

О. В. Губаревич¹
С. О. Гулак¹
А. П. Поляков²

ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ГОДОГРАФА ВЕКТОРА ПАРКА

¹Державний університет інфраструктури та технологій, Київ;

²Вінницький національний технічний університет

Незважаючи на велику кількість методів контролю стану обмоток статора асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, питання вдосконалення і розробки діагностичного обладнання з високим ступенем достовірності, що відповідає сучасним експлуатаційним вимогам, продовжує залишатися невирішеним. Наявні методи враховують тільки граничний або допустимий стан параметрів обмотки, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку. Особливо це стосується пошкоджень, що важко діагностуються та вимагають проведення подальших досліджень, якими є міжвиткові замикання в фазі обмотки статора.

В роботі розглянуто метод діагностування міжвиткового замикання обмотки статора із застосуванням математичного моделювання на основі годографа вектора Парка. З цією метою вибрана математична модель асинхронного двигуна з встановленою адекватністю реальним процесам, з якою разом використовувався обчислювальний блок вектора Парка струму. В результаті моделювання на прикладі асинхронного двигуна АІР потужністю 11 кВт отримані годографи вектора Парка струму для статора без дефектів в номінальному режимі; в результаті міжвиткового замикання за комплексного опору фази зменшеному до 80 % для номінального режиму та для режиму холостого ходу. За отриманими зображеннями годографа проведено оцінювання стану обмотки статора.

Встановлено, що метод годографа вектора Парка дозволяє діагностувати наявність дефектів та визначати їх рівень в обмотках статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Застосовуючи метод спектрального аналізу годографа вектора Парка струму для проведення діагностики міжвиткових замикань обмотки статора, слід враховувати вплив на отриманий результат параметрів мережі живлення, характеру навантаження, вплив зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів в приводі та ін., виділення яких вимагає додаткових досліджень.

Можливість застосування методу годографа вектора Парка для діагностики обмотки асинхронних двигунів дистанційно, без зупинки роботи двигуна і в повністю автоматизованих діагностичних системах робить цей метод найперспективнішим для подальшого розвитку і застосування.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, обмотка статора, міжвиткове замикання, діагностика, годограф вектора Парка.

Вступ

Трифазні асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором є одними з найпоширеніших електричних машин, що використовуються для приводів різноманітних механізмів у всіх сучасних галузях. Найбільш ефективно використання АД стримує їх висока пошкоджуваність, зниження якої залежить від сучасного рівня і достовірності результатів діагностики. Своєчасне і точне виявлення несправностей сприяє підвищенню надійності електричних двигунів, скорочує терміни ремонту і зменшує непередбачені витрати у разі аварійних відмов.

Переважаючими причинами виходу з ладу АД є пошкодження обмотки статора, які відповідно до наявної зарубіжної та вітчизняної статистики складають 70...78 % всіх відмов двигуна. Згідно з статистичними даними, особливо пошкоджуваним елементом асинхронних двигунів є обмотка статора де міжвиткові замикання мають за різними даними 33,6...40 % всіх відмов статора і відносяться до дефектів, що важко виявляються та диференціюються [1]—[3].

Наявність міжвиткового замикання призводить до того, що в процесі експлуатації АД в пошко-

дженій секції котушки протікає підвищений струм, який викликає істотний нагрів як в самому замкненому витку, так і в поруч розташованих витках, що тягне за собою погіршення властивостей ізоляції проводів, передчасне старіння і руйнування, і, як наслідок, супроводжується новим пробоем ізоляції в сусідніх витках статора. Результатом цього процесу є відмова фазної обмотки і вихід двигуна з робочого стану. Розробка нових та вдосконалення існуючих методів діагностики обмоток статора асинхронних двигунів із застосуванням сучасних підходів є актуальним сучасним завданням.

Метою роботи є перевірка можливості та ефективності застосування імітаційного моделювання на основі годографа вектора Парка струму під час проведення діагностики міжвиткового замикання обмотки статора асинхронного двигуна.

