появу пульсуючого магнітного поля. Комплекс повного опору нульової послідовності двигуна визначено таким рівнянням:

$$Z_0 = r_1' + k(jx_1' + jx_2''), \quad (30)$$

де k – коефіцієнт, що враховує взаємний індуктивний зв’язок обмоток статора.

Ковзання при даному режимі роботи, використавши метод ітерацій, знайдено за рівнянням:

$$s = \frac{s_k}{1,6 \frac{m_k}{1,6 \left(m_0 + (\kappa_3 - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x \right)} + \sqrt{\left(\frac{m_k}{1,6 \left(m_0 + (\kappa_3 - m_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x \right)} \right)^2 - 1}}. \quad (31)$$

Для визначення симетричних складових фазних струмів складено систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1; \\ 0 &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 &= 0; \\ a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{enB} (a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0); \\ a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{enC} (a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0); \\ 0 &= (Z_0 + 3Z_N) \dot{I}_0 + \dot{U}_0. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Вирішив систему рівнянь відносно \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_0 , знайдено комплекси фазних струмів \dot{I}_A , \dot{I}_B і \dot{I}_C :

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 0; \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad (33)$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3\dot{I}_0. \quad (34)$$

На рис.4 приведено порівняння графічних залежностей $I_{c.\phi} = f(\kappa_U, \kappa_3)$ і

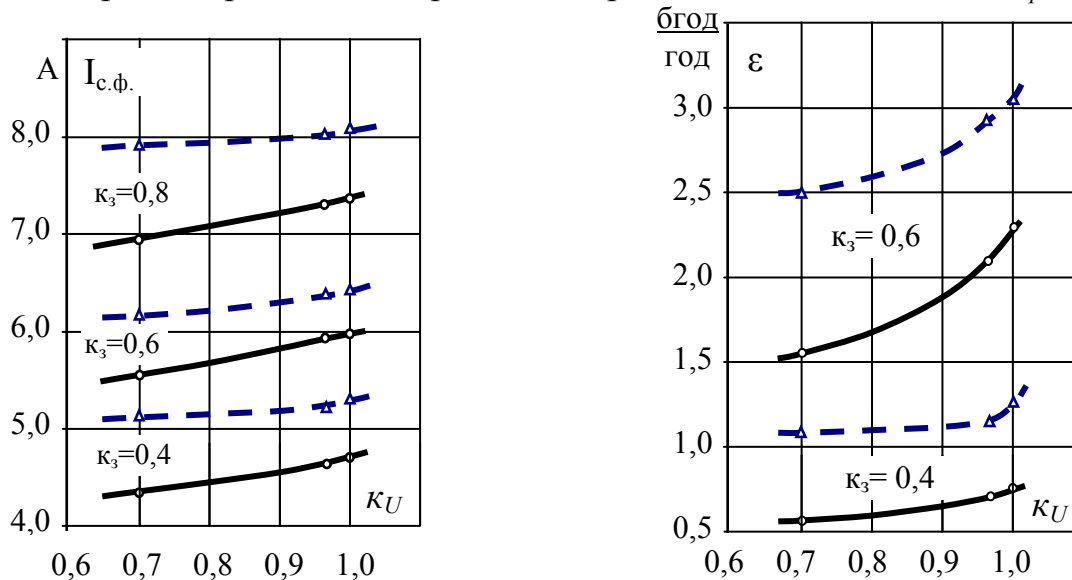


Рис.4. Результати теоретичних досліджень режимів роботи асинхронного двигуна 4A90L4УЗ при глибокій несиметрії з ізольованою нульовою точкою (----) і з'єднаними нульовими точками обмотки статора і джерела живлення (—) при $x = 1$, $\vartheta_{CP} = 40^\circ\text{C}$.

$\varepsilon = f(\kappa_U, \kappa_3)$ асинхронного двигуна 4A90L4У3 при глибокій несиметрії напруг мережі з ізолюваною нульовою точкою і при з'єднанні нульових точок обмотки статора і джерела живлення (де κ_U – відношення лінійної напруги відносно номінального значення).

