

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

ВАСИЛЕНКО Сергій Вікторович

УДК 621.313.333

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ЗНИЖЕННЯ ТЕРМІНУ
СЛУЖБИ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НАПРУГОЮ
ДО 1000 В**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ХАРКІВ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Азовському морському інституті Національного університету «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, м. Маріуполь

Науковий керівник:

доктор технічних наук, доцент, **Кривонос Валерій Єгорович**, Азовський морський інститут Національного університету «Одеська морська академія», професор кафедри інженерії і технології

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Гриб Олег Герасимович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем;

доктор технічних наук, доцент **Ягуп Катерина Валеріївна**, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, доцент кафедри електричного транспорту

Захист відбудеться «__» _____ 2020 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.01 у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий «__» ____ 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Д. Черенков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. На промислових підприємствах понад 80 % всього обладнання складають асинхронні двигуни (АД). Умови неякісної напруги мережі живлення, підвищена запиленість, технологічні і випадкові навантаження на валу АД призводять до високої пошкоджуваності двигунів. Щорічно пошкодження становлять до 20–25 % від загальної кількості встановлених АД. В сучасних економічних умовах підприємства часто змушені скорочувати обсяги ремонтних робіт. Через обмежені кошти на ремонт обладнання промислові підприємства багаторазово відновлюють АД, які вийшли з ладу. В таких умовах оцінка технічного стану АД являє собою важливу задачу. В процесі експлуатації АД вплив несприятливих факторів навколишнього середовища і змінених показників якості електроенергії призводять до прискореного зносу ізоляції. В результаті виникають міжвиткові і міжфазні замикання, пробої на корпус. Міжвиткові замикання можуть мати незначні прояви і розвиватися поступово. Технічне обслуговування, що проводиться за графіком планових ремонтів, часто спричиняє виникнення додаткових дефектів. В таких умовах потрібна розробка методів неруйнівного контролю, які дозволяють визначити стан двигуна в процесі його експлуатації.

В даний час існує декілька основних методів діагностування АД. До них відносять: вібраційні, електромагнітні, теплові та струмові. Найбільш поширеними є вібраційні і електромагнітні методи діагностики. Дані методи знайшли широке застосування для АД потужністю понад 15 *кВт*. У ряді випадків застосування даних методів може бути економічно невиправданим, наприклад, для АД потужністю до 5 *кВт*, або АД може перебувати в важкодоступному місці. Альтернативою є метод струмової діагностики, який дозволяє проводити діагностичне обстеження без втручання в роботу двигуна.

Розвиток методів і засобів контролю поточного стану двигунів дозволяє реалізувати технологію обслуговування по фактичному стану. Таке обслуговування призводить до збільшення часу між поточними і капітальними ремонтами, зниження аварійності обладнання, підвищення економічності виробництва. Підвищення техніко-економічних показників роботи обладнання можна певною мірою вирішувати на основі діагностування стану АД за рахунок виявлення дефектів в обмотках на ранній стадії їх виникнення.

Отже, розробка вдосконалених методів струмової діагностики АД, що включають уточнені діагностичні критерії, є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати роботи отримані автором в процесі його участі в науково-дослідній роботі «Моніторинг режимів електричних мереж, від яких живляться перевантажувальні машини другого перевантажувального району і КПК», відповідно до господарської теми (ДР № 0116U007129).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – дослідження причин зниження терміну служби ізоляції асинхронних двигунів напругою до 1000 В, працюючих в умовах відхилення і несиметричної напруги та підвищеної

запиленості навколишнього середовища.

Відповідно до поставленої мети вирішуються наступні завдання:

- аналіз розроблених до теперішнього часу методів безперервної діагностики технічного стану АД і визначення на цій основі перспективних напрямків робіт з даної проблеми;

- удосконалення теплової моделі старіння ізоляції двигуна в разі несиметрії і відхилення напруг, що динамічно змінюються, коли АД працюють в умовах запиленого середовища;

- розробка діагностичних критеріїв для раннього виявлення моменту виникнення міжвиткових замикань в обмотці статора АД при змінній несиметрії і відхиленнях напруг;

- встановлення закономірності і виявлення меж зміни критеріальних параметрів при діагностиці причин теплового перевантаження ізоляції статорних обмоток АД в умовах струмового перевантаження та локального перегріву ізоляції під шаром пилу;

- розробка способу діагностики локального перегріву ізоляції при запиленні обмотки статора і теплового захисту АД при струмовому перевантаженні;

- аналіз математичних моделей динаміки старіння ізоляції обмоток АД при несиметрії та відхиленнях напруг мережі живлення;

- розробка програмних алгоритмів діагностики та захисту АД при виявленні виткових замикань в обмотці статора та теплових перевантажень при покритті лобової частини обмотки шаром пилу.

Об'єктом дослідження є загальнопромислові АД з короткозамкненим ротором, що працюють в тривалому режимі S1 при несиметричних напругах мережі в умовах запиленого середовища.

Предметом дослідження є залежність зміни струмів в фазах АД від кількості замкнутих витків обмотки статора і залежність температури в лобовій частині обмотки від рівня відхилень і несиметрії напруги та запиленості навколишнього середовища.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися: методи математичного моделювання, теорія електричних ланцюгів, метод симетричних складових, диференціальне та інтегральне числення, методи експериментального дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель залежності зміни струмів в фазах АД при появі виткових замикань в обмотці статора при відхиленні та несиметрії напруг мережі живлення.

2. Вперше встановлені діагностичні критерії, які дозволяють визначити кількість замкнених витків в обмотці з одним провідником чи в обмотці з паралельними провідниками

3. Удосконалено математичну модель динаміки старіння ізоляції АД, яка, на відміну від існуючих, встановлює взаємозв'язок між відхиленнями коефіцієнта несиметрії напруг і лінійної напруги, який пропорційний ступеню

нагріву ізоляції навантаженої фази.

4. Вперше отримано аналітичний вираз, що зв'язує локальний перегрів ізоляції і товщину шару пилу на лобовій частині обмотки статора, який дозволяє здійснити температурний захист АД за різницею показань двох температурних датчиків.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено метод діагностики локальних перегрівів ізоляції, які викликані пиловим покриттям різної провідності і струмовим навантаженням, в якому діагностуються причини підвищення температури ізоляції обмоток АД.

2. Вдосконалена методика визначення параметрів схеми заміщення, яка дозволяє розрахувати значення елементів схеми заміщення з похибкою 1,5 % для асинхронних двигунів потужністю до 5 кВт.

3. Розроблено спосіб контролю та теплового захисту обмоток АД, що працюють в умовах підвищеної запиленості середовища, який дозволяє діагностувати струмове перевантаження та відокремити їх від граничного запилення обмоток статора;

4. Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення виявлення неповнофазних режимів та виткових замикань на ранній стадії при наявності відхилень і несиметрії напруг.

5. Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державно підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 124 239,38 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 52 810 грн./рік.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: проведення експериментального дослідження і отримання швидкісних характеристик нагріву обмоток АД [1]; модель пристрою, який дозволяє керувати терміном служби ізоляції обмоток АД по швидкості нагріву обмоток [2]; експериментальні дослідження впливу товщини шару пилу на лобовій частині обмотки на додатковий нагрів ізоляції [3]; визначення умови настання моменту проведення профілактичних робіт при запилені обмотки статора АД [4]; експериментально встановлені залежності між товщиною шару пилу і додатковим нагрівом [5]; аналіз впливу відхилень активних опорів обмотки статора на розрахунок параметрів схеми заміщення АД [6]; запропоновано вдосконалену методику розрахунку параметрів схеми заміщення АД [7]; удосконалено теплову модель нагріву АД, представленого однорідним тілом [8]; комп'ютерне моделювання зміни розподілу струмів в обмотках АД при замиканні витків в паралельних провідниках обмотки [9]; розробка критеріїв визначення граничного рівня запиленості обмотки і критерій струмового перевантаження [10]; запропоновано алгоритм роботи пристрою [11].

