

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Телюта Руслан Васильович

УДК 621.313.17:621.316.95

**РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ РОБОТИ СИСТЕМИ
АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН – РОБОЧА МАШИНА В УМОВАХ
АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Мелітополь – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Таврійському державному агротехнологічному університеті Міністерства аграрної політики та продовольства 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 електромеханічних систем;

кандидат технічних наук, доцент **Стьопін Юрій Олексійович**, Таврійський державний агротехнологічний університет, доцент кафедри електротехнологій АПК.

Захист відбудеться «30» вересня 2011 року о 13⁰⁰ 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 « » серпня 2011 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Т. Діордієв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В Україні існує народно – господарська проблема зниження втрат активної енергії в системах електроприводу і робочих машинах. Суть проблеми полягає в тому, що в електродвигунах і робочих машинах втрачається від 30 до 45 % енергії, яка споживається для виконання корисної роботи. Причиною існування проблеми є низькі коефіцієнти корисної дії електродвигунів і робочих машин, відсутність систем регулювання завантаження робочих машин.

Аналіз результатів експлуатації електрообладнання в агропромисловому комплексі показує, що аварійність основного елементу електроприводу – трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором ще висока, що приводить до значних збитків у сільськогосподарському виробництві.

Тому дослідження, які направлені на вивчення особливостей режимів роботи асинхронних електродвигунів в сукупності з робочими машинами і на розробку ресурсоенергозберігаючих режимів роботи останніх та технічних засобів керування роботою системи «електродвигун – робоча машина» 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 задоволення технічної 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 електродвигунів».

Метою роботи є підвищення експлуатаційної надійності асинхронних електродвигунів та зменшення втрат активної енергії в системі «електродвигун – робоча машина» за рахунок використання електромеханічних систем управління на базі розроблених ресурсоенергозберігаючих режимів роботи.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз проблеми ресурсоенергозбереження в електроприводах з асинхронними електродвигунами.
2. Аналітично дослідити втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні.
3. Дослідити витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна.
4. Розробити систему діагностування режимів роботи асинхронного електродвигуна і управління ним.
5. Експериментально перевірити отримані результати і техніко – економічно їх обґрунтувати.

Об'єкт дослідження – процес перетворення енергії в асинхронному електродвигуні.

Предмет дослідження – фізичні закономірності ресурсоенергозберігаючих режимів роботи системи асинхронний електродвигун – робоча машина в умовах агропромислового комплексу.

Методи дослідження. Дослідження проводились з використанням символічного методу аналізу електричних кіл, кругових діаграм, симетричних складових напруг і струмів, методів аналізу лінійних електричних кіл.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримала подальший розвиток теорія втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором з уточненням схеми заміщення фази двигуна та врахуванням росту активного опору провідників обмотки при нагріванні.
2. Вперше запропоновано визначення втрат активної потужності в електродвигуні шляхом використання кругової діаграми комплексу повної потужності в функції ковзання електродвигуна.
3. Отримала подальший розвиток теорія втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні приводу робочої машини з урахуванням коефіцієнта завантаження останньої, рівня напруги, симетричності живлення.
4. Вперше запропоновано коефіцієнт втрат активної енергії та витрат ресурсу в якості інтегрального критерія енергоресурсозберігаючих режимів роботи асинхронних електродвигунів.

Практичне значення отриманих результатів. На підставі результатів дослідження розроблено пристрій функціонального діагностування режимів роботи системи «електродвигун – робоча машина» з урахуванням втрат електричної енергії в системі, витрат ресурсу ізоляції трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

За результатами досліджень розроблена проектно-конструкторська документація на пристрій функціонального діагностування режимів роботи системи «електродвигун – робоча машина», виготовлено експериментальний зразок.

Особистий внесок здобувач.

В [1] розроблена уточнена Γ – образна схема заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна, отримано залежності, які враховують зростання активного опору провідників обмотки при нагріванні. В [2] запропоновано метод дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні за допомогою кругової діаграми комплексу повної потужності втрат енергії у функції ковзання. В [3] запропоновано аналіз втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні за допомогою коефіцієнта втрат. В [5] запропоновано метод дослідження втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи заслуховувалися 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, ТДАТУ, 2009 рік), міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергетика в АПК» (місто Мелітополь, ТДАТУ, 2011 рік).

Публікації. По роботі опубліковано шість наукових праць у фахових виданнях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 153 найменувань та додатків. Обсяг основного тексту складає 128 сторінок, містить 60 ілюстрацій і 38 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 148 сторінки.

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** «Аналіз проблеми ресурсоенергозбереження в електроприводах з асинхронними електродвигунами» приведена характеристика умов експлуатації асинхронних електродвигунів в агропромисловому комплексі.

Показано, що експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів у значній мірі визначається надійністю їхніх обмоток, що, у свою чергу, залежить від стану ізоляції. У процесі експлуатації асинхронні електродвигуни піддаються цілому ряду експлуатаційних впливів, які можна розділити на два класи: режимні й кліматичні. Експлуатаційна надійність асинхронних електродвигунів при кліматичних впливах (у першу чергу вологості й агресивності середовища) визначається конструкційною надійністю й у даній роботі не розглядається. До експлуатаційних впливів режимного характеру віднесені:

- перевантаження з боку робочої машини;
- зниження, підвищення й несиметрія напруги мережі;
- неповнофазний режим;
- перекидання електродвигуна під напругою;
- погіршення умов охолодження;
- підвищення температури навколишнього середовища.

Вказані експлуатаційні впливи приводять як до збільшення теплового зношення ізоляції асинхронних електродвигунів, так і до додаткових втрат активної потужності в електродвигунах.

Показано, що обмотка статора асинхронного електродвигуна є самим уразливим елементом його конструкції. У свою чергу, в обмотках електродвигуна самим уразливим елементом є його ізоляційна конструкція. Тому надійність електродвигуна в основному визначена надійністю ізоляційної конструкції (ізоляції). На основі аналізу робіт представлено механізм розвитку процесів ушкодження ізоляції електричних двигунів в умовах експлуатації.

Проведено аналіз методів і засобів діагностування режимів роботи асинхронних електродвигунів, який показує, що за параметри діагностування приймають силу струму (максимальне значення, значення прямої, зворотної і нульової послідовностей); кількість тепла, що виділяється в результаті теплової дії струму; діюче значення

напруги (прямої, нульової і зворотної послідовності); температуру обмоток статора, сталі статора й корпусу.

Проаналізовані стан і шляхи вирішення проблеми, розкриті тенденції розвитку електроприводу сільськогосподарських машин, серед яких є впровадження регульованих електроприводів, зокрема, за рахунок використання перетворювачів частоти струму, «м'яких» тиристорних пускачів.