Результати досліджень

На сьогодні існує значна кількість методів діагностики обмоток статора асинхронних двигунів, заснованих, в більшій частині, на контролі стану ізоляції [4]—[6]. Незважаючи на велику кількість методів, питання підвищення рівня діагностики електродвигунів, що відповідає сучасним експлуатаційним вимогам, продовжує залишатися невирішеним. Наявні методи враховують тільки граничний або допустимий стани параметрів обмотки, що не дозволяє оцінювати дефекти на ранній стадії їх розвитку. Крім того, не всі методи дають можливість виконувати поточну діагностику без зупинки двигуна або застосування спеціальних датчиків [3], [7], [8].

В сучасних системах і методах діагностики асинхронних двигунів з організації встановлення пошкоджень, використовується тестовий контроль або функціональний. До методів тестового контролю відносяться методи, основані на вимірювання або розрахування електричних та неелектричних величин: опору ізоляції, струмів витoku, внутрішнього опору обмоток, тангенсу кута діелектричних втрат $\tan \delta$, постійної часу релаксації, температури обмоток, ємності, коефіцієнта діелектричної абсорбції, величини індексу поляризації, коефіцієнту діелектричного розряду і ін. Тестове діагностування наразі є основним видом виявлення дефектів електродвигунів, що використовуються у вітчизняній промисловості [9], [10].

Функціональна діагностика електричних двигунів основана на спектральному аналізі вібрацій, фазних струмів і напруг, що вимірюються в стаціонарних режимах роботи двигуна.

Методи функціональної діагностики є перспективнішими для виявлення дефектів обмотки статора на початкових стадіях і найекономічнішими, оскільки не вимагають тимчасового виведення електродвигуна з експлуатації. Крім того, методи функціонального контролю стану електродвигунів, в своїй більшості, застосовні для створення автоматизованих діагностичних систем з дистанційним управлінням.

З огляду на перспективність функціональних методів діагностування існує необхідність проведення подальших досліджень щодо їх вдосконалення та впровадження із застосуванням сучасних підходів з використанням математичного моделювання [11], [12].

Наявність електричних і механічних несправностей призводить до змін магнітного потоку (амплітудної модуляції) в повітряному зазорі електричної машини, що дає можливість виявити гармоніки струму, характерні для несправностей устаткування. Гармоніки в спектрі струму, які відповідають різним видам несправностей, відрізняються один від одного.

З утворенням міжвиткового замикання в одній з фаз статора створюється несиметричне обертове магнітне поле. Несиметрія зумовлена не тільки зменшенням активного й індуктивного опору однієї з пошкоджених фазних обмоток, а й значною зміною взаємної індуктивності між обмотками. Несиметричності, зумовлені виниклими дефектами, змінюють характер зовнішнього магнітного поля, викликаючи спектр просторових гармонік індукції і створюють появу вібрації, що зумовлена пульсаціями моменту і струму.

Серед існуючих методів функціональної діагностики обмоток статора найширше використовується метод вібродіагностики, заснований на вимірюванні та аналізі спектральних характеристик вібрації. Вібродіагностика дозволяє з достатньою достовірністю визначати дефекти підшипникового вузла, ексцентриситету і значно меншою мірою — дефекти обмотки статора [3], [13].

Останнім часом особливо широко розвиваються методи діагностики стану асинхронних двигунів, основані на контролі споживаного струму з подальшим виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу. Це дозволяє з високим ступенем достовірності визначати стан різних елементів двигуна. Наявність в спектрі струму двигуна характерних частот певної величини свідчить про наявність пошкоджень електричної або механічної частини електродвигуна і

пов'язаного з ним механічного пристрою. Струми статора несуть в собі інформацію про міжвиткові замикання обмоток, обриви стрижнів, неспіввісність, статичний або динамічний ексцентриситет та ін. Механічні пошкодження, такі як руйнування підшипників, також можуть бути виявлені за спектром струму [14]—[16].