Апробація результатів дисертації.

Основні наукові результати дисертаційної роботи представлялися,

доповідалися автором і обговорювалися на: Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації і електропривод» (м. Краматорськ, 2012 рік); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука 2016» (м. Маріуполь, 2016 рік); ЛІП міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток науки в ХХІ столітті» (м. Харків, 2019 рік).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 9 робіт, з них: в міжнародних науково-технічних журналах – 5; в збірниках наукових праць, що містяться в переліку ВАК, – 4; 1 патент України на винахід; 1 авторське свідоцтво на комп'ютерну програму; тез. доповідей -3.

Структура і склад дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів і висновків. Повний обсяг дисертації включає 163 сторінки машинописного тексту, 37 ілюстрацій по тексту, 34 таблиці по тексту, список літератури з 99 найменувань, 7 доданків, які складають 17 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі визначено фактори, що впливають на термін служби АД, серед яких найбільш значимі – якість напруги живлення, величина навантаження і умови навколишнього середовища. Проведено аналіз стану методів діагностики АД, та обґрунтована доцільність застосування для контролю стану обмоток АД неруйнівних методів діагностування, що використовують поточні експлуатаційні параметри (струм, напруга, оберти, частота мережі). Визначено мету діагностування, яка полягає в визначенні початкового моменту появи пошкоджень. Розроблено завдання функціонального діагностування АД в процесі його експлуатації, яке враховує вплив якості напруги живлення, режиму навантаження та рівня запиленості навколишнього середовища на його технічний, енергетичний і тепловий стан.

Другий розділ присвячений розробці математичної моделі визначення струмів і втрат потужності в обмотках АД при виникненні виткових замикань в мережах з несиметричними напругами. Вдосконалено методику розрахунку параметрів схеми заміщення для АД потужністю до 5 кВт. Вдосконалено теплову модель визначення температури обмоток з несиметричними опорами в фазах АД при живленні від несиметричної мережі, яка розглядає АД як однорідне тіло.

Проведений порівняльний аналіз існуючих методів розрахунку параметрів схеми заміщення АД показав розбіжність отриманих значень окремих елементів від 4 до 20 % і залежність від типу АД і його потужності. Максимальні значення відхилень 15–20 % спостерігаються для АД потужністю до 5 кВт. Використання їх в теплових моделях, які представляють АД однорідним тілом, призведе до розкиду отриманих значень температури статорних обмоток до 40 %, що підтверджено експериментально на АД 4А71В6У3 потужністю 0,55 кВт. Результати представлені на рис. 1.

Для зменшення похибки розрахунку для АД потужністю до 5 кВт удосконалена комплексна методика визначення параметрів схеми заміщення.

Особливістю даної методики є облік активної складової опору обмотки, так як величина активного опору порівняна з величиною індуктивного опору і становить від декількох до десятків Ом. Збіжність теоретичного дослідження і практичного розрахунку параметрів схеми заміщення досягається при виконанні наступного алгоритму, що визначає параметри схеми заміщення АД:

1) здійснюється вимір активного опору обмотки статора. Прийнятним для вимірювань є вимірювальний міст Р333, що має клас точності 0,5 з межею вимірювань від 1 до 99990 Ом, або міліомметр МИКО-9А;

2) виконуються дослідів холостого ходу і короткого замикання. За результатами дослідів проводиться розрахунок параметрів АД;

3) визначаються відсутні параметри схеми заміщення з використанням виразів з перерахованих вище методик, які дозволяють найбільш точно розрахувати ці параметри.

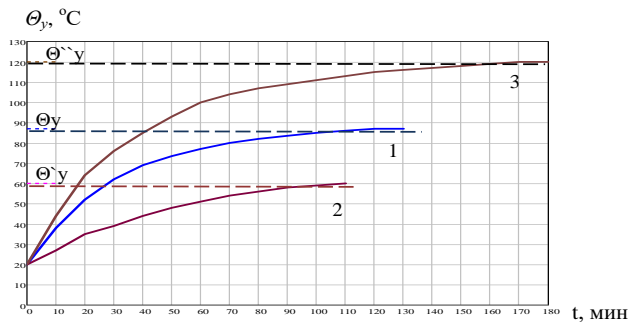


Рис. 1 Графіки зміни температури ізоляції обмотки статора:

1 – експериментально отримана залежність, θ_y – усталена температура обмоток АД при номінальних параметрах схеми заміщення; 2 – розрахункова залежність, θ_y – усталена температура обмоток АД при відхиленні параметрів схеми заміщення на +20 %; 3 – розрахункова залежність, θ''_y – теж саме при – 20 %.

Використання вдосконаленої методики для розрахунку параметрів АД МТ011-06 дозволило суттєво зменшити похибку, в порівнянні з експериментальними замірами, до 1,4 %. Грунтуючись на отриманих результатах можна стверджувати, що параметри схеми заміщення АД, отримані за розробленою методикою, можна застосовувати в системах діагностики і захисту АД потужністю до 5 кВт, де необхідна висока точність і достовірність визначення параметрів елементів схем заміщення АД.

Розкид значень активних опорів обмоток статора може викликатися наступними причинами: 1) неякісним ремонтом АД, 2) замиканням або обривом одного або декількох паралельних провідників в котушці фази статора.

Наведена відносна величина вимірюваного активного опору обмотки статора до довідкового значення визначається виразом:

$$\Delta r = 1 - r_1' / r_{1ном}, \quad (1)$$

де $r_{1ном}$ – довідкове значення величини активного опору фазної обмотки статора; r_1' – фактично виміряне значення активного опору.

Наявність відхилення активного опору в фазі А викличе додатковий зсув фазового кута на величину $\Delta\varphi_a$, який визначається виразом:

$$\Delta\varphi_a = \arctg \frac{x_a \cdot (r_a - r_a')}{r_a \cdot r_a' + x_a^2} \quad (2)$$

де x_a – індуктивна складова повного опору фази А; r_a – активна складова повного опору фази А; r_a' – активна складова повного опору фази А при відхиленні активного опору від довідкового.

Поява додаткового кута зсуву $\Delta\varphi_a$ між напругою і струмом спричинить зміну фазового струму в обмотці статора і збільшення в ній втрат потужності. Вплив активного опору обмоток статора зростає зі зменшенням потужності АД.

При $r_1' = r_{1ном} \cdot (1 - \Delta r)$ рівняння (2) набуде вигляду:

$$\Delta\varphi_a = \arctg \frac{x_{a,ном} \cdot r_{1,ном} \cdot \Delta r}{r_{a,ном} \cdot r_a' + x_{a,ном}^2} \quad (3)$$

Зміни значення $\Delta\varphi_a$ при наявності відхилення активного опору в одній обмотці статора для АД різної потужності представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення кута $\Delta\varphi_a$ для різних діапазонів потужностей АД при наявності відхилення активного опору в одній обмотці АД від 2 до 10 %

Діапазон потужностей, кВт	Відхилення опору Δr , %				
	2	4	6	8	10
0,5 – 1,5	0,180	0,353	0,537	0,711	0,891
2,2 – 7,5	0,039	0,079	0,121	0,161	0,200
11 – 55	0,024	0,042	0,066	0,083	0,107
75 – 110	0,011	0,023	0,034	0,046	0,057

При визначенні параметрів схеми заміщення для АД потужністю менше 2 кВт необхідно враховувати відхилення активного опору в обмотці статора для розрахунку втрат потужності і температури обмоток. Для АД потужністю понад 2 кВт похибка при визначенні параметрів схеми заміщення без урахування відхилення активного опору становить менше 0,5 %, що дозволяє не враховувати наявність відхилення активного опору в обмотках статора в теплових розрахунках АД.