У **другому розділі** «Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні» зроблено аналіз втрат активної потужності в системі «електродвигун – робоча машина».

Для цього розглянуті механічні характеристики електродвигуна (крива 1) і робочої машини (криві 2 і 2'), які наведені на рис. 1.

На рисунку 1 наведені втрати активної потужності в робочій машині на тертя (перша заштрихована площа):

$$P_o = M_o \cdot \omega_n, \quad (2.1)$$

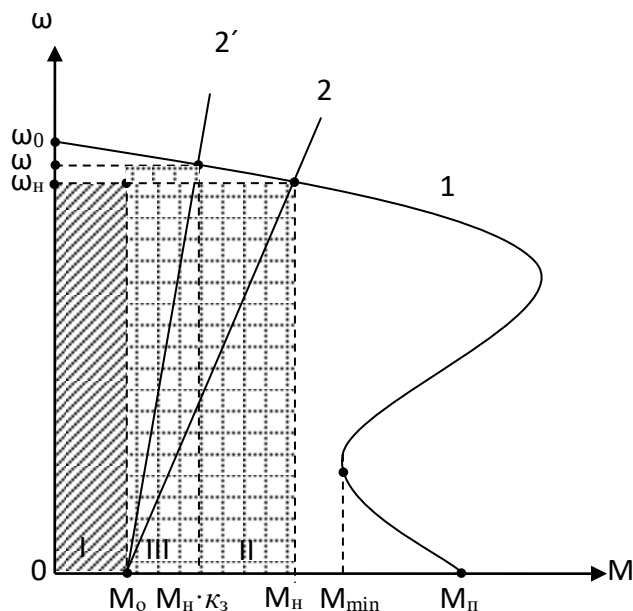


Рис. 1. Механічні характеристики: електродвигуна (крива 1), робочої машини (криві 2 і 2') при номінальному і неповному завантаженні.

Активна потужність, яку споживає робоча машина на виконання корисної роботи при номінальному навантаженні, наведена другою заштрихованою площею:

$$P_n = (M_n - M_o) \cdot \omega_n, \quad (2.2)$$

Активна потужність, яку споживає робоча машина на виконання корисної роботи при неповному завантаженні, наведена третьою заштрихованою площею:

$$P = (M_n \cdot \kappa_{3.m} - M_o) \cdot \omega, \quad (2.3)$$

де $\kappa_{3.m}$ – коефіцієнт завантаження робочої машини;

ω – кутова швидкість робочої машини при неповному завантаженні, рад/с.

Коефіцієнт завантаження робочої машини представляє собою відношення фактичної продуктивності до номінальної:

$$\kappa_{3.м.} = Q/Q_n, \quad (2.4)$$

де Q – фактична продуктивність робочої машини;

Q_n – номінальна продуктивність робочої машини.

Таким чином, в загальному випадку потужність, яку споживає робоча машина, дорівнює:

$$P_c = P_o + P, \quad (2.5)$$

Отримано вираз коефіцієнта завантаження електродвигуна:

$$\kappa_3 = \frac{P_0 + P}{P_{2н}}. \quad (2.6)$$

де $P_{2н}$ – номінальна активна потужність електродвигуна, Вт.

Аналіз втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції потужності на валу проведено на основі уточненої схеми заміщення асинхронного електродвигуна (для однієї фази), яка наведена на рис. 2.

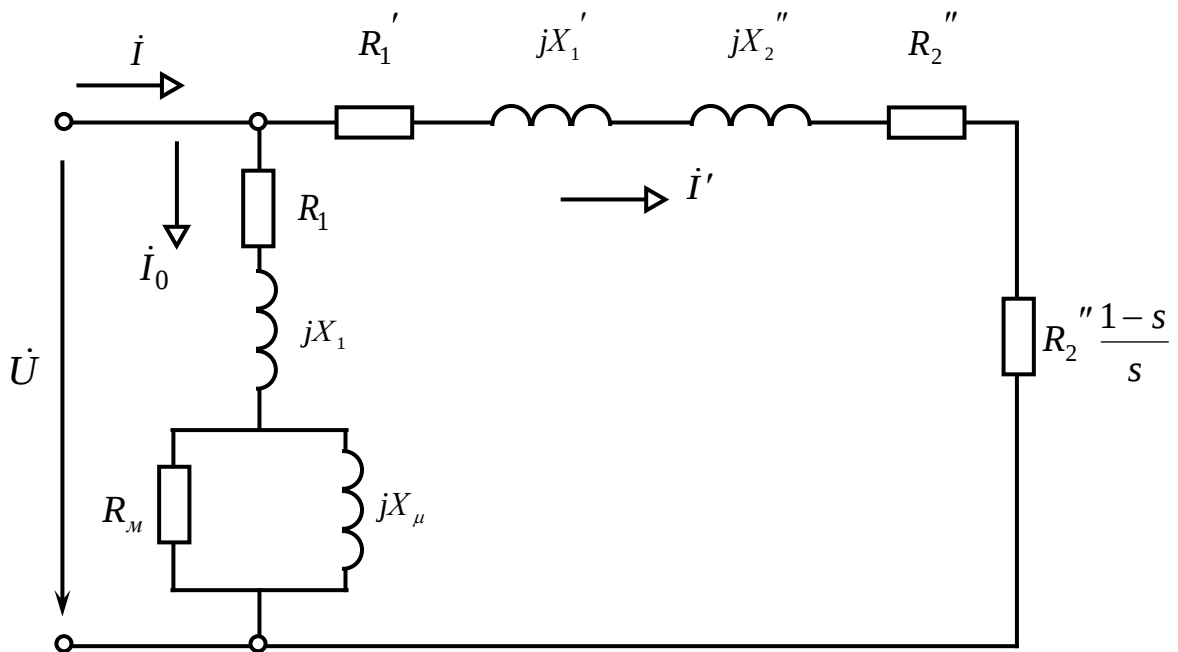


Рис. 2. Г – образна схема заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна.

На наведеному рисунку:

$R'_1, X'_1, X'_2, R''_2, R_1, R_m, X_1, X_\mu$ – параметри схеми заміщення, Ом;

s – ковзання електродвигуна;

I, I_0, I' – діючі значення сил струмів у гілках схеми заміщення, А;

U – діюче значення фазної напруги, В.

Введено нове поняття – коефіцієнт втрат активної потужності:

$$\kappa_\epsilon = \frac{\Delta P}{P_2}, \quad (2.7)$$

де ΔP – втрати активної потужності в електродвигуні, Вт;

P_2 – активна потужність, яка передається з вала електродвигуна робочій машині, Вт.