Проведення моніторингу струму двигуна може бути проведено як безпосередньо на коробці виводів, без зупинки двигуна, так і на щиті управління подачі живлення. В порівнянні з іншими способами, метод спектрального аналізу струму має низку переваг і найбільшою мірою відповідає критеріям точності і ефективності діагностики стану електродвигунів. Разом з тим, метод спектрального аналізу потребує доопрацювання для усунення низки наявних недоліків. Основним недоліком спектрального аналізу струму асинхронного двигуна є складність оцінки та інтерпретації отриманих результатів. Будь-яка частота f амплітудно-модульованого сигналу з виникненням дефекту, враховується в спектрі двічі, по обидва боки частоти напруги живлення f_1 , тобто у вигляді $|f_1 - f|$ і у вигляді $|f_1 + f|$. Такий подвійний облік модульовальної частоти знижує точність діагностування оскільки ймовірність накладання частот від різних пошкоджень зростає вдвічі. [15], [16].

Для виключення накладання частот від різних пошкоджень і, як наслідок, спотворення картини реального стану двигуна використовується метод аналізу спектрів векторів Парка струму і напруги. Основна відмінність від простого спектрального аналізу сигналів струму, при формуванні спектрів модуля вектора Парка полягає в тому, що будь-яка характерна частота амплітудно-модульованого сигналу враховується в спектрі вектора Парка тільки один раз. Гармоніки в спектрі струму, які відповідають різним видам несправностей, відрізняються один від одного. Таким чином, виявлення в спектрі струму характерних гармонік достовірно і однозначно свідчить про наявність електричних або механічних несправностей в електродвигуні або в пристрої, що приводиться ним у дію [3], [17].

Виконувати оцінку стану і вигляду пошкоджень обмотки статора, як і деяких інших несправностей в асинхронному двигуні, з високою точністю можна за спотворенням годографа вектора Парка струму. Для визначення вектора Парка струму (I_x , I_y) необхідне вимірювання струмів (I_A , I_B , I_C) у всіх трьох фазах статора, а для побудови годографа використовувати такі співвідношення [17]:

$$I_{1X} = \sqrt{2/3}I_A - \sqrt{1/6}I_B - \sqrt{1/6}I_C; \quad (1)$$

$$I_Y = \sqrt{1/2}I_B - \sqrt{1/2}I_C. \quad (2)$$

Кінець вектора Парка для двигуна описує фігуру з центром на початку координат

$$\bar{I} = I_x + j \cdot I_y. \quad (3)$$

Аналіз змін параметрів двигуна, викликаних міжвитковим замиканням в обмотці статора доцільно проводити з використанням сучасних методів імітаційного моделювання. Сучасні моделі для вивчення властивостей асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором розглянуті в роботах [18]—[21]. Для проведення досліджень з діагностики міжвиткових замикань в обмотці статора використовувалася математична модель асинхронного двигуна, наведена в роботі [18] і реалізована в програмному пакеті MATLAB зі встановленням адекватності реальному процесу відповідно до параметрів та характеристик базового двигуна. За базову модель для проведення досліджень взято асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором серії AP132M4 потужністю 11,0 кВт, паспортні дані якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Паспортні дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Параметр	Значення
Номінальна потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	11,0
Номінальна фазна напруга $U_{\text{ном}}$, В	220
Частота мережі f , Гц	50
Частота обертання в режимі холостого ходу (близько) n_0 , об/хв	1500
Частота обертання при номінальному навантаженні $n_{\text{ном}}$, об/хв	1450
Момент холостого ходу M_0 , Нм	0,38
Момент при номінальному режимі $M_{\text{ном}}$, Нм	72,671

Продовження таблиці 1

Параметр	Значення
Струм холостого ходу I_0 , А	9,44
Амплітуда струму холостого ходу I_m , А	13,35
Активний опір обмотки статора r_1 , Ом	0,5
Реактивний опір обмотки статора x_1 , Ом	0,56
Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора r'_2 , Ом	0,36
Реактивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора x'_2 , Ом	0,938