Номінальні втрати потужності в обмотці статора $\Delta P_{ном}$ і втрати потужності ΔP , зумовлені відхиленням активних опорів, визначаються виразами:

$$\Delta D_{i\ddot{i}} = |U_{i\ddot{i}} / Z_{i\ddot{i}}|^2 \cdot r_{i\ddot{i}} = I_{i\ddot{i}}^2 \cdot r_{i\ddot{i}}, \quad \Delta D = |U_{i\ddot{i}} / T Z_{i\ddot{i}}|^2 \cdot r_{i\ddot{i}} \cdot (1 - \Delta r), \quad (4)$$

де $U_{ном}$ – номінальна фазна напруга; $Z_{ном} = r_a + jx_a$ – номінальний комплексний

опір АД; $T = Z / Z_{\text{ном}}$ – коефіцієнт зміни комплексного опору АД при наявності відхилення активного опору обмотки статора.

У табл. 2 наведені результати розрахунку додаткових втрат ΔP_{ϕ} активної потужності в обмотці статора при наявності відхилення активного опору для 4A71B6У3 потужністю 0,55 кВт і 4A80B4У3 потужністю 1,5 кВт.

Отримані результати показують, що не врахування відхилення активного опору обмотки статора для АД 0,5–1,5 кВт призведе до неточного визначення втрат потужності.

Таблиця 2

Додаткові втрати потужності в фазі АД при наявності відхилення активного опору обмотки статора в одній фазі від 0 до 10 % щодо номінального значення

Потужність АД, кВт	$\Delta P_{\text{ном}}$, Вт	ΔP_{ϕ} при зміні Δr [%], Вт				
		2	4	6	8	10
0,55 кВт	55,77	0,91	1,80	2,73	3,63	4,58
1,5 кВт	70,52	1,03	1,97	3,03	4,16	5,14

Несиметрія напруг мережі призводить до змін кутів і модулів векторів фазних струмів в обмотках АД щодо симетричної системі напруг. Замикання 5–20 % витків призводять до зміни активної і індуктивної складових повного опору АД.

Представимо систему симетричних фазових напруг через модуль номінальної напруги, за умови, що система координат проходить через нульову точку. При наявності несиметрії і відхиленні напруг

$$\dot{U}_a = D \cdot |U_n|; \dot{U}_b = M \cdot |U_n| \cdot a^2 \cdot e^{j\Delta\varphi_m}; \dot{U}_c = N \cdot |U_n| \cdot a \cdot e^{j\Delta\varphi_n}, \quad (5)$$

де D, M, N – коефіцієнти, що враховують кратність зміни фазних напруг; $\Delta\varphi_m, \Delta\varphi_n$ – додаткові фазові кути зсуву цих напруг за умови, що кут фази А дорівнює нулю.

При виткових замиканнях відбувається зміна величин активних і індуктивних опорів. Введемо відповідні діагностичні критерії, що враховують досліджувані несправності.

Діагностичні коефіцієнти наявності виткових замикань в обмотці статора k_w і в паралельних провідниках обмотки статора k_m мають вигляд:

$$k_w = 1 - w_k / w_1; \quad k_m = 1 + w_k / w_1 (m_1 - 1), \quad (6)$$

де w_k – число короткозамкнутих витків обмотки статора.

Коефіцієнт k_w застосовується для АД з петльовими одношаровими котушковими або секційними обмотками. Коефіцієнт k_m застосовується для АД з петльовими одно-двошаровими котушковими або секційними обмотками.

Активний, індуктивний опір статора та індуктивний опір магнітного кола при виткових замиканнях дорівнює, відповідно:

$$r_{1w} = k_w \cdot r_1; \quad x_{1w} = k_w^2 \cdot x_1; \quad x_{\mu w} = k_w^2 \cdot x_{\mu} \quad (7)$$

При виткових замиканнях в обмотці статора величина активного і індуктивного опорів ротора, а також активна складова ланцюга намагнічування

залишаються незмінними.

Активний опір статора при замиканнях витків в паралельних провідниках з урахуванням (6) визначається:

$$r_{1m} = r_1/k_m \quad (8)$$

Інші параметри схеми заміщення не залежать від коефіцієнта k_m .

Записуючи повні опори фаз АД при можливих несправностях через номінальні довідкові значення:

$$\dot{Z}_a = T_a |Z_n| e^{j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)}; \dot{Z}_b = T_b |Z_n| e^{j(\varphi_b + \Delta\varphi_b)}; \dot{Z}_c = T_c |Z_n| e^{j(\varphi_c + \Delta\varphi_c)}, \quad (9)$$

визначимо фазні струми в АД при виткових замиканнях в обмотках і несиметрії напруг мережі

$$\dot{I}_a = H |I_n| e^{-j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)}; \dot{I}_b = L |I_n| a^2 e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b)}; \dot{I}_c = J |I_n| a e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}, \quad (10)$$

де $T_a = Z_{wa}(Z_{ma})/Z_n$ – коефіцієнт, що враховує зміну параметрів схеми заміщення АД при виткових замиканнях в фазі А чи замиканні паралельних провідників в котушці фази А; T_b, T_c – аналогічно для фаз В і С; $H = D/T_a$, $L = M/T_b$, $J = N/T_c$ – коефіцієнти, що враховують кратність зміни струму при несиметричних напруженні і виткових замиканнях до номінальної величини; I_n – номінальний струм АД.

Після перетворень отримуємо вирази для струмів прямої I_1 та зворотної I_2 послідовності:

$$\dot{I}_1 = \frac{|I_n|}{3} \cdot V \cdot e^{j\varphi_V}; \dot{I}_2 = \frac{|I_n|}{3} \cdot Q \cdot e^{j\varphi_Q} \quad (11)$$

де V і Q – коефіцієнти, що враховують наявність несиметрії напруг і несиметрії опорів обмоток і визначаються за виразами; φ_V і φ_Q – аргументи струмів прямої і зворотної послідовностей, розраховані за виразами:

Коефіцієнт несиметрії струмів визначиться як:

$$k_{2I} = |I_2/I_1| \cdot 100\% = Q/V \cdot 100\%. \quad (12)$$

Записуючи струм найбільш навантаженої фази через струми прямої і зворотної послідовностей (11) отримуємо:

$$I_a = \frac{I_{ном} \cdot V}{3} \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right); \quad (13)$$

Втрати потужності в найбільш навантаженої фазі АД визначаться за виразом:

$$\Delta P_a = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right); \quad (14)$$

де $\Delta P_{ном} = I_{ном}^2 \cdot r_{ном}$ – втрати потужності в фазі АД при номінальному навантаженні, відсутності відхилень опорів АД і симетричній системі живильної мережі.

Отримана математична модель, описана виразами (13) і (14), дозволяє

прогнозувати зміну струмів в фазах при виникненні виткових замикань і наявності відхилень напруг по фазах. Застосування розробленої математичної моделі в системах діагностики виявлення виткових замикань в процесі експлуатації АД дозволить визначати початковий момент виникнення виткового замикання методом порівняння змодельованих значень при несиметрії опорів і напруг мережі з фактично вимірними величинами.

Результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень при відхиленнях напруги по фазах $\Delta U_a = +7 B$, $\Delta U_b = +2 B$, $\Delta U_c = -10 B$, $k_{2U} = 2,1 \%$ і відхиленні активного опору $\Delta r = +4 \%$ представлені в табл. 3.

Таблиця 3
Результати теоретичного розрахунку та експериментальні дані

	I_a, A	I_b, A	I_c, A	$k_{2i}, \%$
	Відхилення $\Delta r = -4 \%$ у фазі А			
Розрахунок	4,68	4,58	4,30	1,907
Експеримент	4,57	4,49	4,41	1,831
	Відхилення $\Delta r = -4 \%$ у фазі В			
Розрахунок	4,66	4,60	4,30	2,281
Експеримент	4,55	4,52	4,40	2,114
	Відхилення $\Delta r = -4 \%$ у фазі С			
Розрахунок	4,67	4,57	4,31	2,057
Експеримент	4,56	4,50	4,42	1,979

Похибка теоретичних і експериментальних досліджень складала не більше 5 % для струмів і не більше 4 % для коефіцієнта несиметрії струмів.