Проведено дослідження коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні у функції активної потужності на валу з урахуванням температури навколишнього середовища та температури обмотки електродвигуна. Зокрема, знайдено усталене перевищення температури ізоляції електродвигуна:

$$\tau_y = \tau_n \frac{a + \kappa^2(1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75))}{a + 1 + \alpha(\vartheta_{cp} - 75) - \alpha\tau_n(\kappa^2 - 1)}, \quad (2.8)$$

де τ_y – усталене перевищення температури ізоляції електродвигуна, °С;

τ_n – номінальне перевищення температури ізоляції електродвигуна, °С;

a – відношення постійних втрат активної потужності в електродвигуні при номінальній напрузі до змінних втрат активної потужності в електродвигуні при номінальному струмі;

κ – кратність сили струму електродвигуна;

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника обмотки електродвигуна, 1/°С;

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

Залежність коефіцієнта втрат активної потужності в електродвигуні у функції активної потужності на валу для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 наведено на рис. 3.

Як видно із отриманої залежності коефіцієнта втрат активної потужності в функції активної потужності на валу електродвигуна, вона носить екстремальний характер і може бути використана для побудови оптимізаційної моделі навантаження електродвигуна.

В якості основного діагностичного параметру втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні прийнято ковзання електродвигуна. Для дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні в функції ковзання прийнята уточнена Г – образна схема заміщення асинхронного електродвигуна (рис.2).

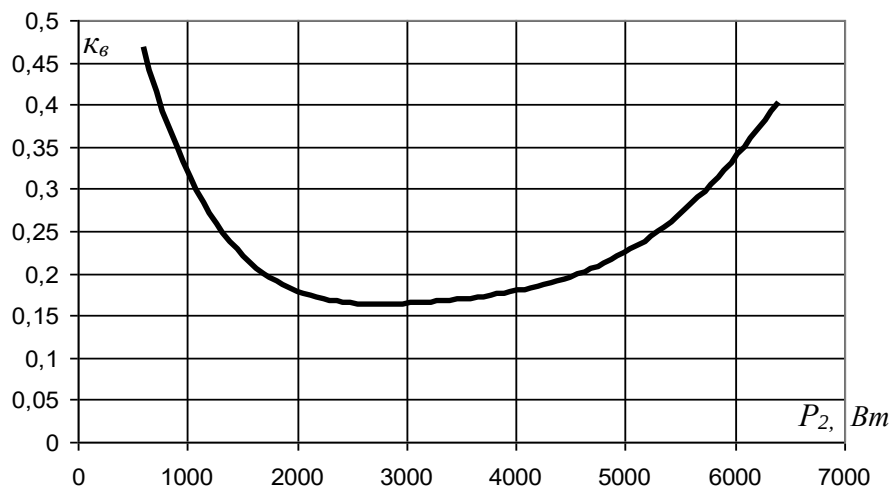


Рис. 3. Залежність втрат активної потужності в електродвигуні у функції навантаження.

Знайдено рівняння комплексу повної потужності електродвигуна та побудована кругова діаграма цього комплексу в функції ковзання (рис.4):

$$\tilde{S}' = \frac{\tilde{S}_K'}{1 + \frac{R_2}{z} \frac{1}{s} e^{j\psi}}, \quad (2.9)$$

$$\varphi' = \operatorname{arccctg} \frac{R_1' + R_2''}{x_1' + x_2''}, \quad (2.10)$$

де $\tilde{S}'$ - комплекс повної потужності короткого замикання, ВА.

Проекція комплексу повної потужності $\tilde{S}'$ на вісь напруги являє собою загальну активну потужність P' у цій вітці, тобто

$$P' = S' \cos \varphi'. \quad (2.11)$$

Активна потужність, яка передається на вал:

$$P_2 = R_2 \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2.12)$$

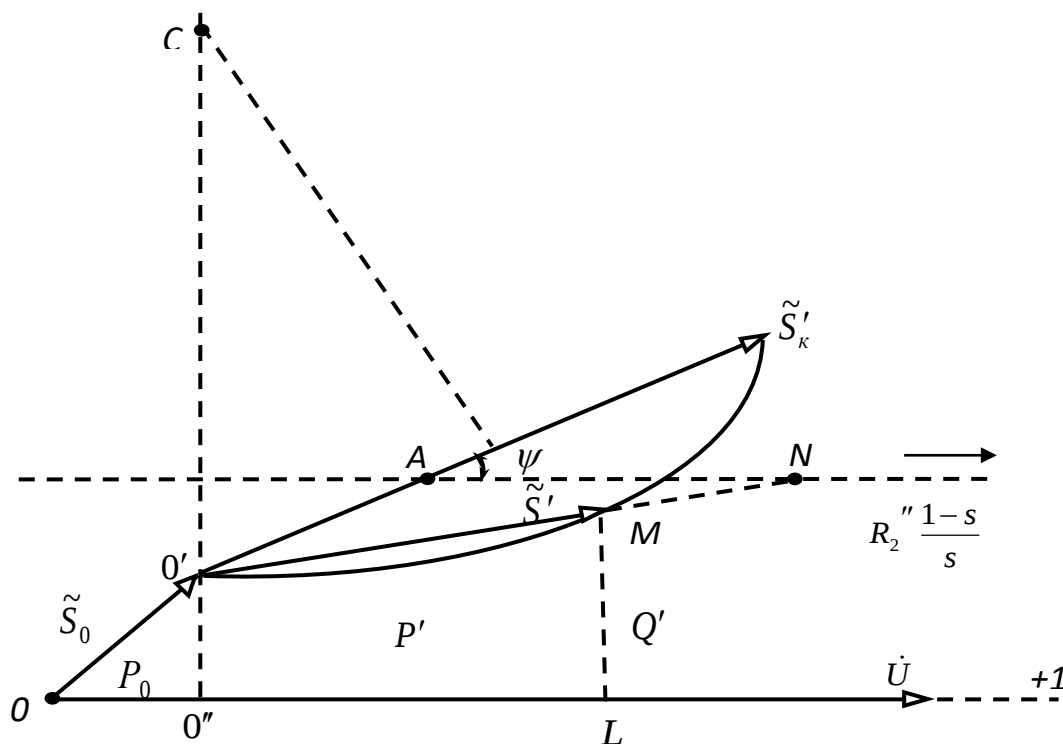


Рис. 4. Кругова діаграма комплексу повної потужності електродвигуна.

Тоді змінні втрати активної потужності:

$$\Delta P_m = 3(P' - P_2), \quad (2.13)$$

Повні втрати активної потужності:

$$\Delta P = \Delta P_{c.H.} + \Delta P_M. \quad (2.14)$$

де $\Delta P_{c. n}$ – постійні втрати активної потужності.