Встановлено, що сила фазних струмів при глибокій несиметрії і з'єднанні нульових точок джерела живлення і обмотки статора двигуна при коефіцієнтах завантаження $\kappa_3 = 0,4 - 0,6$ зменшується в порівнянні зі струмами в аналогічному режимі роботи двигуна з ізолюваною нульовою точкою на 12 – 18 %. Відповідно знижується швидкість теплового зносу ізоляції обмотки статора на 40 – 60 %. Тому режим роботи асинхронного двигуна при глибокій несиметрії і об'єднанні нульових точок обмотки статора та джерела живлення при порівнянні з аналогічним його режимом роботи з ізолюваною нульовою точкою є більш сприятливим для досліджуваного асинхронного двигуна з точки зору витрати ресурсу ізоляції.

У четвертому розділі “Експериментальне дослідження режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі” викладено програму дослідження, якою передбачено експериментальне дослідження впливу коефіцієнта завантаження і напруги на швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна при роботі в наступних режимах: несиметричному повнофазному, при глибокій несиметрії в автономному режимі, а також при глибокій несиметрії і з'єднанні нульових точок обмотки статора і джерела живлення;

Дослідження режимів роботи асинхронного двигуна типа 4A90L4У3 проведено на установці, що складалася із силового трансформатора, генератора постійного струму, що виконував функцію робочої машини, досліджуваного двигуна, вимірювальних приладів, а також споживачів електричної енергії: освітлювальної установки і нагрівальних елементів.

Розроблено методику дослідження режимів роботи асинхронного двигуна:

- несиметрію напруг мережі створювалась трифазним трансформатором шляхом підключення кожної обмотки двигуна на різні відпайки його обмоток, а додатково – підключенням однофазного освітлювального та нагрівального навантаження;
- момент опору робочої машини, з урахуванням її коефіцієнта завантаження, здійснювався зміною сили струму в якірному колі генератора;
- швидкість теплового зносу визначалась аналітично через середньоквадратичне значення фазного струму, отриманого в результаті експерименту при відповідних несиметрії напруг мережі, коефіцієнті завантаження робочої машини і температурі навколишнього середовища.

При опрацюванні результатів досліджень проведена статистична оцінка отриманих результатів. В підсумку виявлено наступне: коефіцієнт варіації середньоквадратичного значення сили фазного струму для досліджуваного двигуна не перевищує 1,9 %, а швидкості теплового зносу ізоляції не більш 4,92 %.

Ряди розподілу швидкості теплового зносу ізоляції і середньоквадратичних значень сили фазного струму при зміні $\kappa_{U2\%}$ і κ_3 для асинхронного двигуна є майже симетричними ($As < 0,385$ для швидкості теплового зносу ізоляції і $As < 0,371$ для

середньоквадратичного значення сили фазного струму, де As – коефіцієнт асиметрії), розподіл за формою близький до нормального.

Дослідження зв'язків між швидкістю теплового зносу ізоляції, коефіцієнтом завантаження асинхронного двигуна і коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності виявило наявність сильного позитивного кореляційного зв'язку, що підтверджено кореляційними відношеннями $\eta = 0,94 - 0,97$.

Порівняння теоретичних і експериментальних залежностей $I_{c.ф.} = f(\kappa_U, \kappa_3)$ при глибокій несиметрії напруг мережі представлено на рис.5.