Визначена залежність зміни коефіцієнта k_m від кількості замкнутих витків в паралельних провідниках та на основі паспортних даних АД побудовано графіки цієї залежності (рис. 2).

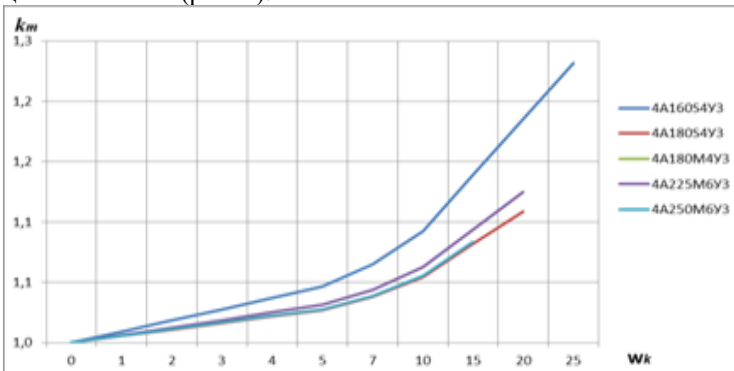


Рис. 2 Залежність коефіцієнта k_m від числа замкнутих витків

Отримані дані показують, що критерієм виявлення замикання в обмотках з паралельними провідниками послужить значення коефіцієнта k_m при замиканні витків одного і того ж провідника. Замикання витків в 2-х і більше однойменних

провідниках, також як і замикання витків в різнойменних провідниках призводять до збільшення коефіцієнта k_m в середньому на 5–7 % вже при замиканні 5 витків.

На підставі представлених графіків чутливість діагностичного критерію k_m становить 3–5 замкнутих витків в одному паралельному провіднику.

Результати розрахунку втрат потужності за виразами (14) в залежності від кількості замкнених витків в паралельних провідниках наведено в табл. 4. З даних цієї таблиці робимо висновки: при виткових замиканнях в 1 паралельному провіднику втрати потужності в даній обмотці збільшуються на 0,1 % при замиканні 1 витка і на 1,8 % при замиканні 17 витків; при виткових замиканнях в 2 паралельних провідниках втрати потужності в даній обмотці збільшуються на 0,4 % при замиканні 1 витка і на 4,6 % при замиканні 17 витків; при виткових замиканнях в 3 паралельних провідниках втрати потужності в даній обмотці збільшуються на 1,0 % при замиканні 1 витка і на 9,2 % при замиканні 17 витків.

Таблиця 4

Втрати потужності в фазі обмотки при короткозамкнутих витках в паралельних провідниках

Виключені паралельні провідники		Кількість короткозамкнутих витків							
		1	2	3	5	7	10	15	17
1 провідник	Вт	281,5	281,9	282,1	282,7	283,3	284,2	285,5	286,2
	%	+0,1	+0,25	+0,4	+0,55	+0,8	+1,1	+1,6	+1,8
2 провідника	Вт	282,2	283,0	284,0	285,7	287,2	289,5	292,8	294,0
	%	+0,4	+0,7	+1,0	+1,6	+2,2	+3,0	+4,2	+4,6
3 провідника	Вт	284,0	286,4	288,7	292,8	296,1	300,2	305,5	307,1
	%	+1,0	+1,9	+2,7	+4,2	+5,3	+6,8	+8,7	+9,2

Досліджена залежність коефіцієнта k_w від кількості замкнутих витків в обмотці для ряду АД потужністю до 5 кВт і визначена його чутливість. Кількість замкнутих витків змінюється від 1 витка до максимально можливого, яке обмежується числом витків в пазу. Графіки залежності коефіцієнта k_w для досліджуваних АД від числа замкнутих витків представлені на рис. 3.

Застосування однієї теплової моделі при наявності виткових замикань в умовах показників якості електроенергії, які динамічно змінюються, можливе при додатковому обліку зміни параметрів схеми заміщення АД при короткозамкнутих витках. Точність результату буде залежати від правильності визначення параметрів елементів схеми заміщення АД в процесі експлуатації і від обліку при розрахунку втрат потужності в обмотках, несиметричних режимах мережі і відхиленнях опорів у фазах.

При сталому режимі роботи, при номінальному навантаженні і симетричних напругах мережі температура АД визначається:

$$\Theta_{ном} = \Theta_{o.c.} + \frac{\Delta P_{ном}}{\alpha \cdot S_{пов}}, \quad (15)$$

де $\Theta_{o.c.}$ – температура оточуючого середовища; $S_{нов}$ – площа поверхні охолодження.

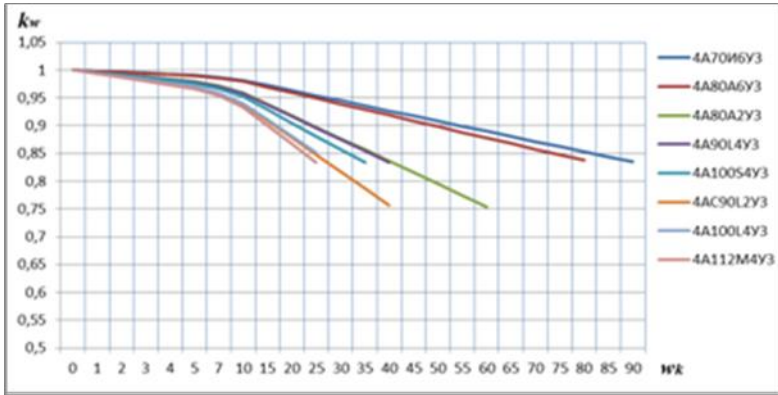


Рис. 3 Графіки залежності коефіцієнта k_w від числа замкнутих витків

Згідно теплової моделі тепло, що виділяється в одиницю часу в обмотці, пропорційно потужності електричних втрат. Відповідно, підставляючи втрати потужності згідно з (14), що враховують наявність відхилень напруг і відмінність опорів по фазах, температура найбільш навантаженої фази визначиться виразом:

$$\Theta_a = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{ном}}}\right), \quad (16)$$

де Θ_a – перевищення температури обмотки фази А при наявності несиметрії напруг і відхиленні активних опорів; t – час; $t_{ном}$ – постійна часу нагрівання.

Температури інших фаз при наявності відхилення напруги $+\Delta U$ збільшуватимуться на 3–7 % від усталеної, в залежності від величини відхилення, і зменшуватимуться на 1–4 % при наявності відхилення напруг $-\Delta U$.

Вираз (16) можна використовувати для оцінки теплового стану обмоток АД при різних ступенях несиметрії опорів, викликаній витковими замиканнями, і відхиленнях напруги, що динамічно змінюються.

Експериментальне дослідження нагріву обмоток при несиметрії опорів і напруг мережі провели на АД 4A71B6Y3. Двигун після заміни обмоток має несиметричні опори по фазах статора: $Z_a = 23,96 + j46,91 \text{ Ом}$, $Z_b = 24,80 + j47,09 \text{ Ом}$, $Z_c = 24,05 + j46,95 \text{ Ом}$, приведений опір ротора $Z_2' = 17,71/s + j25,80 \text{ Ом}$, опір гілки намагнічування $Z_\mu = 28,5 + j181,10 \text{ Ом}$. На обмотку встановлений термодатчик. Дослідження проводилися на лабораторному стенді, який дозволяє задавати несиметрію напруг до 4 %.