Проведено аналітичне дослідження і знайдені залежності ковзання від коефіцієнта завантаження електродвигуна приводу різних типів робочих машин: для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$):

$$s = s_H k_3, \quad (2.15)$$

для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=1$):

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{\frac{1 - s_H}{s_H} + k_3 - m_0}, \quad (2.16)$$

для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою ($x=2$):

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; \quad (2.17)$$

$$\text{де } a = k_3 - m_0; \quad (2.18)$$

$$b = -2(k_3 - m_0) - \frac{(1 - s_H)^2}{s_H}; \quad (2.19)$$

$$c = m_0(1 - s_H)^2 + (k_3 - m_0). \quad (2.20)$$

де k_3 – коефіцієнт завантаження електродвигуна;
 s_H – номінальне ковзання електродвигуна;
 m_0 – відносний момент рушання робочої машини.

Для приводів всіх типів робочих машин, прийнявши $m_0=0,2$, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 залежність ковзання від коефіцієнта завантаження має вигляд, наведений на рис. 5.

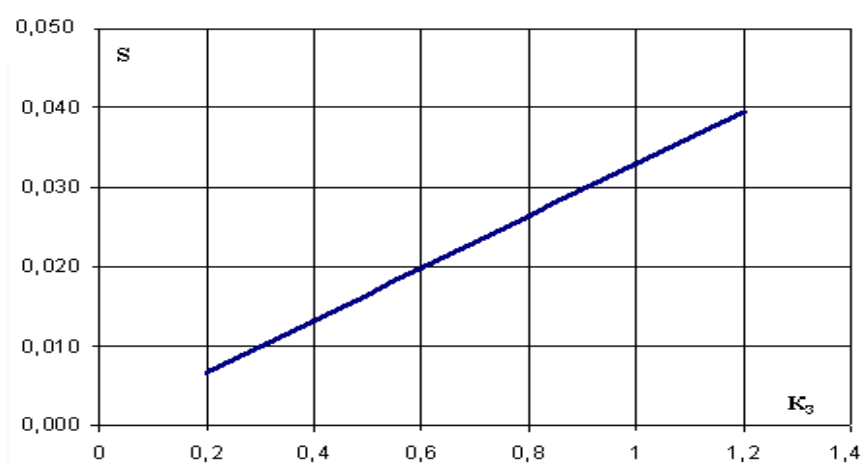


Рис. 5. Залежність ковзання електродвигуна від коефіцієнта завантаження.

Досліджено залежність ковзання від кратності прикладеної напруги та коефіцієнта завантаження електродвигуна приводу різних типів робочих машин:

для приводу робочої машини з незалежною механічною характеристикою ($x=0$):

$$s = \frac{k_3}{k_u^2} s_H, \quad (2.21)$$

для приводу робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=1$):

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{\frac{1-s_H}{s_H} k_u^2 + k_3 - m_0}, \quad (2.22)$$

для приводу робочої машини з параболічною механічною характеристикою ($x=2$):

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.23)$$

$$\text{де } a = k_3 - m_0; \quad (2.24)$$

$$b = -2(k_3 - m_0) - \frac{(1-s_H)^2}{s_H} k_u^2; \quad (2.25)$$

$$c = m_0(1-s_H)^2 + (k_3 - m_0). \quad (2.26)$$

де k_u – кратність прикладеної напруги.

Було також досліджено при асиметричному режимі залежність ковзання від кратності напруги прямої і зворотної послідовностей і коефіцієнта завантаження електродвигуна приводу різних типів робочих машин.

Проведено дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні при одночасній дії завантаження робочої машини та прикладеної напруги за допомогою коефіцієнтів завантаження k_3 електродвигуна та кратності прикладеної напруги k_u . Для досліджуваного електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 ці залежності наведені на рис. 6.

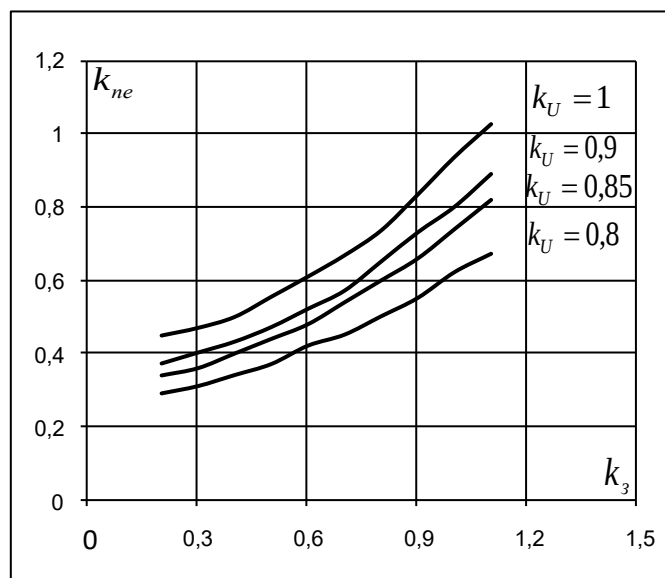


Рис. 6. Залежність коефіцієнта втрат активної енергії електродвигуна у функції коефіцієнта завантаження та прикладеної напруги.

Аналіз залежностей, наведених на рис. 6, показує, що, знаючи коефіцієнт завантаження робочої машини, регулюючи величину прикладеної напруги, можливо створити систему мінімізації втрат активної потужності.

У **третьому розділі** « Дослідження витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна» в основу покладені закономірності теплового старіння ізоляції, зокрема, залежність швидкості теплового зношення ізоляції від температури:

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)}, \quad (3.1)$$

де ε – швидкість теплового зношення ізоляції, базових годин за годину (бгод/год);

ε_n – номінальна швидкість теплового зношення ізоляції, бгод/год;

B – параметр ізоляції, К;

θ_n – абсолютна номінальна температура ізоляції, К;

θ – абсолютна фактична температура ізоляції К.

Введено поняття коефіцієнта перетворення активної енергії в асинхронному електродвигуні:

$$k_{ne} = \frac{a + k^2}{a + 1}, \quad (3.2)$$

Для аналізу витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна введено поняття коефіцієнта витрати ресурсу:

$$k_{ep} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}, \quad (3.3)$$

А також знайдена його розрахункова формула:

$$k_{ep} = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{k_{ne}\tau_n + \theta_{cp} + 273}\right)}. \quad (3.4)$$

Результати дослідження коефіцієнта витрати ресурсу у функції коефіцієнта завантаження та температури навколишнього середовища наведені на рис. 7.