Для неушкодженого статора в режимі холостого ходу, а потім в номінальному режимі із застосуванням моделювання для досліджуваного двигуна визначені значення діючих струмів фаз статора, кутів відставання фазних струмів статора від напруг, діючих значень струмів фаз ротора, кутів відставання фазних струмів ротора від напруг статора. Моделювання також проведене для визначення аналогічних параметрів у разі зменшення комплексного опору фази А на 10 % і на 20 %, що імітує міжвиткове замикання різних за величиною ділянок пошкодження обмотки статора. Результати моделювання наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати моделювання роботи асинхронного двигуна за неушкодженого статора і за наявності міжвиткового замикання зі зміною комплексного опору фази обмотки

Параметр	Холостий хід			Номінальний режим		
	Неушкоджений статор	Комплексний опір		Неушкоджений статор	Комплексний опір	
		90 %	80 %		90 %	80 %
Частота обертання, n об/хв	1500	1500	1500	1451,2	1451,2	1451,2
Діючий струм фази А статора, I_{1A} , А	9,399	9,554	9,714	21,612	21,905	22,207
Діючий струм фази В статора, I_{1B} , А	9,399	9,296	9,19	21,612	21,323	21,027
Діючий струм фази С статора, I_{1C} , А	9,399	9,373	9,349	21,612	21,5	21,324
Кут відставання струму від напруги в фазі А статора, φ_{1A} , град.	88,814	88,071	89,036	31,5	31,5	32,143
Кут відставання струму від напруги в фазі В статора, φ_{1B} , град.	88,814	88,071	90,0	31,5	31,5	32,786
Кут відставання струму від напруги в фазі С статора, φ_{1C} , град.	88,814	87,429	86,786	31,5	30,857	28,929
Діючий струм фази А ротора, I_{2A} , А	0,093	0,153	0,291	18,713	18,914	19,098
Діючий струм фази В ротора, I_{2B} , А	0,093	0,104	0,243	18,713	18,349	17,989
Діючий струм фази С ротора, I_{2C} , А	0,093	0,238	0,39	18,713	18,729	18,771
Кут відставання струму ротора від напруги в фазі А ротора, φ_{2A} , град.	178,737	247,579	265,263	186,316	186,947	187,9
Кут відставання струму ротора від напруги в фазі В ротора, φ_{2B} , град.	178,737	78,947	60,0	186,316	186,947	186,95
Кут відставання струму ротора від напруги в фазі С ротора, φ_{2C} , град.	178,737	168,0	166,737	186,316	186,684	185,05

Для проведення діагностики із застосуванням методу годографа вектора Парка необхідно ввести в модель асинхронного двигуна блок обчислення складових струму статора по осях X , Y (I_{1X} , I_{1Y}) і амплітуду зображуючого струму статора I_{1Z0} . Для цього, з урахуванням виразів (1) і (2), спроектовано струм статора на осі X і Y . На вісь X проектували косинусоїдальні складові статорного струму, а на вісь Y — синусоїдальні. Потім, після переходу від діючих значень струму до амплітуд, проекція струму статора на вісь X буде мати вигляд [17], [19]

$$I_{1X} = \frac{2}{3} \left(I_{1A} \cos(\omega t + \varphi_{1A}) \cos 0^\circ + I_{1B} \cos(\omega t + \varphi_{1B}) \cos(-120^\circ) + I_{1C} \cos(\omega t + \varphi_{1C}) \cos 120^\circ \right), \quad (4)$$

а проекція на вісь Y

$$I_{1Y} = \frac{2}{3} \left(I_{1A} \sin(\omega t + \varphi_{1A}) \sin 0^\circ + I_{1B} \sin(\omega t + \varphi_{1B}) \sin(-120^\circ) + I_{1C} \sin(\omega t + \varphi_{1C}) \sin 120^\circ \right), \quad (5)$$

де ω — кутова частота; t — час.

Амплітуда зображуючого вектора Парка струму статора визначається виразом [17]

$$I_{1Z0} = \sqrt{(I_{1X})^2 + (I_{1Y})^2}. \quad (6)$$

На рис. 1 показаний блок для розрахунку вектора Парка струму, виконаний також в MATLAB, який реалізує вирази (4)—(6).