Результати експерименту та теоретичного розрахунку за виразами (17) представлені в табл. 5. Як видно з таблиці похибка теоретичного розрахунку і

експерименту не перевищує 5 %. Тому для визначення температури найбільш завантаженої фази в інженерних розрахунках можна використовувати вираз (16).

Таблиця 5

Результати теплового розрахунку і експерименту

Тип АД	k_{2U} , %	Перевищення температури обмотки, °С	
		Експеримент	Розрахунок за виразом (17)
4A71B6У3	0	87	85,8
	1	88,5	91,1
	2	89,5	89,1
	3	92,5	90,7
	4	95,5	93,1

У третьому розділі отримано залежність локального перегріву в лобовій частині обмотки статора в функції товщини шару пилу на ній, показано, що наявність різниці потенціалів на поверхні ізоляції і шару пилу на обмотці товщиною h призводить до появи поверхневого струму $I_{пов}$, величина якого є функцією товщини шару пилу і його матеріалу, вимірювання швидкості поверхневої провідності дозволяє діагностувати допустиму товщину запылення поверхні ізоляції.

Проведені дослідження на металургійних комбінатах і вугільно перевалочному комплексі Маріупольського порту показали наявність дрібнодисперсного пилу на лобових частинах обмотки до 2 см для АД потужністю від 15 до 90 кВт.

Експериментальні дослідження показали, що при запыленні обмоток з дефектами в ізоляції опір ізоляції знижується в кілька десятків разів і при цьому різко збільшуються струми витoku через ізоляцію. У цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходить струм, що руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обмоток або замикання обмоток на землю.

Дослідження проводилися для матеріалів пилу, які найбільш часто зустрічаються на виробництві. До них відносять: окалину, що утворюється на прокатних станах; будівельний пил, що виникає при проведенні в виробничих приміщеннях всіляких ремонтно-оздоблювальних робіт; графітовий пил, який утворюється при роботі колекторних машин як змінного, так і постійного струму; виробничий пил, що є результатом роботи основного технологічного процесу різних виробництв.

Обмотка статора АД розглядається як однорідне тіло, що контактує з навколишнім середовищем. Для усталеного режиму

$$\Delta P = k_{TO} s_{\Pi} (\Theta_{об} - \Theta_{o.c.}), \quad (17)$$

де $\Theta_{об}$ – температура обмотки; $\Theta_{o.c.}$ – температура навколишнього середовища; s_{Π} – площа поверхні охолодження.

При утворенні шару пилу на поверхні лобової частини обмотки частина тепла затримується, а решта тепла за допомогою теплопровідності передається шару пилу. На підставі законів теплопередачі ослаблення теплового потоку q від ізоляції обмотки статора до охолоджуючого повітря через плоскопаралельні стінки пилу визначиться з виразу:

$$q = -\lambda \frac{d\Theta}{dx}, \quad (18)$$

де q – питомий тепловий потік; λ – коефіцієнт теплопровідності пилу, що осів на обмотці; Θ – температура зміни потоку уздовж осі x .

На підставі рівняння теплового балансу, наведеного в (17), (18), отримано вираз для визначення товщини шару пилу з умови допустимого нагріву АД

$$h = \frac{\lambda \cdot (\Theta_{YC2} - \Theta_{YC1})}{\Delta P / s_{II} - \Theta_{YC1} \cdot k_{TO}}, \quad (19)$$

де Θ_{YC1} – температура ізоляції, непокритої пилом; Θ_{YC2} – температура ізоляції під шаром пилу завтовшки h .

Отриманий вираз дозволяє визначити товщину шару пилу, при якому температура обмоток АД підвищиться на величину рівну $(\Theta_{YC2} - \Theta_{YC1})$ і може бути застосована в системах діагностики і прогнозування роботи АД.

Результати моделювання для двигунів потужністю до 90 кВт при різних значеннях теплопровідності матеріалів наведені на рис. 4.

Для оцінки поверхневого струму ізоляції використовуємо спрощену схему її заміщення, яка достатня для інженерних розрахунків. Струм витoku I_{ym} , що проходить через ізоляцію обмоток при сталому процесі електропровідності, визначає істинне значення опору ізоляції. Тому при сталому режимі роботи АД приймається струм ізоляції $I_{из}$ рівним наскрізному струму витoku I_{ym} .

Для аналізу величини поверхневого струму виділимо на прямолінійній ділянці лобової частини обмотки дві точки. Прийmemo значення опору ізоляції 1 точки, яка піддається лише до природного старіння за базову. Швидкість зниження опору ізоляції в точці 2, яка вкрита пилом, вище, ніж швидкість зниження опору ізоляції в точці 1, внаслідок динамічного впливу пусків і підвищеної запиленості в місцях примикання обмотки до сердечника статора. Токи витоків в точках 1 і 2 рівні

$$I_{ym1} = \frac{U_{\phi} - U_1}{Z_{из1}}, \quad I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из2}}, \quad (20)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга; $U_{1,2}$ – напруги на поверхні ізоляції в точках 1 і 2; $Z_{из1,2}$ – опір ізоляції в точках 1 і 2.

Нова ізоляція має рівні струми I_{ym1} і I_{ym2} , напруги в цих точках однакові, поверхневий струм $I_{нов}$ відсутній. Тривала експлуатація АД призводить до нерівномірної зміни опору ізоляції в точках 1 і 2. Виразимо опір в точці 2 через опір точки 1:

$$Z_{из2} = Z_{из1} - \Delta Z, \quad (21)$$

де ΔZ – значення зниження опору ізоляції.

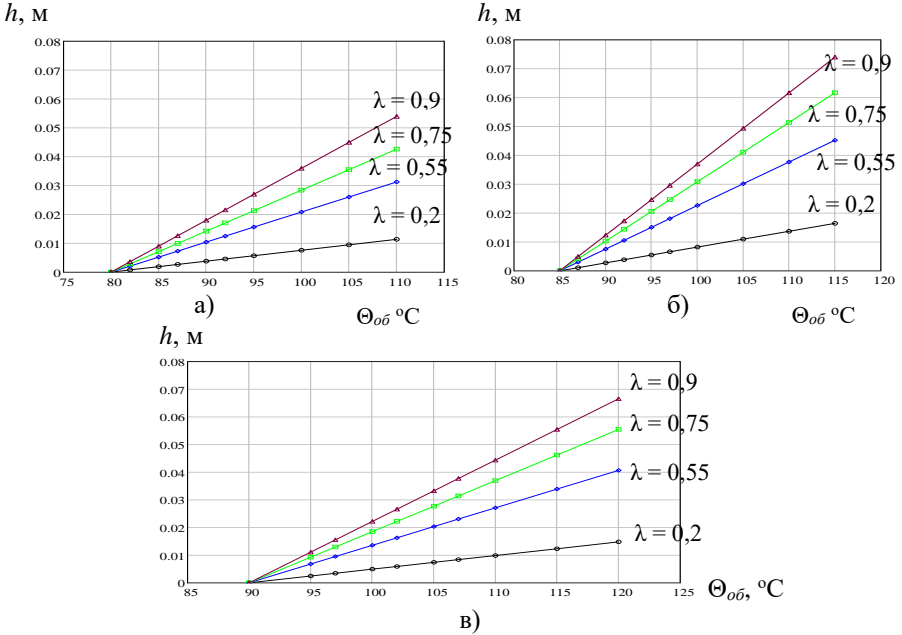


Рис. 4 Графіки залежності температури $\Theta_{об}$ від товщини шару пилу h : а) для АД типу 4A160S4Y3 ($P_{ном} = 15$ кВт); б) для АД типу 4A180M4Y3 ($P_{ном} = 30$ кВт); в) для АД типу 4A255M4Y3 ($P_{ном} = 55$ кВт).

Поява ΔZ обумовлена погіршенням діелектричних властивостей ізоляції в точці 2 в результаті теплових перевантажень, динамічних зусиль, появи мікротріщин, запилення.