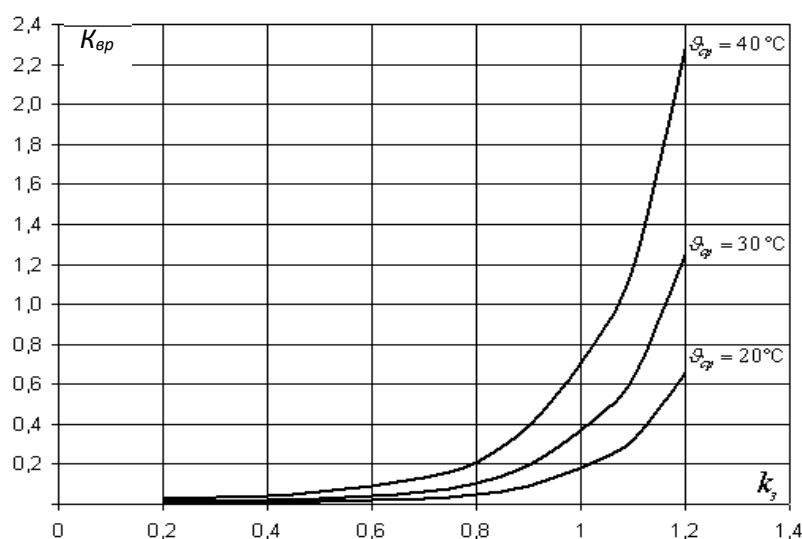


Рис.7. Залежність коефіцієнта витрати ресурсу електродвигуна від коефіцієнта завантаження та температури навколишнього середовища.

Аналіз отриманих залежностей показує, що, знаючи коефіцієнт завантаження електродвигуна та температуру навколишнього середовища, можливо створити систему діагностування теплового режиму роботи останнього за допомогою коефіцієнта витрати ресурсу.

У четвертому розділі «Розробка діагностування режимів роботи системи «електродвигун – робоча машина» на підставі наведених досліджень визначено два показники, які характеризують режими роботи асинхронного електродвигуна з позиції енергоресурсозбереження: коефіцієнт втрат активної енергії k_{ne} й коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції k_{ep} .

Перший описується виразом :

$$k_{ne} = \frac{a + \kappa^2}{a + 1}, \quad (4.1)$$

$$\kappa = \frac{I}{I_n}, \quad (4.2)$$

де a – коефіцієнт втрат асинхронного електродвигуна (відношення втрат активної потужності у сталі до втрат у міді при номінальному режимі роботи);

k – кратність сили електричного струму, який споживає асинхронний електродвигун, відносно номінального значення;

I – сила електричного струму, який споживає електродвигун, А;

I_n – номінальне значення сили електричного струму, А.

Втрати активної потужності залежать як від завантаження асинхронного електродвигуна на валу з боку робочої машини, так і від рівня напруги живлення. Наприклад, при коефіцієнті завантаження $k_z=0,4$ втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при кратностях напруги на затискачах електродвигуна $k=0,8; 0,85; 0,9; 1$ відповідно рівні 213, 247, 269, 313 Вт.

Таким чином, регулюючи величину напруги на затискачах електродвигуна у функції кратності сили електричного струму, можна встановлювати енергозберігаючий режим роботи асинхронного електродвигуна.

Коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції описується виразом:

$$k_{ep} = e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{k_{ne} \tau_n + \vartheta_{cp} + 273} \right)}. \quad (4.3)$$

де B – параметр, який характеризує клас ізоляції, К;

θ_n – номінальна абсолютна температура ізоляції, К;

τ_n – номінальне перевищення температури ізоляції, °С;

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

Таким чином, знаючи коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції, можна діагностувати режим роботи електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження.

Структурна схема пристрою діагностування асинхронного електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження наведена на рис. 8.

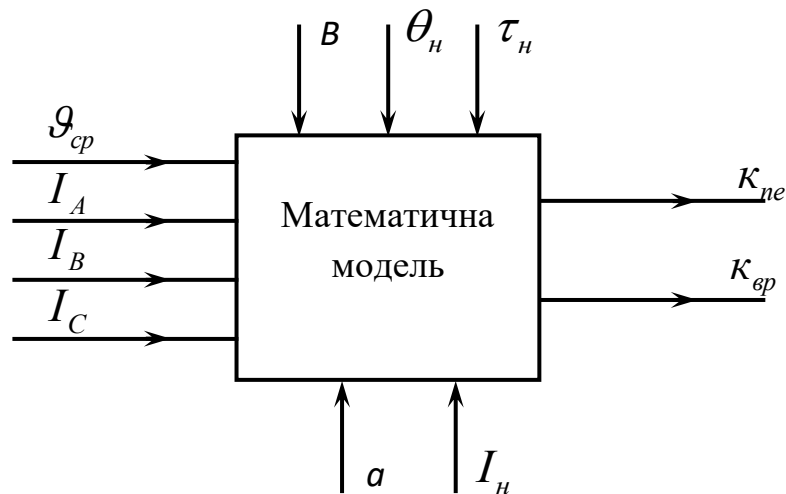


Рис. 8. Структурна схема діагностування режимів роботи електродвигуна.

Розроблена методика діагностування роботоздатності асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором на базі Г – образної схеми заміщення однієї фази електродвигуна.

При ідеальному холостому ході електродвигуна (ковзання дорівнює нулю) діюче значення сили струму дорівнює:

$$I_0 = \frac{U}{Z_0}, \quad (4.4)$$

де Z_0 – повний опір контуру намагнічення, який в свою чергу описується наступним виразом:

$$Z_0 = R_1 + jX_1 + \frac{R_m jX_\mu}{R_m + jX_\mu} = Z_0 e^{j\varphi_0}. \quad (4.5)$$

При номінальному навантаженні електродвигуна сила струму має номінальне значення I_n .

Прийнято, що струм на ділянці від значення I_0 до значення I_n в залежності від ковзання змінюється за лінійним характером (рис. 9).

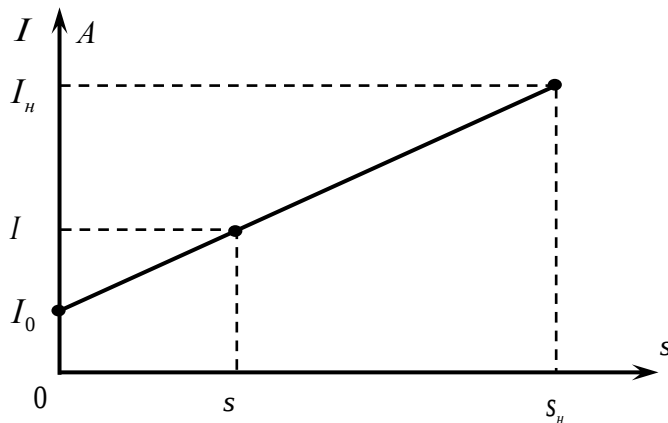


Рис. 9. Залежність сили струму асинхронного електродвигуна від ковзання.