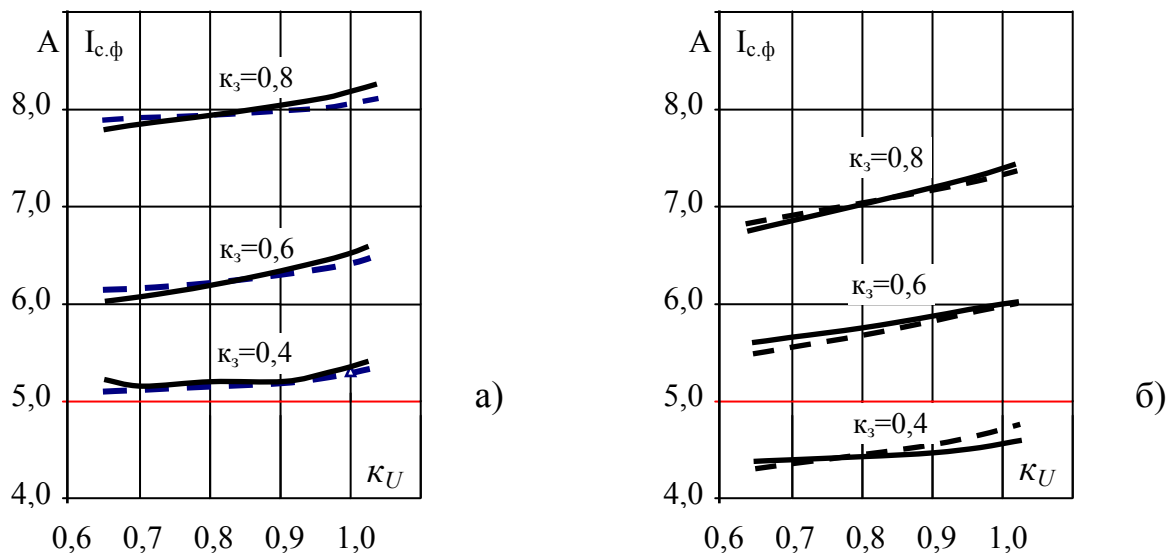


Рис.5. Результати теоретичних (-----) і експериментальних (—) досліджень залежності $I_{c.ф.} = f(\kappa_U, \kappa_3)$ для асинхронного двигуна 4A90L4У3 при несиметрії напруг мережі та $x = 1$:

а) при глибокій несиметрії з ізолюваною нульовою точкою;

б) при з'єднанні нульових точок обмотки статора і джерела живлення.

Аналіз залежностей (рис.3, 5) показав адекватність математичних моделей режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі та при полегшенні його режиму роботи при глибокій несиметрії реальним режимам (відхилення даних експериментальних досліджень від теоретичних не перевищує 5 %).

У п'ятому розділі **“Розробка пристрою контролю, діагностування та захисту групи асинхронних двигунів”** за результатами теоретичних і експериментальних досліджень про вплив несиметрії напруг мережі і коефіцієнта завантаження робочої машина на швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна, зокрема, на температуру його обмотки, розроблено технічні вимоги до пристрою контролю, діагностування режимів роботи і захисту групи асинхронних двигунів:

- контроль напруги зворотної послідовності мережі на ввіді шафи керування потоковою лінією; світлову сигналізацію про досягнення несиметрії напруг гранично припустимого значення і включення пристрою симетрування напруг;

- контроль температури обмоток і напруги зворотної послідовності на кожному двигуні;
- включення полегшуючого режиму для кожного двигуна при глибокій несиметрії напруг на ньому;
- відключення двигуна від мережі при досягненні температури обмотки гранично припустимого значення;
- дискретну індикацію режимів роботи контрольованих асинхронних двигунів і справності кіл датчиків.

Блок-схема пристрою діагностування, що дозволяє контролювати режим роботи чотирьох двигунів, показана на рис.6.