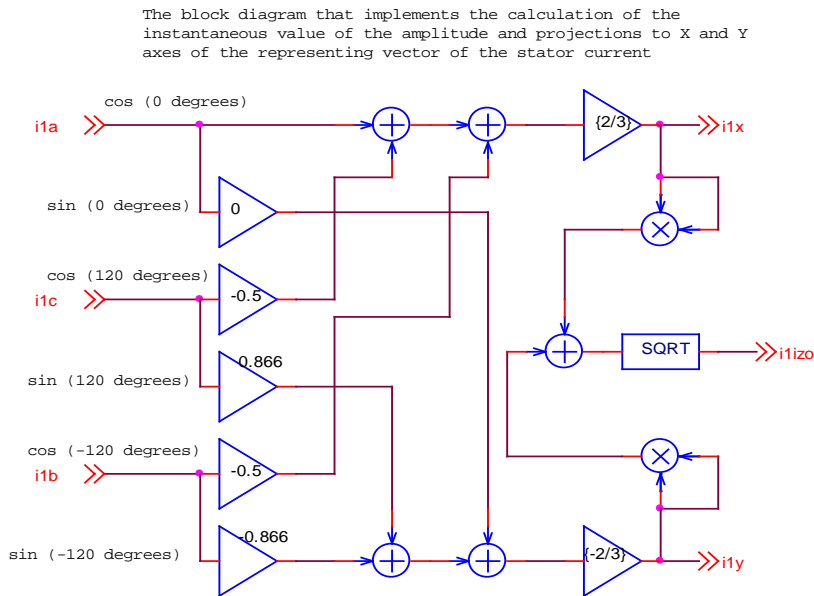


Рис. 1. Блок обчислення складових струму статора по осях X, Y (I_{1X}, I_{1Y}) і амплітуди зображуючого струму статора I_{1Z0}

Використовуючи модель [18] і блок обчислення (рис. 1) для проміжку часу від 0 до $T = 2\pi/\omega$, побудований годограф вектора Парка струму в номінальному режимі для статора без дефектів (рис. 2а), за зміни в результаті міжвиткового замикання комплексного опору фази обмотки до 80 % в номінальному режимі (рис. 2б) і теж саме в режимі холостого ходу (рис. 2в).

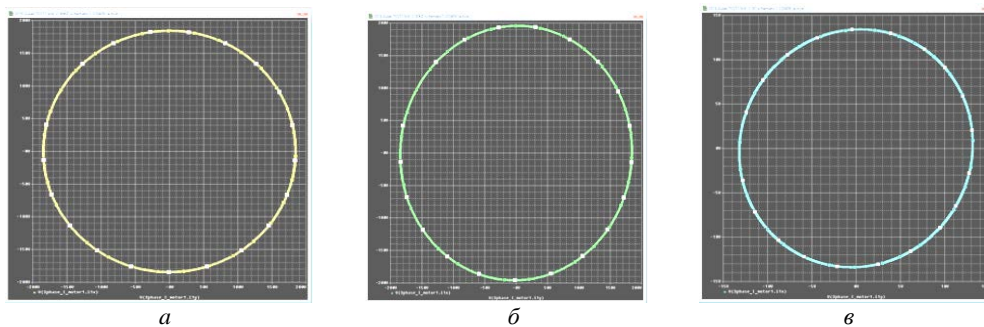


Рис. 2. Годограф вектора Парка: а — обмотка статора без дефектів в номінальному режимі; б — за комплексного опору 80 % в номінальному режимі; в — за комплексного опору 80 % в режимі холостого ходу

Як показує аналіз, за відсутності міжвиткового замикання (рис. 2а) годограф вектора Парка описує правильне коло в масштабі, наведеному на рисунку. З цього випливає, що на комплексній площині з осями X і Y при ідеальних симетричних струмах фаз і ідеальній синусоїдальній напрузі живлення та за відсутності пошкодження обмотки, складові вектора описують коло з постійним радіусом.