Сила струму в функції ковзання в загальному вигляді:

$$I = I_o + (I_n - I_o) \frac{s}{s_n}. \quad (4.6)$$

Одним з основних місць, де втрачається активна потужність споживана електродвигуном приводу робочої машини, або робочого органу, є втрати потужності в механічній системі «електродвигун – робоча машина». Ці втрати активної потужності залежать як від конструктивних характеристик робочої машини, або робочого органу, так і від технічного стану конструктивних елементів робочої машини, або робочого органу, де спостерігається явище тертя.

Активна потужність, яка передається на вал механічної частини системи «електродвигун – робоча машина» може бути визначена наступним чином (рис. 2):

$$P_{MX} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} \frac{U^2}{(R_1' + \frac{R_2''}{s})^2 + (X_1' + X'')^2}. \quad (4.7)$$

На базі цього розроблена методика діагностування втрат активної потужності в механічній частині системи «електродвигун – робоча машина».

У **п'ятому розділі** «Експериментальна перевірка отриманих результатів і техніко – економічні обґрунтування» проведено дослідження математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні на адекватність. Для цього була створена експериментальна установка. Навантаження електродвигуна виконувалось за допомогою генератора постійного струму і реостату навантаження. Ковзання електродвигуна вимірювалось тахогенератором. Активна потужність, яку споживав електродвигун вимірювалась за допомогою комплексу контрольно вимірювальних приладів типу К–50. В якості досліджуваного електродвигуна використовувався електродвигун типорозміру 4A100S2Y3, для якого досліджувались втрати активної потужності аналітичним шляхом. Втрати активної потужності в електродвигуні знаходились як різниця активної потужності яку споживав електродвигун і потужності яка передавалась на вал електродвигуна. Перша потужність вимірювалась за допомогою комплексу К–50, друга розраховувалась аналітичним шляхом за допомогою параметрів Г – образної схеми заміщення однієї фази асинхронного електродвигуна та вимірюного ковзання. Результати наведені на рис. 10, на якому 1 – теоретична крива, 2 – експериментальна крива.

Втрати активної потужності в електродвигуні:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (5.1)$$

Механічна потужність на валу електродвигуна:

$$P_2 = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2. \quad (5.2)$$

Отримана експериментальна залежність коефіцієнта втрат активної потужності у функції потужності на валу (позначена експериментальними точками) у порівнянні з аналітичною залежністю.

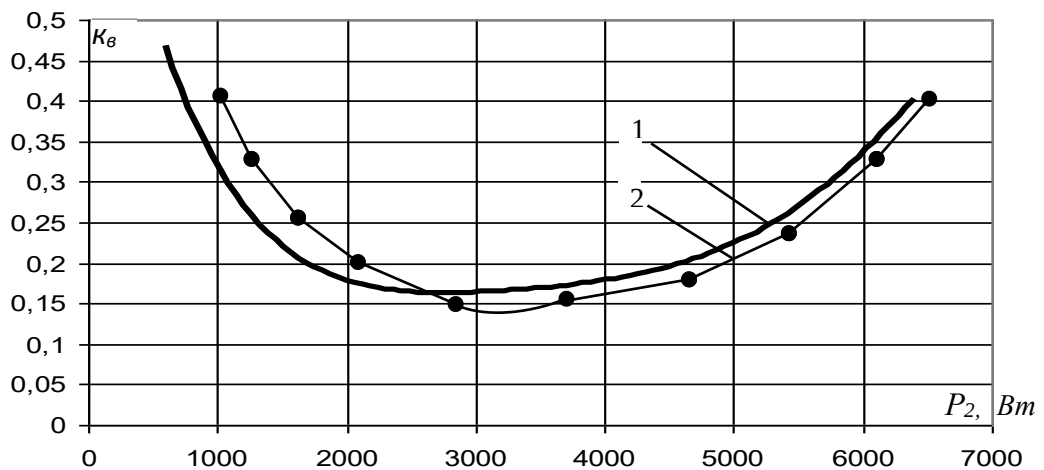


Рис.10. Залежність втрат активної потужності в електродвигуні у функції завантаження (1 – теоретична крива, 2 – експериментальна крива).

Статистична адекватність математичної моделі втрат активної потужності встановлювалась за допомогою критерія Фішера.

Критичне значення F – критерія Фішера для рівня значимості ступенів свободи

$$f_1 = p = 1 \text{ і } f_2 = m - p - 1 = 49 \text{ складає:}$$

$$F_{кр(0,05;1;49)} = 4,038.$$

Для нашого випадку маємо $F = 2,74$.

Так як виконується умова $F < F_{кр}$, то математична модель втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні признається адекватною експериментальним даним.

В результаті проведених досліджень була розроблена математична модель енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна та алгоритм її використання. Варіант такої математичної моделі наведено на прикладі приводу робочої машини з лінійно – зростаючою механічною характеристикою.

Алгоритм використання моделі наступний:

1. Вимірюється ковзання s
2. Розраховується коефіцієнт завантаження електродвигуна:

$$K_3 = \frac{\left(\frac{1-s}{s_H} - m_0\right)s + m_0 s_H}{1-s}, \quad (5.3)$$

3. Розраховується ковзання електродвигуна при зниженій напрузі:

$$s = \frac{k_3 - m_0 s_H}{\frac{1-s_H}{s_H} k_u^2 + k_3 - m_0}, \quad (5.4)$$

4. Розраховуються втрати активної потужності в намагнічуючому контурі:

$$\Delta P_c = k_u^2 \Delta P_{c.H}, \quad (5.5)$$

5. Розраховуються втрати активної потужності в обмотках електродвигуна:

$$\Delta P_{\text{м}} = 3(R'_1 + R''_2)I'^2, \quad (5.6)$$

$$I'^2 = \frac{k_u^2 U_n^2}{(R'_1 + \frac{R''_2}{s})^2 + (X'_1 + X'')^2}, \quad (5.7)$$

6. Розраховуються загальні втрати активної потужності:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{\text{м}}, \quad (5.8)$$

7. Знаходиться значення k_u за умови:

$$\Delta P = \min. \quad (5.9)$$

В якості пристрою забезпечення енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна використовується стандартна апаратура, зокрема «м'який» тиристорний пускач з блоком програмування і тахогенератор, рис. 11.