З урахуванням виразу (21) струм витoku (20) подається у вигляді

$$I_{ym2} = \frac{U_{\phi} - U_2}{Z_{из1} - \Delta Z}. \quad (22)$$

Потенціали на поверхні ізоляції в цих точках залежать від ступеня неоднорідності діелектрика і нерівномірного зносу ізоляції по довжині провідника в процесі експлуатації і визначаються за виразами

$$U_1 = U_{\phi} - I_{ym1} \cdot Z_{из1}, \quad U_2 = U_{\phi} - I_{ym2} \cdot (Z_{из1} - \Delta Z), \quad \Delta U_{12} = I_{ym2} \cdot \Delta Z \quad (23)$$

Наявність провідного пилу і зволоженого непрводного (в моменти пуску) на обмотці, призводить до появи поверхневого струму

$$I_{пов} = \Delta U_{12} / R_{пов}, \quad (24)$$

де $R_{пов}$ – опір пилу на поверхні обмотки.

Перебіг поверхневого струму по шару пилу, відповідно до закону Джоуля-Ленца, викличе виділення тепла, яке при тривалому впливі призведе до локального пропалювання ослабленої ізоляції. Величина $R_{пов}$ пропорційна питомому опору пилу, залежить від товщини шару пилу на обмотці, довжини покриття пилом ізоляції, стану поверхневої ізоляції (поздовжні тріщини, розшарування і т.д.), а також наявністю вологи. Поверхневий опір розраховується за виразом

$$R_{пов} = (\rho_{пыли} \rho_{вл} \rho_{возд} l) / s, \quad (25)$$

де $\rho_{пыли}$ – питомий опір пилу; $\rho_{вл}$ – питомий опір вологи; $\rho_{возд}$ – питомий опір повітря; l – довжина ділянки, покритої пилом; s – площа перерізу пилу на обмотці.

При моделюванні фізичних явищ при протіканні поверхневих струмів в ізоляції використовували датчик поверхневої провідності. Датчик являє собою парні паралельні електроди, розташовані на текстолітовій платівці. На рис. 5 наведені криві залежності поверхневого опору $R_{пов}$ різних матеріалів пилу від товщини шару h і незмінній площі покриття.

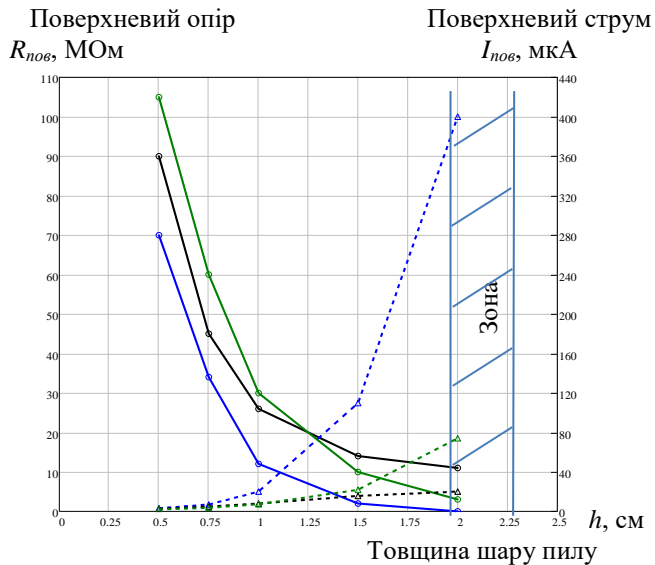


Рис. 5 Графіки залежності величини опору $R_{пов}$ і струму $I_{пов}$ від товщини h шару: 1 – окалина і виробничий пил; 2 – будівельний пил; 3 – графітовий пил

Під час експерименту на датчик насипали описані вище матеріали сухого пилу товщиною 0,5, 0,75, 1, 1,5 і 2 см. Для кожної товщини фіксувалися напруга, що підводиться до датчика, і струм, що протікає через шар пилу. Потім розраховували опір матеріалу. Результати досліджень представлені в таблиці 6.

Аналіз отриманих даних показав, що опір матеріалу $R_{\text{пов}}$, що складається з окалини (30%) і виробничого пилу (70%) крива 1, знижується з 105 Мом (при шарі в 0,5 см) до 3 Мом (при шарі в 2 см), для будівельного пилу – крива 2, опір знижується з 90 Мом до 11 Мом при збільшенні шару від 0,5 см до 2 см. Графітний пил – крива 3 опір знижується з 70 Мом (при шарі 0,5 см) до 0,1 Мом (при шарі в 2 см). Величина поверхневого струму ($I_{\text{пов}}$) крива 1 при збільшенні шару пилу від 0,5 до 2 см збільшилася в 37 разів і склала 74 мкА. Для будівельного пилу величина поверхневого струму (крива 2) при збільшенні шару від 0,5 до 2 см зросла в 8 разів і склала 20 мкА. Поверхневий струм графітового пилу $I_{\text{пов}}$ збільшився в 127 разів і склав 440 мкА при збільшенні шару пилу з 0,5 до 2 см. В цілому можна зробити висновок, що зі збільшенням шару пилу на поверхні ізоляції опір $R_{\text{пов}}$ знижується, це призводить до зростання струмів $I_{\text{пов}}$

Таблиця 6

Зміна опору матеріалу пилу $R_{\text{пов}}$ від товщини його шару h

$R_{\text{пов}}$, Мом	$h = 0,5$ см	$h = 0,75$ см	$h = 1,0$ см	$h = 1,5$ см	$h = 2,0$ см
Окалина (30 %) будівельний пил (70 %)	105	60	30	10	3
Будівельний пил	90	45	26	14	11
Графітовий пил	70	34	12	2	0,07

Проведені дослідження дозволили розробити спосіб контролю та теплового захисту обмоток АД, що працюють в запиленому середовищі.

Четвертий розділ присвячений розробці методів і засобів діагностики і захисту АД, які працюють в умовах неякісної електроенергії в агресивному середовищі.

На підставі результатів досліджень, проведених у розділі 2 було запропоновано алгоритм роботи пристрою діагностики і захисту АД. На рис. 6 приведена блок-схема пристрою.

У робочому режимі АД за допомогою блоку 2 вимірюють величини струмів АД і кути зсуву між струмами, за допомогою блоку 7 вимірюють рівні лінійних напруг. За допомогою блоку 10 вимірюють частоту мережі, за допомогою блоку 5 вимірюють оберти АД. Виміряні аналогові сигнали за допомогою блоків 3, 6, 8, 11 перетворюються в цифрові і надходять на входи мікроконтролера 9. Відповідно до алгоритму розраховують значення фазних струмів і кутів. Порівнюють розрахункові значення фазних струмів і фазових кутів з вимірюваними величинами фазних струмів і кутів.

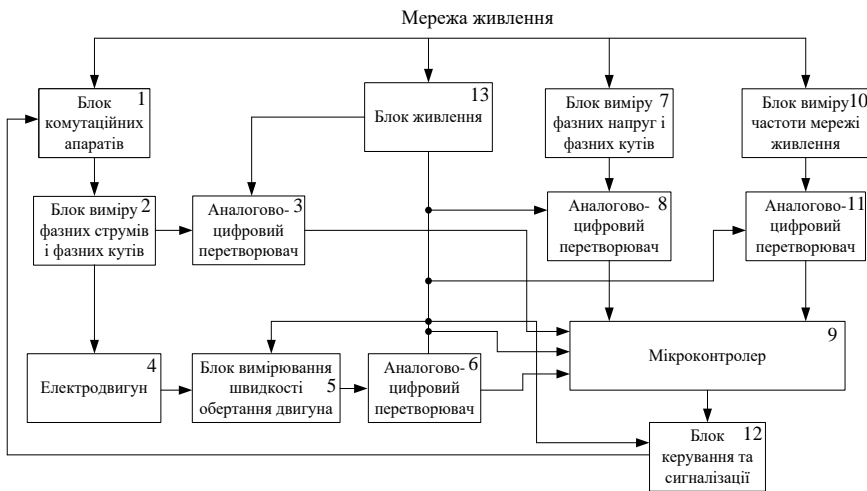
Виконання нерівностей

$$I_a \neq I_{a \text{ евлр}} \pm \delta; I_b \neq I_{b \text{ евлр}} \pm \delta; I_c \neq I_{c \text{ евлр}} \pm \delta$$

$$\varphi_a \neq \varphi_{a \text{ евлр}} \pm \delta; \varphi_b \neq \varphi_{b \text{ евлр}} \pm \delta; \varphi_c \neq \varphi_{c \text{ евлр}} \pm \delta;$$

є критерієм виявлення початкового моменту виткового замикання в межах заданої похибки δ .