Зменшення комплексного опору обмотки фази A до 80 % від номінального, що імітує міжвиткове замикання, призводить до спотворення годографа до еліптичної форми (рис. 2б) зі збереженням розміру зображення. За формою еліпса можна визначити не тільки наявність дефекту, але і вид дефекту, його ступінь і пошкоджену фазу. Ступінь розвитку дефекту можна визначити за змі-

ною діаметрів великої і малої осей еліпса, а номер пошкодженої фази — за нахилом великої осі. З рис. 2б та 2в випливає, що за зміни комплексного опору, в результаті появи міжвиткового замикання в номінальному режимі роботи двигуна і в режимі холостого ходу (2в), розміри годографів значно відрізняються один від одного, що показує масштабна сітка зображення. Це свідчить про те, що чутливість до одного і того ж дефекту в різних режимах роботи двигуна різна. Зменшення годографа вектора Парку в розмірі значно ускладнює виявлення дефектів типу міжвиткового замикання в режимі холостого ходу.

Висновки

В ході проведення досліджень на імітаційній моделі встановлено, що використання метода годографа вектора Парка дозволяє діагностувати наявність дефектів та визначати їх рівень в обмотках статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Годограф вектора Парка — це математичний інструмент, що використовується для аналізу, який дозволяє описувати три фазні змінні в двох ортогональних площинах. Його можна успішно використовувати для діагностування міжвиткового замикання обмотки статора трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, для оцінки несиметрії напруги живлення, ексцентриситеті повітряного зазору, дефектах стрижнів і кілець короткозамкненого ротора та інших видах дефектів, що викликають несиметрію магнітного поля статора.

Для отримання найдостовірніших результатів діагностування обмоток статора електродвигуна необхідно здійснювати обробку статорних струмів великої тривалості за постійної частоті обертання і навантаження, що мало змінюється, близького до номінального.

Застосовуючи метод спектрального аналізу годографа вектора Парка струму для проведення діагностики міжвиткових замикань обмотки статора, слід враховувати вплив на отриманий результат параметрів мережі живлення, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів в приводі та ін., виділення яких потребує додаткових досліджень.

Можливість застосування методу годографа вектора Парка для діагностики обмотки асинхронного двигунів дистанційно, без зупинки роботи двигуна з використанням в повністю автоматизованих діагностичних системах, робить цей метод найперспективнішим для подальшого розвитку і застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] H. Ciprian, and L. Szabó, "Wavelet Analysis and Park's Vector Based Condition Monitoring of Induction Machines," *Journal of Computer Science and Control Systems*, vol. 4, no 2, pp 35-38, 2011.
- [2] В. А. Пономарев, и И. Ф. Суворов, «Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей», Читинский государственный университет, *Новости электротехники*, № 2 (68), 2011.
- [3] Л. Г. Сидельников, и Д. О. Афанасьев, «Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации», *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, № 7, с. 127-137, 2013.
- [4] О. В. Губаревич, С. О. Гулак, і С. М. Голубева, «Комплексний підхід до діагностування асинхронних електродвигунів водного транспорту», *Новітні технології*, зб. наук. пр. Приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій». К.: ПВНЗ «Університет новітніх технологій», вип. 2(9), 2019.
- [5] Е. Г. Худий, і І. І. Пельтек, «Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин», *Вестник НТУ «ХПИ»: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика*, № 28, с. 549-550, 2010.
- [6] В. А. Чернышев, Ю. Ф. Сафроненков, А. А. Гордиловский, и В. А. Чернов, «Современные подходы к оценке состояния изоляции электрических машин высокого напряжения», *Электротехника*, № 4, 92 с., 2008.
- [7] С. О. Хомутов, «Комплекс мероприятий по повышению надежности электрических двигателей в сельском хозяйстве на основе достоверных методов диагностики и эффективных технологий восстановления изоляции», *Ползуновский вестник*, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Барнаул), № 4/2, 2010.
- [8] G. B. Kliman, and J. Stein, "Induction Motor Fault Detection Via Passive Current Monitoring," in *ICEM'90: Proceedings of International Conferences, MIT, Boston*, 1990.
- [9] О. В. Губаревич, и С. М. Голубева, «Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів», *Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету». Серія «Електротехніка і енергетика»*, № 1 (21), с. 55-63, 2019.
- [10] W. T. Thomson, "A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors – Past, Present and Future," Keynote address at *IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, Gijon, Spain, Sept., 1999, pp 3-18.
- [11] В. В. Грабко, и В. В. Грабко, «Математическая модель для диагностирования состояния изоляции работающей мощной электрической машины по ее тепловому портрету», *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 178 с., 2008.
- [12], S. Goolak, «Methodological recommendations for the application of the model of physical processes in three-phase asynchronous motor (in Ukrainian)», *Collection of scientific works of the State economic-technological university of transport*.