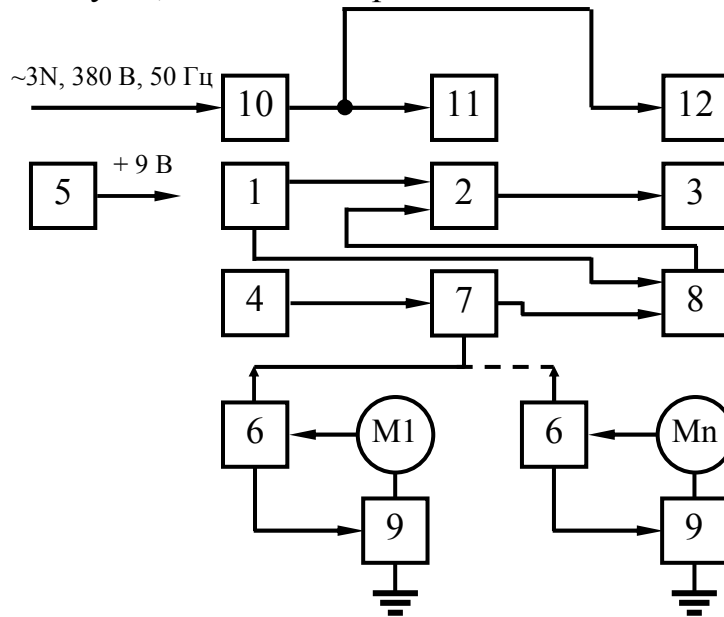


Рис.6. Блок-схема пристрою діагностування режимів роботи асинхронних двигунів:

1 – блок часових позицій; 2 – блок виявлення ушкоджень кіл датчиків та номеру аварійного двигуна; 3 – блок сигналізації й захисту від аномальних режимів двигунів і датчиків; 4 – кероване джерело напруги; 5 – стабілізоване джерело живлення; 6 – датчики аномальних режимів; 7 – L-C контур; 8 – блок виявлення вхідних сигналів; 9 – виконуючий орган; 10 – фільтр напруги; 11 – світлова сигналізація; 12 – симетруючий пристрій.

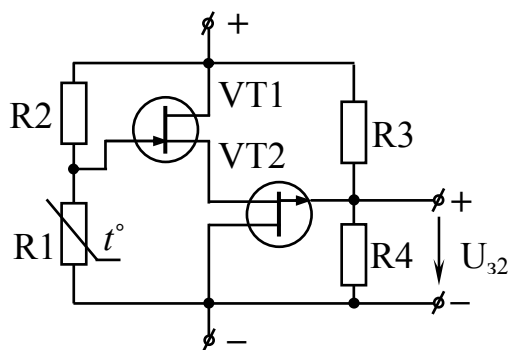


Рис.7. Принципова електрична схема аналога лямбда-діоду.

Датчик контролю аномального режиму роботи асинхронного двигуна – аналог лямбда-діода, який складається з комплементарної пари польових транзисторів із каналами p - і n -типів, включених за схемою з об'єднаними витокami (рис.7).

Проведено дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) аналога лямбда-діоду, які показали можливість зміни його ВАХ у широких межах за рахунок підключення затворів польових транзисторів до резистив-

них ділників напруги та зміни напруги U_{32} на затворі польового транзистора VT2, який приєднаний до вихідного затискача фільтру напруги зворотної послідовності, що здійснює контроль несиметрії напруг на асинхронному двигуні. Підбором параметрів резисторів R1 – R4 формується необхідна ВАХ аналога лямбда-діода, що забезпечує необхідну температуру спрацьовування пристрою. Первинними перетворювачами температури в датчику аномальних режимів є позистори, встановлені в обмотці асинхронного двигуна. Датчики контролю аномального режиму роботи, які встановлюються на асинхронних двигунах потокової технологічної лінії та приєднуються до пристрою за допомогою одного загального проводу.

Проведено оцінку показників надійності пристрою діагностування: імовірність безвідмовної роботи пристрою складає 0,986, середній час безвідмовної роботи становить 17 500 год.

Виробничі випробування пристрою діагностування проведено на технологічній лінії змішування кормів СКО-Ф-3 у кормоцеху СВК “Преслав” Приморського району Запорізької області. Річний економічний ефект від використання пристрою діагностування режимів роботи на лінії СКО-Ф-3 склав 107 грн., згідно з техніко-економічними розрахунками термін окупності капітальних вкладень становить 1,7 року.

ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу методів і засобів діагностування асинхронних двигунів встановлено, що існуючі технічні засоби не дозволяють об'єктивно оцінювати режими роботи двигунів при несиметрії напруг мережі. На основі проведених в роботі теоретичних і експериментальних досліджень зазначених режимів роботи, в тому числі і при їх полегшенні, запропоновано новий метод і пристрій діагностування та полегшення режимів роботи асинхронних двигунів.