Однчасне зниження рівнів напруги і фазних струмів до величин нижче (0,8–0,6) номінального значення і тривалістю більше трьох постійних нагріву АД є критерієм діагностики провалу напруги, при якому АД відключають від мережі живлення.



Рис

. 6 Блок-схема пристрою діагностики і захисту ЕД

Запропонований пристрій діагностики початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках АД, в якому безперервно здійснюється моніторинг рівнів напруг, фазних струмів, частоти мережі і обертів електродвигуна, дозволяє своєчасно виявити початковий момент виткового замикання, тим самим своєчасно запобігти аварійній ситуації.

Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили розробити новий спосіб температурного захисту АД. Реалізація способу представлена на рис. 7.



Рис. 7 Блок-схема пристрою діагностики теплового навантаження та температурного захисту АД

Новизною розробленого пристрою є те, що діагностика струмового перевантаження і визначення товщини пилового покриття здійснюється за двома значеннями температур та швидкості їх зміни.

Встановлюють датчики температури на верхній і нижній лобовій частині обмотки статора. В період роботи електроустаткування вимірюють величини температур першого і другого датчиків. При відсутності струмового перевантаження і запилювання поверхні ізоляції температурні показники датчиків однакові. Температурні свідчення поступають на вхід мікроконтролера і обробляються. На дисплеї відображаються температурні значення датчиків і величина струму. Збільшення струмового навантаження, що відбувається з причини зміни режимів мережі або виникнення внутрішніх поломок електроустаткування, призводить до одночасного підвищення температурних значень обох датчиків. Ця інформація поступає в мікроконтролер, обробляється, і при досягненні температур датчиків допустимої величини, наприклад, 95 °С, на виході мікроконтролера сформується сигнал, який поступить у блок управління і сигналізації, включається сигналізація, яка сповіщає, що відбулось струмове перевантаження. При досягненні температурою датчиків критичного значення, наприклад, 105 °С, блок комутації відключить від мережі електроустаткування, включить команду "Блокування" і сигналізацію про струмове перевантаження. В процесі роботи відбувається запилювання поверхні ізоляції нерівномірним шаром. Температурне значення датчика, встановленого на запиленій частині ізоляції, буде вище за температурне значення другого датчика. Температурна інформація поступає на вхід мікроконтролера, обробляється і визначається товщина пилового покриву, включається сигналізація про необхідність проведення профілактичних робіт. Діагностування причин температурного перевантаження електроустаткування дозволяє однозначно визначити причину температурного перевантаження і своєчасно захистити електроустаткування від перегрівання, тим сам підвищити термін його експлуатації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу створення теоретичних засад безперервних неруйнівних методів і засобів виявлення початкових моментів розвитку пошкоджень в асинхронних двигунах для підвищення строку їх експлуатації і зниженню втрат від аварійних зупинок технологічних процесів, що має суттєве значення для промислової галузі.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Вперше розроблено математичну модель залежності струмів в фазах АД при наявності виткових замикань в обмотках статора при відхиленнях та несиметрії напруг. При рівні несиметрії наруги мережі до 4 % розроблена математична модель ідентифікує замикання 2–10 % витків обмотки. Розрахункові значення струмів близькі до вимірних. Максимальна похибка становить 5 %. Удосконалено теплову модель, яка розглядає АД як однорідне тіло, що дозволяє розрахувати температури кожної обмотки при появі виткових

замикань. Проведені експериментальні дослідження виявили похибку в розрахунку запропонованої теплової моделі 5 %.

2. Встановлені діагностичні критерії раннього виявлення виткового замикання k_w в обмотці статора і замикання в паралельних провідниках k_m котушки обмотки статора. Коефіцієнт k_w можна застосовувати для АД з петльовими одношаровими обмотками. Чутливість коефіцієнта k_w дозволяє розпізнавати виткові замикання 10–15 витків при кількості витків в обмотці понад 400 і 5–10 витків при кількості витків в обмотці менше 300 з похибкою до 10 %. Коефіцієнт k_m придатний для АД з петльовими одно-двошаровими обмотками. Чутливість коефіцієнта k_m дозволяє розпізнавати виткові замикання в паралельних провідниках при замиканні 3–5 витків в однойменному провіднику з похибкою до 7 %.

3. Вперше розроблено спосіб контролю та теплового захисту обмоток АД, який дозволяє виявляти причини температурних перевантажень, завдяки застосуванню двох датчиків температури на верхній і нижній лобовій частині обмотки. При різниці в показаннях датчиків 5 °C і більше робиться висновок про початок запилення обмоток статора, і сигналізуються про необхідність проведення профілактичних робіт. Одночасне збільшення температур обох датчиків на 10 °C свідчить про наявність технологічних перевантажень або неповнофазних режимів і АД відключається від мережі. Запропонований спосіб підвищує надійність і продовжує термін експлуатації і безаварійної роботи АД.

4. Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення раннього виявлення виткових замикань в обмотках АД. За рахунок безперервного моніторингу рівнів напруг, фазних струмів, частоти мережі і оборотів АД і їх порівняння з розрахованими, стає можливим своєчасне виявлення початкового моменту виткового замикання. Виконання рівностей $I = I_{вим} \pm \delta$ і $\varphi = \varphi_{вим} \pm \delta$ вимірних і розрахункових значень фазних струмів і фазних кутів в межах заданої похибки δ є критерієм нормальної роботи АД. Виконання нерівностей $I \neq I_{вим} \pm \delta$ і $\varphi \neq \varphi_{вим} \pm \delta$ є критерієм виявлення початкового моменту виткового замикання.

5. Зроблено аналіз існуючих методів визначення параметрів схеми заміщення АД. Показано, що для АД потужністю до 5 κVt похибка розрахунку становить 15–20 %. Запропоновано удосконалену методику визначення величин елементів схеми заміщення для АД потужністю до 5 κVt , яка враховує вимір активного опору кожної фази обмотки статора. Похибка запропонованої методики не перевищує 1,5 %. Отриманні за цією методикою значення використовуються в системі безперервного моніторингу стану АД.