Series: Transport Systems and Technologies, 1 (32), pp. 4-13, 2018.

[13] О. В. Губаревич, и А.С. Козынк, «Природа вибрации и современные методы вибродиагностики электрических машин,» *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля*, № 3 (233), с. 53-58, 2017.

[14] А. И. Титко, В. М. Андриенко, А. В. Худяков, и М. С. Гугорова, «Новые методы диагностики асинхронных двигателей,» *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, вип. 37, с. 58-61, 2014.

[15] В. С. Петухов, и В. А. Соколов, «Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока,» *Новости электротехники*, № 1, 63 с., 2005.

[16] T. T. William, and M. Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults," *IEEE Industry Application Magazine*, № 7, pp. 23-29, 2001.

[17] В. Петухов, «Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения,» *Новости электротехники*, № 1 (50), с. 33-37, 2008.

[18], S. Goolak, O. Gubarevych, E. Yermolenko, M. Slobodyanyuk, and O. Gorobchenko, "Development of mathematical model of induction motor for vehicles," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 2/2 (104), pp. 24-35, 2020.

[19] M. Pustovetov, "Induction Electrical Machine Simulation at Three-Phase Stator Reference Frame: Approach and Results," *Electromechanical Devices and Machines. IntechOpen*, 50 p., 2019.

[20] V. K. Ghial, L. M. Saini, and J. S. Saini, "Parameter Estimation of Permanent-Split Capacitor-Run Single-Phase Induction Motor Using Computed Complex Voltage Ratio," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, issue 2, pp. 682-692, 2014.

[21] M. Yu, J. Zhu, D. Qiang, and Y. Zhu, "Numerical calculation of global temperature field during phase failure of small induction motor," in *2019 Chinese Control Conference (CCC) IEEE*, 2019, July, pp. 7143-7148.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електричних вимірювань ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.05.2020

Губаревич Олег Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту, e-mail: oleg.gbr@ukr.net;

Гулак Сергій Олександрович — старший викладач кафедри тягового рухомого складу залізниць, e-mail: sgoolak@gmail.com.

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ;

Поляков Андрій Павлович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: poliakovar61@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Gubarevych¹
S. O. Gulak¹
A. P. Poliakov²

Diagnostics of Stator Windings of an Induction Motor Using Simulation Based on the Hodograph of the Park Vector

¹State University of Infrastructure and Technology;

²Vinnitsia National Technical University

Despite the large number of methods for monitoring the condition of the stator windings of squirrel-cage induction motors, the issue of improving and developing diagnostic equipment with a high degree of reliability that meets modern operational requirements remains unresolved. The available methods take into account only the limiting or permissible states of the winding parameters, which do not allow us to evaluate defects at an early stage of their development. An especially hard-to-diagnose damage requiring further research is the interturn short circuit in the phase of the stator winding.

The paper considers a method for diagnosing interturn closure of a stator winding using mathematical modeling based on the hodograph of the Park vector. For this purpose, a mathematical model of an induction motor with established adequacy to real processes was chosen, with which the computing unit of the Park vector was used. As a result of modeling, using an example of an asynchronous motor model AIR with a power of 11 kW, the hodographs of the Park vector for a stator without defects in nominal mode were obtained; as a result of interturn closure with complex phase resistance reduced to 80% in nominal mode and in idle mode.