2. Отримано математичну модель теплових процесів в асинхронному двигуні з короткозамкнутим ротором при несиметрії напруг мережі, при різному завантаженні робочих машин у залежності від їх механічних характеристик. Встановлено, що витрата ресурсу ізоляції асинхронного двигуна перевищує номінальні значення при коефіцієнті несиметрії напруги по зворотній послідовності рівним 6 % і більше, при коефіцієнті завантаження робочої машини 0,8 і вище.

3. Отримано математичну модель теплових процесів в асинхронному двигуні з короткозамкнутим ротором при глибокій несиметрії напруг мережі при різному завантаженні робочих машин у залежності від їх механічних характеристик. Встановлено, що при цьому витрата ресурсу ізоляції перевищує номінальне значення при коефіцієнті завантаження 0,4 і вище.

4. Отримано математичну модель теплових процесів в асинхронному двигуні з короткозамкнутим ротором при глибокій несиметрії напруг мережі і з'єднанні нульової точки обмотки статора двигуна з нульовою точкою джерела живлення. Встановлено, що в цьому випадку витрата ресурсу ізоляції зменшується на 60 % в порівнянні з аналогічним режимом при ізольованій нульовій точці обмотки статора двигуна (при коефіцієнті завантаження 0,4).

5. Експериментальні дослідження показали адекватність математичних моделей режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг мережі та при полегшенні його режиму роботи при глибокій несиметрії реальним режимам (відхилення даних експериментальних досліджень від теоретичних не перевищує 5 %)

6. Розроблено пристрій контролю, діагностування, полегшення режимів роботи і захисту асинхронних двигунів потокової технологічної лінії при несиметрії напруг мережі.

7. Дослідження і експериментальні випробування пристрою діагностування режимів роботи асинхронних двигунів довели, що імовірність безвідмовної роботи пристрою складає 0,986, середній час безвідмовної роботи становить 17 500 годин.

8. Річний економічний ефект від впровадження пристрою діагностування режимів роботи електродвигунів лінії змішування кормів СКО-Ф-3 складає 107 грн., термін окупності капіталовкладень дорівнює 1,7 року.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Попова И.А.* Влияние асимметрии приложенного напряжения на работу асинхронного двигателя // Техника в сельскохозяйственном производстве: Труды / Таврическая государственная агротехническая академия. – Мелитополь: ТГАТА. – Вып.1, Т.3. – 1997. – С.78 – 80.
2. *Попова І.О., Грищенко О.К.* Аналіз впливу асиметрії напруги на процес теплового зносу ізоляції асинхронних електродвигунів // Труды / Таврическая государственная агротехническая академия. – Мелитополь: ТГАТА. – Вып.1, Т.8. – 1999. – С.14 – 18. (Доля здобувача - 80 %, розробила основні положення).
3. *Попова І.О.* Використання струмів та напруг нульової послідовності для діагностування ізоляції асинхронних двигунів // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вып.1, Т.22. – 1999. – С.35 – 39.
4. *Жарков В.Я., Попова І.О.* Застосування аналогу лямбда-діода для діагностики та захисту електрообладнання від анормальних режимів роботи // Науковий вісник / Національний аграрний університет. – К.: НАУ. – Вып.19. – 1999. – С.211 – 214. (Доля здобувача - 50 %, розробила схему датчика температури на базі аналога лямбда-діода).
5. *Попова І.О.* Дослідження еквівалентної схеми заміщення аналога лямбда-діода // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вып.1, Т.17. – 2000. – С.73 – 77.
6. *Попова І.О., Овчаров В.В.* Пристрій безперервного діагностування режимів роботи групи асинхронних електродвигунів // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вып.1, Т.19. – 2001. – С.33 – 37. (Доля здобувача - 70 %, розробила і обґрунтувала структурну схему пристрою діагностування режимів роботи).
7. *Жарков В.Я., Попова І.О.* Дослідження схеми заміщення аналога лямбда-діода в якості датчика температури // Питання електрифікації сільського господарства // Вісник Харківського державного технічного університету сільського