6. Результати дисертаційної роботи використані на провідних підприємствах, таких як: Державне підприємство «Маріупольський морський торговельний порт» з річним економічним ефектом 124 239,38 грн./рік; «Маріупольський судноремонтний та суднобудівний завод» з річним економічним ефектом 52 810 грн./рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Управление сроком службы изоляции асинхронных двигателей по скоростным характеристикам нагрева обмоток / Кривоносов В.Е., Василенко С.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 11(186). – с. 205-210.
2. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях не симметрии питающей сети / Кривоносов В.Е., Василенко С.В. // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. Выпуск №2 (10Е). – Краматорск; ДГМА, 2012. – с. 14-24.
3. Диагностика и защита изоляции обмоток асинхронных двигателей, работающих в агрессивных средах / Кривоносов В.Е., Василенко С.В. // Вестник Приазовского государственного технического университета. Сборник научных работ. Выпуск № 31 (Серия: Технические науки) – г. Мариуполь, 2015. – с. 148-155.
4. Программное обеспечение для устройства диагностики и тепловой защиты электродвигателей, эксплуатируемых в условиях запыленной среды. / Кривоносов В.Е., Федосова И.В., Василенко С.В. // Вестник Приазовского государственного технического университета. Сборник научных работ. Выпуск № 38 (Серия: Технические науки) – г. Мариуполь, 2019. – с. 129–137.
5. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей / Кривоносов В.Е., Василенко С.В. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Издание Белорусского национального технического университета. – г. Минск №6, 2015. – с. 35-40.
6. Krivonosov V.E., Skosyrev V.G., Vasilenko S.V. Influence of the quality of repair of an induction motor on the after repair life // Österreichisches Multiscience Journal. – Innsbruck (Austria), 2019. – Vol. 1 № 22. – p. 46–51.
7. Krivonosov V.E., Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data // Österreichisches Multiscience Journal. – Innsbruck (Austria), 2019. – Vol. 1 № 18. – p. 36–42.
8. Krivonosov V.E., Karpolyuk I.T., Vasilenko S.V. Influences of the imbalance of the active resistances of the stator windings on the asymmetry of phase currents in conditions of poor-quality network voltage // Znanstvena misel journal. – Ljubljana (Slovenia), 2019. – Vol. 1 № 35. – p. 67–75.
9. Krivonosov V.E., Vasilenko S.V. Analysis of loss of power in the electric motor when closing the parallel branches of stator winding // Slovak international scientific journal. – Bratislava (Slovakia), 2019. – Vol. 1 № 35. – p. 19–23.
10. Пат. № 107898 UA, МПК H02H5/04, H02K15/12, G01K13/08. Спосіб контролю і теплового захисту обмоток електричних машин, які працюють у запиленому середовищі / Кривоносов В.Є., Жежеленко І.В., Московець О.В., Василенко С.В. (Україна). – № а 201401923; заявл. 26.02.2014, опубл. 25.02.2015,

Бюл. № 4. – 5 с.: ілюстр.

11. Авт. свід. № 96405 Україна. Комп'ютерна програма «Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна» / Кривонос В.Є., Гриб О.Г., Карпалюк І.Т., Кривонос В.В., Борякін А.О., Василенко С.В. – опубл. 27.02.2020. – 1 с.

АНОТАЦІЯ

Василенко С.В. Дослідження причин зниження терміну служби ізоляції асинхронних двигунів напругою до 1000 В. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» (14 - Електрична інженерія). – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. - Харків, 2020.

Дисертація присвячена вдосконаленню теоретичних засад, неруйнівних теплових і електричних методів і засобів контролю та діагностики стану АД. Запропоноване рішення полягає в виявленні початкових моментів розвитку пошкоджень в асинхронних двигунах шляхом контролювання у реальному часі енергетичних і теплових параметрів АД засобами функціонального діагностування. Реалізація визначеного напрямку підвищить строк експлуатації АД і знизить втрати від аварійних зупинок технологічних процесів, що має суттєве значення для промислової галузі. Математичний апарат діагностування використовує методи аналізування миттєвих значень струмів і напруг АД, частоти мережі і обертів і дозволяє визначати початковий момент виникнення виткового замикання в обмотці статора, а для виявлення критичного рівня запиленості або струмового перевантаження використовуються значення двох датчиків температур, розташованих на лобовій частині обмотки статора. Створені програмно-апаратні засоби діагностування стану АД, в тому числі, моделі, методики, алгоритми, способи, програми враховують дію експлуатаційних впливів – якість напруги живлення, режим навантаження і запиленість навколишнього середовища.

Коректність і працездатність розроблених моделей, методик, способів, алгоритмів і програм підтверджено лабораторними експериментами, патентом, авторським свідоцтвом і впровадженнями.

Ключові слова: асинхронний двигун, діагностика, несиметрія і відхилення напруг, запилення, обмотка статора, математична модель, локальний перевір, технічний стан.

АННОТАЦИЯ

Василенко С.В. Исследование причин снижения срока службы изоляции асинхронных двигателей напряжением до 1000 В. – На правах

рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» (14 – Электрическая инженерия). – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко.- Харьков, 2020.

Диссертация посвящена совершенствованию теоретических основ, неразрушающих тепловых и электрических методов и средств контроля и диагностики состояния АД. Предложенное решение заключается в выявлении начальных моментов развития повреждений в асинхронных двигателях путем контроля в реальном времени энергетических и тепловых параметров АД средствами функционального диагностирования. Реализация данного решения повысит срок эксплуатации АД и снизит потери от аварийных остановок технологических процессов, имеющих существенное значение для промышленной отрасли. Математический аппарат диагностики использует методы анализа мгновенных значений токов и напряжений АД, частоты сети и оборотов и позволяет определять начальный момент возникновения виткового замыкания в обмотке статора, а для выявления критического уровня запыленности или токовой перегрузки используются значения двух датчиков температур, расположенных на лобовой части обмотки статора.

С учетом конструктивных особенностей обмоток АД, получены диагностические критерии раннего выявления витковых замыканий в обмотке статора. Коэффициент k_w применяется для АД с петлевыми однослойными обмотками. Чувствительность коэффициента k_w позволяет распознавать витковые замыкания 10–15 витков при количестве витков в обмотке более 400 и 5–10 витков при количестве витков в обмотке меньше 300 с погрешностью до 10 %. Коэффициент k_m пригоден для АД с петлевыми одно- двухслойными обмотками. Чувствительность коэффициента k_m позволяет распознавать витковые замыкания в параллельных проводниках при замыкании 3–5 витков в одноименном проводнике с погрешностью до 7 %.

Проведенные исследования влияния наличия витковых замыканий в обмотке при несимметричном питающем напряжении на распределение токов в фазах, а также запыления лобовой части обмотки статора на дополнительный нагрев изоляции и их анализ подтверждают правомерность и адекватность разработанных моделей и методик диагностирования АД.

Созданные программно-аппаратные средства диагностирования состояния АД, в том числе, модели, методики, алгоритмы, способы, программы учитывают действие эксплуатационных воздействий – качество напряжения питания, режим нагрузки и запыленность окружающей среды.

Внедрение разработанных средств диагностирования позволит в течении эксплуатационного срока АД сэкономить до 30 % средств на сервис и ремонты.

Корректность и работоспособность разработанных моделей, методик, способов, алгоритмов и программ подтверждено лабораторными экспериментами, патентом, авторским свидетельством и внедрениями.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, диагностика, несимметрия и

отклонения напряжений, опыление, обмотка статора, математическая модель, локальный перегрев, техническое состояние.

SUMMARY

Vasilenko S.V. Investigation of the reasons for reducing the service life of insulation of induction motors with voltage up to 1000 V. – As a manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko. - Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to improvement of theoretical bases, continuous non-destructive thermal and electric methods and means of control and diagnostics of a condition of AM. The proposed solution is to identify the initial moments of damage in induction motors by real-time monitoring of energy and thermal parameters of AM by means of functional diagnostics. The implementation of a certain direction will increase the service life of AM and reduce losses from emergency shutdowns of technological processes, which is essential for the industry. Mathematical diagnostic apparatus uses methods for analyzing the instantaneous values of currents and voltages of the AM, network frequency and speed and allows you to determine the initial moment of a short circuit in the stator winding, and to detect critical dust or current overload using the values of two temperature sensors located on the stator winding. Created software and hardware for diagnosing the state of AM, including models, techniques, algorithms, methods, programs take into account the effects of operational influences – the quality of the supply voltage, load mode and dustiness of the environment.

Correctness and efficiency of the developed models, methods, ways, algorithms and programs are confirmed by laboratory experiments, the patent, the author's certificate and implementations.

Key words: induction motor, diagnostics, voltage asymmetry and deviation, dusting, stator winding, mathematical model, local overheating, technical condition.