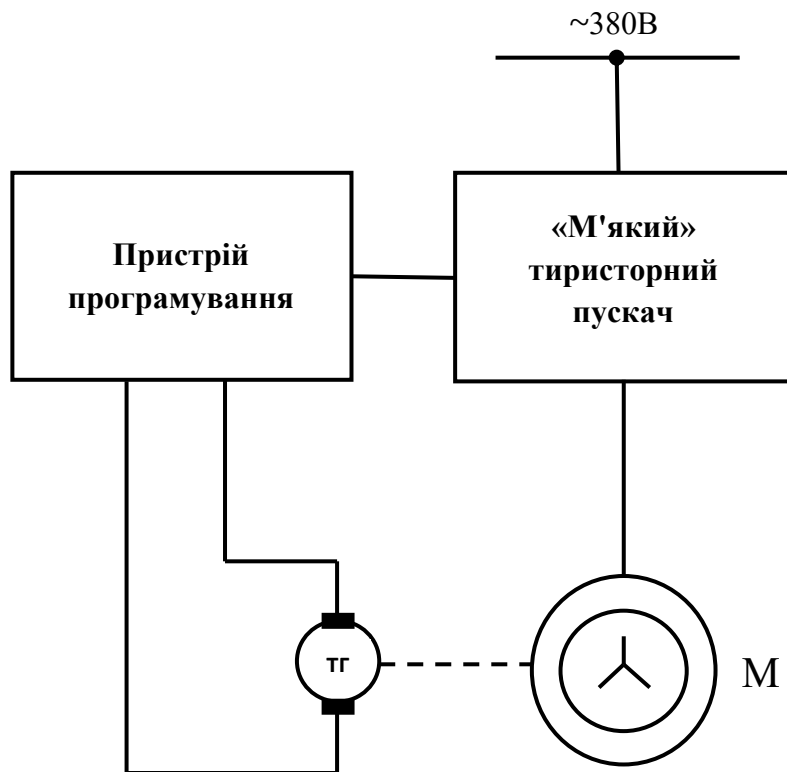


Рис. 11. Пристрій енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача ресурсоенергозбереження в системі асинхронний електродвигун-робоча машина в умовах агропромислового комплексу. В результаті виконання роботи зроблені наступні висновки.

1. Аналіз роботи системи асинхронний двигун-робоча машина показав, що в умовах агропромислового комплексу втрати активної енергії в асинхронних електродвигунах і робочих машинах складають від 30 до 40 відсотків від активної енергії, яка споживається на корисну роботу в робочих машинах, а вихід із ладу асинхронних електродвигунів щорічно складає до 20 відсотків загального парку електродвигунів, що експлуатуються.

2. Аналіз втрат активної енергії в асинхронному електродвигуні шляхом дослідження введеного коефіцієнта втрат активної потужності у функції активної потужності на валу електродвигуна з урахуванням росту активного опору обмоток при нагріванні показав, що вона носить екстремальний характер і може бути використана для створення енергозберігаючого режиму роботи електродвигуна. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 з номінальною потужністю 4 кВт енергозберігаючим режимом його роботи є режим при навантаженні на валу від 2 до 3,8 кВт.

3. Дослідження витрат ресурсу ізоляції електродвигуна показало, що вони носять експоненціальний характер у функції введеного коефіцієнта втрат активної енергії, коефіцієнта завантаження і температури навколишнього середовища. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 при коефіцієнті завантаження рівному одиниці зміна температури навколишнього середовища від 20 °C до 40 °C приводить до збільшення коефіцієнта витрат ресурсу від 0,19 до 0,7.

4. На базі проведеного дослідження отримана математична модель діагностування режиму роботи асинхронного електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження. Вихідною функцією моделі є коефіцієнти втрат енергії і витрат ресурсу ізоляції. Якщо один з них або обидва перевищують значення одиниці, то пристрій спрацьовує на сигнал про необхідність в технологічну паузу провести аналіз режиму роботи електродвигуна.

5. Розроблено метод діагностування асинхронного електродвигуна на роботоздатність, в основу якого покладена досліджувана залежність сили струму, який споживає електродвигун у функції ковзання при вводі його в експлуатацію для порівняння з досліджуваним періодом експлуатації.

6. Розроблено метод діагностування робочої машини з позиції енергозбереження, в основу якого покладена досліджувана активна потужність, яка втрачається в робочій машині при вводі її в експлуатацію, для порівняння з досліджуваним періодом експлуатації.

7. Експериментальні дослідження адекватності математичної моделі втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні показують, що за F – критерієм Фішера математична модель діагностування адекватна експериментальним даним. Так, критичне значення F – критерія Фішера складає 4,038, а для досліджуваного процесу 2,74, що менше критичного.

8. Дослідження залежності втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції як коефіцієнта завантаження, так і коефіцієнта прикладеної напруги, покладено в основу математичної моделі пристрою енергозбереження в приводі робочої машини. Наприклад, для електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 при коефіцієнті завантаження 0,4 втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при кратностях напруги на затискачах електродвигуна 0,8; 0,85; 0,9; 1 відповідно рівні 213, 247, 269, 313 Вт.

9. На базі розробленої математичної моделі енергозбереження з використанням «м'якого» тиристорного пускача розроблено пристрій енергозбереження за рахунок оптимізації значення прикладеної напруги до електродвигуна. У результаті втілення пристрою в приватній агрофірмі «МЮННТ» зменшено споживання електричної енергії на приводі дробарки на 15 %, що склало річний економічний ефект у розмірі 6412 гривень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Овчаров С. В. Исследование потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе / С. В. Овчаров, Р. В. Телюта // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 86 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», 2009, С. 53 – 57.
2. Овчаров В. В. Исследование потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе в функции скольжения / В. В. Овчаров, С. В. Овчаров, Р. В. Телюта, О. В. Юдіна // Вісник національного технічного університету «ХПИ», №44, 2009, С. 125 – 132.
3. 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.
4. Телюта Р. В. Методика экспериментального исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе / Р. В. Телюта // Збірник науково-методичних праць ТДАТУ // Удосконалення навчально-виховного процесу в ВНЗ. – Вип. 11. Том 3 – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – С. 133 – 136.
5. Островский А. В. Исследование потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе / А. В. Островский, С. В. Овчаров, Р. В. Телюта // Збірник науково-методичних праць ТДАТУ // Удосконалення навчально-виховного процесу в ВНЗ. – Вип. 11. Том 3 – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. С. 148 – 154.
6. Постнікова М.В. Исследование потерь активной мощности в системе «электродвигатель – рабочая машина» /М.В. Постникова, Р.В. Телюта// Збірник науково-методичних праць ТДАТУ // Удосконалення навчально-виховного процесу в ВНЗ. – Вип. 11. Том 3 – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. С. 165 – 172.

АНОТАЦІЯ

Телюта Р.В. Ресурсоенергозберігаючі режими роботи системи асинхронний електродвигун – робоча машина в умовах агропромислового комплексу.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи – Таврійський державний агротехнологічний університет, місто Мелітополь, 2011.