It is established that the considered method of applying the simulation model of a squirrel-cage asynchronous motor based on the hodograph of the Park vector allows modeling defects in the stator windings, studying their effect on motor operation, and also diagnosing the degree of defects that occur in the stator.

When applying the method of spectral analysis of the hodograph of the Park vector to diagnose interturn closure faults of the stator winding, it is necessary to take into account the influence on the result of the parameters of the supply network, the nature of the load, the influence of external electromagnetic fields, transient processes in the motor, etc., accounting for which requires additional research.

The possibility of using method of the hodograph of the Park vector for diagnostics of windings of induction motors re-

motely, without stopping the operation of the motor and when used in fully automated diagnostic systems, makes this method the most promising for further development and use.

Keywords: asynchronous electric motor, stator winding, interturn closure, diagnostics, hodograph of the Park vector.

Gubarevych Oleh V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Equipment and Automation of Water Transport, e-mail: oleg.gbr@ukr.net ;

Gulak Serhii O. — Senior Lecturer, of the Chair of Traction Rolling Stock of Railways, e-mail: sgoolak@gmail.com ;

Poliakov Andrii P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Automobile and Transport Management, e-mail: poliakovap61@gmail.com

О. В. Губаревич¹
С. А. Гулак¹
А. П. Поляков²

Диагностирование обмоток статора асинхронного двигателя с применением моделирования на основе годографа вектора Парка

¹Государственный университет инфраструктуры и технологий;

²Винницкий национальный технический университет

Несмотря на большое количество методов контроля состояния обмоток статора асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, вопрос совершенствования и разработки диагностического оборудования с высокой степенью достоверности, отвечающей современным эксплуатационным требованиям, продолжает оставаться нерешенным. Имеющиеся методы учитывают только предельные или допустимые состояния параметров обмотки, что не позволяет оценивать дефекты на ранней стадии их развития. Особенно труднодиагностируемым повреждением, требующим проведения дальнейших исследований, является межвитковое замыкание в фазе статорной обмотки.

В работе рассмотрен метод диагностирования межвиткового замыкания обмотки статора с применением математического моделирования на основе годографа вектора Парка. С этой целью выбрана математическая модель асинхронного двигателя с установленной адекватностью реальным процессам, с которой использовался вычислительный блок вектора Парка тока. В результате моделирования, на примере асинхронного двигателя АИР мощностью 11 кВт, получены годографы вектора Парка тока для статора без дефектов в номинальном режиме; в случае межвиткового замыкания при комплексном сопротивлении фазы, уменьшенном до 80 % в номинальном режиме и в режиме холостого хода.

В ходе проведения исследований на имитационной модели установлено, что использование метода годографа вектора Парка позволяет диагностировать наличие дефектов и устанавливать их уровень в обмотках статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. При применении метода спектрального анализа годографа вектора Парка тока для проведения диагностики межвитковых замыканий обмотки статора следует учитывать влияние на результат параметров питающей сети, характера нагрузки, влияния внешних электромагнитных полей, переходных процессов в приводе и др., выделение которых требует дополнительных исследований.

Возможность применения метода годографа вектора Парка для диагностики обмотки асинхронных двигателей дистанционно, без остановки работы двигателя с использованием в полностью автоматизированных диагностических системах, делает этот метод наиболее перспективным для дальнейшего развития и использования.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, обмотка статора, межвитковое замыкание, диагностика, годограф вектора Парка.

Губаревич Олег Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и автоматизации водного транспорта, e-mail: oleg.gbr@ukr.net ;

Гулак Сергей Александрович — старший преподаватель кафедры тягового подвижного состава железных дорог, e-mail: sgoolak@gmail.com ;

Поляков Андрей Павлович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автомобилей и транспортного менеджмента, e-mail: poliakovap61@gmail.com