- господарства. – Харків: ХДТУСГ. – Вип.3. – 2000. – С.178 – 180. (Доля здобувача - 80 %, провела експеримент і одержала результати досліджень).
8. *Попова І.О., Жарков А.В.* Система телеконтролю температур на базі аналога лямбда-діода // *Праці / Таврійська державна агротехнічна академія.* – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.1, Т.24. – 2001. – С.97 – 100. (Доля здобувача - 70 %, розробила основні положення).
 9. *Попова І.О., Овчаров В.В.* Математична модель режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруги // *Праці / Таврійська державна агротехнічна академія.* – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.5. – 2002. – С.11 – 18. (Доля здобувача - 80 %, розробила основні положення математичної моделі витрати ресурсу ізоляції).
 10. *Попова І.О.* Визначення параметрів асинхронного електродвигуна при несиметрії напруги // *Праці / Таврійська державна агротехнічна академія.* – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.6. – 2002. – С.90 – 94.
 11. Патент 42932 А Україна, МПК⁷ G01K7/16. Пристрій для телеконтролю температур / *І.О. Попова, А.В. Жарков* (Україна). – № 2000020610; Заявл. 04.02.2000; Опубл. 15.11.2001, Бюл. № 10. (Доля здобувача - 60 %, розробила основні положення, склала формулу винаходу).
 12. Патент 50344 А Україна, МПК⁷ H02H7/09. Пристрій захисту електродвигунів при несиметрії напруги / *І.О. Попова, А.Я. Чураков* (Україна). – № 2001128981; Заявл. 25.12.2001; Опубл.15.10.2002, Бюл. № 10. (Доля здобувача - 60 %, розробила основні положення, склала формулу винаходу).

АНОТАЦІЯ

Попова І.О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.16 – електротехнології та електрообладнання в агропромисловому комплексі. – Таврійська державна агротехнічна академія, Мелітополь, 2003.

Робота присвячена підвищенню експлуатаційної надійності асинхронних двигунів при несиметрії напруги сільської мережі. Розроблено математичну модель режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруг сільської мережі, яка дозволяє за коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності, коефіцієнтом завантаження робочої машини, з урахуванням особливостей електроприводу оцінювати швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна. Одержано математичну модель режимів роботи асинхронного двигуна при глибокій несиметрії і полегшенні режиму за рахунок об'єднання нульових точок обмотки статора двигуна і джерела живлення на час завершення технологічного процесу. Запропоновано пристрій, що діагностує режими роботи групи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі за рахунок контролю напруги зворотної послідовності і температури обмотки статора кожного асинхронного двигуна. Він забезпечує включення симетруючого пристрою при досягненні несиметрії напруги по зворотній послідовності обґрунтованого граничного значення, а також

включення полегшуючого режиму роботи для кожного двигуна при глибокій несиметрії на час завершення технологічного процесу. Використання діагностуючого пристрою дозволяє зменшити швидкість теплового зносу ізоляції асинхронних двигунів потокової технологічної лінії, які працюють при несиметрії напруги мережі та підвищити їх термін використання.

Ключові слова – витрата ресурсу ізоляції, тепловий знос ізоляції, асинхронний двигун, несиметрія напруг мережі, коефіцієнт напруги по зворотній послідовності, симетрична складова напруги, сила струму, пристрій діагностування режимів роботи.

АННОТАЦІЯ

Попова И.А. Контроль режимов работы асинхронных двигателей при несимметрии напряжений сети. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.16 – электротехнологии и электрооборудование в агропромышленном комплексе. – Таврическая государственная агротехническая академия, Мелитополь, 2003.

Работа посвящена повышению эксплуатационной надежности асинхронных двигателей, работающих в условиях несимметрии напряжения сельских сетей. На основе анализа методов исследования режимов работы асинхронных двигателей, обобщения и классификации существующих устройств диагностирования и защиты их при несимметрии напряжений сети поставлена задача исследования режимов работы асинхронных двигателей при несимметрии напряжений сети и сформулированы требования к устройству контроля, диагностирования, облегчения режима работы и защиты группы двигателей поточной технологической линии.