В роботі проаналізована проблема ресурсоенергозбереження в електроприводах з асинхронними електродвигунами, приведена характеристика умов експлуатації асинхронних електродвигунів в агропромисловому комплексі.

Досліджені втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні, для чого введено коефіцієнт втрат активної потужності. Враховуються як втрати в обмотках, так і в магнітопроводі, враховано зростання опору обмоток при нагріванні. Зроблено аналіз втрат активної потужності в системі «електродвигун – робоча машина».

Розроблена методика дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні за допомогою кругової діаграми у функції ковзання. Знайдені математичні вирази ковзання асинхронного електродвигуна для різних типів приводів робочих машин в залежності від коефіцієнта завантаження, кратності напруг прямої та зворотної послідовностей.

Досліджені витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна, в основу яких покладені закономірності теплового старіння ізоляції, зокрема, залежність швидкості теплового зношення ізоляції від температури.

Розроблена система діагностування асинхронного електродвигуна з позиції ресурсоенергозбереження. Розроблені методика діагностування роботоздатності асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором та методика діагностування втрат активної потужності в механічній частині системи «електродвигун – робоча машина», розроблена математична модель енергозберігаючого режиму роботи асинхронного електродвигуна та алгоритм її використання.

АННОТАЦИЯ

Телюта Р.В. Ресурсоэнергосберегающие режимы работы системы асинхронный электродвигатель – рабочая машина в условиях агропромышленного комплекса.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь, 2011.

В работе сделан анализ проблемы ресурсоэнергосбережения в электроприводах с асинхронными электродвигателями, приведена характеристика условий эксплуатации асинхронных электродвигателей в агропромышленном комплексе.

Показано, что эксплуатационная надёжность асинхронных электродвигателей в значительной мере определяется надёжностью их обмоток, что в свою очередь

зависит от состояния изоляции. В процессе эксплуатации асинхронные электродвигатели подвергаются целому ряду эксплуатационных влияний, которые разделены на два класса: режимные и климатические.

Проанализированы состояния и пути решения проблемы, раскрыты тенденции развития электропривода сельскохозяйственных машин, среди которых есть внедрение регулируемых электроприводов, в частности за счёт использования преобразователя частоты тока, «мягких» тиристорных пускателей.

Исследованы потери активной мощности в асинхронном электродвигателе, для чего был введён коэффициент потерь активной мощности. Учитываются потери как в обмотках так и в магнитопроводе, с учетом роста сопротивления обмоток при нагревании. Сделан анализ потерь активной мощности в системе «электродвигатель – рабочая машина».

Разработана методика исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе с помощью круговой диаграммы в функции скольжения. Найдены математические выражения скольжения асинхронного электродвигателя, для разных типов приводов рабочих машин в зависимости от коэффициента нагрузки, кратности напряжения прямой и обратной последовательностей.

Исследован расход ресурса изоляции асинхронного электродвигателя в основу которого положены закономерности теплового старения изоляции, в частности зависимость скорости теплового старения изоляции от температуры.

Разработана система диагностирования асинхронного электродвигателя с позиции ресурсоэнергосбережения.

Разработаны методика диагностирования работоспособности асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором на базе Г – образной схемы замещения одной фазы электродвигателя и методика диагностирования потерь активной мощности в механической части системы «электродвигатель – рабочая машина».

Получена экспериментальная зависимость коэффициента потерь активной мощности в функции мощности на валу в сравнении с аналитической зависимостью.

В результате исследований была предложена математическая модель энергосберегающего режима работы асинхронного электродвигателя и алгоритм её использования. Вариант такой математической модели представлено на примере привода рабочей машины с линейно–возрастающей механической характеристикой.

На основании результатов исследования разработано устройство функционального диагностирования режимов работы системы «электродвигатель – рабочая машина» с учетом потерь электрической энергии в системе, расхода ресурса изоляции трёхфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

По результатам исследований разработана проектно – конструкторская документация на устройство функционального диагностирования режимов работы системы «электродвигатель – рабочая машина», изготовлено экспериментальный образец.

На основе разработанной математической модели энергосбережения с использованием «мягкого» тиристорного пускателя разработано устройство

энергосбережения за счёт оптимизации приложенного к электродвигателю напряжения. В результате внедрения устройства в частной фирме уменьшено потребление электрической энергии электроприводом дробилки на 15%.

ABSTRACT

Telyuta R.V. Resource and energy saving modes of the system induction motor – working machine in agriculture

Thesis for a scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 – electrical systems, and systems. – Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, 2011.

An analysis of problem of resource and energy saving in electric drives with induction motors was made. Characteristics of induction motors operating conditions in the agricultural sector are presented.

It is shown that the operational reliability of induction motors to a large extent determined by the reliability of their windings, which in turn depends on the state of isolation. During its operation induction motors are exposed to a variety of influences, which are divided into two classes: climatic and regime.

The state and ways to solve the problems revealed trends in the electric farm machinery, which include the introduction of controlled electric drives, in particular through the use of the frequency controlled motor drives, "soft" thyristor starters.

Active power losses are investigated in an asynchronous motor, for which a coefficient of active power losses was introduced. It counts both losses in the windings and in the magnetic, and the growth of winding resistance when heated is taken into account. An analysis of active power losses in the "motor - working machine" is elaborated.

The technique of study of active power losses in an asynchronous motor with a circular diagram in a function of the slip. Mathematical expressions of slip of the induction motor for different types of working machines depending on load factor, the multiplicity of voltage of forward and backward sequences are found.

Resource consumption isolation induction motor which is based on the laws of thermal insulation aging, in particular the dependence of the thermal insulation aging temperature was investigated.

A system for diagnosing induction motor from the point of resource and energy saving is designed.

Methods of diagnosing performance of induction motor with squirrel cage on the basis of T-shaped equivalent circuit of one phase of the motor and method of diagnosing of active power losses in a mechanical system "motor - a working machine" are developed.

The experimental dependence of the coefficient of active power losses in function of the shaft power in comparison with the analytic relationship is worked out.

As a result, studies have proposed a mathematical model of energy-saving mode of the asynchronous motor and an algorithm for its use. Version of this mathematical model is presented as an example drive a working machine with linearly rising mechanical characteristic.

Підписано до друку 23 серпня 2011 р. Зам. № 424
Формат 60×90/16. Друк офсетний. Обсяг 1,5 ум. друк. арк. Тираж 100 прим.

Надруковано ПП Верескун В.М.
Видавничо-поліграфічний цент «Люкс», свідоцтво ДК № 1125
м. Мелітополь, вул. К. Маркса, 10, тел.: 6-88-38