Разработана математическая модель скорости расхода ресурса изоляции асинхронного двигателя при несимметрии напряжений сети и разной загрузке рабочих машин в зависимости от их механических характеристик. Установлено, что скорость теплового износа изоляции асинхронного двигателя превышает номинальное значение, если коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности больше 6 % при коэффициенте загрузки рабочей машины 0,8 и выше.

Установлено, что при глубокой несимметрии напряжений сети скорость расхода ресурса изоляции асинхронного двигателя превышает номинальное значение при коэффициенте загрузки 0,4 и выше.

Получена математическая модель тепловых процессов в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором при глубокой несимметрии напряжений сети и соединении нулевой точки обмотки статора асинхронного двигателя с нулевой точкой источника питания. Установлено, что в этом случае при одном и том же коэффициенте загрузки ($k_s = 0,4$) скорость теплового износа изоляции асинхронного двигателя уменьшается на 60 % по сравнению с аналогичным режимом и изолированной нулевой точкой обмотки статора.

Экспериментальными исследованиями подтверждена адекватность полученных математических моделей реальным режимам (отклонение экспериментальных данных от теоретических не превышает 5 %).

Обоснованы технические требования к устройству контроля, диагностирования, сигнализации, включения облегчающего режима на время завершения технологического процесса и защиты группы двигателей поточной технологической линии при несимметрии напряжений сети. Разработаны блоки устройства диагностирования, а также датчик аномального режима и исполнительный орган для включения облегчающего режима асинхронного двигателя при глубокой несимметрии напряжения сети.

В качестве датчика аномальных режимов использован аналог лямбда-диода, который состоит из комплементарной пары полевых транзисторов с каналами p - и n -типов, включенных по схеме с объединенными истоками, вольт-амперная характеристика которого формируется подбором параметров резистивного делителя напряжения и напряжением на затворе одного из полевых транзисторов.

Производственные испытания устройства диагностирования проведены на асинхронных двигателях линии смешивания кормов СКО-Ф-3 в кормоцехе СПК «Преслав» Приморского района Запорожской области. Вероятность безотказной работы устройства – 0,986. Среднее время безотказной работы – 17 500 ч.

Применение данного устройства позволяет повысить эксплуатационную надёжность асинхронных двигателей поточной технологической линии, работающих при несимметрии напряжений сети.

Ключевые слова – расход ресурса изоляции, тепловой износ изоляции, асинхронный двигатель, несимметрия напряжения, коэффициент напряжений по обратной последовательности, симметричная составляющая напряжения, сила тока, устройство диагностирования режимов работы.

SUMMARY

Popova I.A. The control of the operation modes of induction motors under voltage asymmetry in electrical grid. – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree in specialty 05.09.16 – electrotechnology and electric equipment in agriculture. – Tavria State Agritechnical Academy, Melitopol, 2003.

The work is devoted to the increase of operational reliability of induction motors at village grid voltage asymmetry. The mathematical model of operation modes for induction motor is developed at village grid voltage asymmetry, which allows to estimate speed of the thermal deterioration of the induction motor isolation on the factor of a voltage asymmetry on a return sequence, the factor of loading of the working machine, in view of features of the electric drive. The mathematical model of operation modes of induction motor is received at deep asymmetry and facilitating mode at the expense of association of zero points of a winding stator of motor and power supply on time for end of technological process. The device which diagnoses the operation modes for the induction motor group of a grid asymmetry at the expense of the control of a voltage of return sequence and temperature of a winding stator of each induction

motor is offered. It provides the inclusion of the is offered symmetrical is offered at achievement of voltage asymmetry on a return sequence of the proved boundary of operation modes for each motor at deep voltage asymmetry on time of end technological process. The use of the diagnosing device allows to reduce speed of thermal deterioration of induction motor isolation for a technological line, which work at grid voltage asymmetry and to increase their service life.

Key words – operation life consumption of isolation, thermal deterioration of isolation, induction motor, asymmetry of voltage on a return sequence of symmetrical component of a voltage, current intensity, device diagnosing of operation modes.