УДК 004.94::621.3.048

Е.А Петелін¹ (канд. техн. наук, доц.), Т.В Алтухова²¹Державний вищий навчальний заклад

«Донецький національний технічний університет», м. Покровськ

²Індустріальний інститут

Державного вищого навчального закладу

«Донецький національний технічний університет», м. Покровськ

кафедра електромеханіки і машинобудування

e-mail:eduard.petelin@donntu.edu.ua; tetiana.altukhova@ii.donntu.edu.ua

**ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ШАХТНИХ ДВИГУНІВ**

Робота присвячена визначенню діагностичних параметрів виткової ізоляції електродвигунів гірничо-шахтного обладнання. Виконана оцінка можливості визначення дефектного стану ізоляції по значенням струму і напруги. Встановлено, що не всі можливі чинники дефектів двигунів індукуються та використовуються для діагностування порушення виткової ізоляції двигунів, внаслідок чого визначено, що порушення виткової ізоляції добре корелюється з різницею зсуву фаз між струмом і напругою для різних фаз. Встановлена кореляція має місце при будь яких навантаженнях електродвигунів гірничих машин, так що контроль ізоляції може проводитися постійно, а це, в свою чергу, не потребуватиме спеціальних умов для діагностики. Також визначено ймовірності появи дефектів у витковій ізоляції шахтних двигунів при різниці зсуву фаз між струмом і напругою.

Ключові слова: електродвигуни, виткова ізоляція, дефектний стан, кореляційний зв'язок, зсув фаз, діагностичні чинники

DOI: 10.31474/2075-4272-2019-1-32-114-120

Актуальність проблеми. Сучасні двигуни електричних машин відрізняються достатньо високою надійністю в експлуатації, але значний вплив на термін його роботи оказує велика кількість негативних факторів. В гірничій промисловості на даний момент значна кількість гірничих машин має термін служби від 10-ти до 15-ти років, тому і вплив на них різноманітних агресивних факторів більш значний. В цьому випадку дослідження технічного стану двигунів електричних машин з виявленням несправностей на ранній стадії їх розвитку та оцінка залишкового ресурсу є важливою задачею як в галузі енергетики, так і в вугледобувній.

Для успішного діагностування необхідно знати, що являє собою електрична машина, які можливі відмовлення та які можливі чинники, що призводять до відмов. Також необхідно знати, які є засоби захисту від наслідків того чи іншого дефекту обладнання і які дефекти не діагностуються засобами, що є у обладнанні.

Аналіз попередніх досліджень. Сучасна діагностика електрообладнання зараз умовно розподіляється на три основні напрямки: параметрична діагностика, діагностика несправностей та превентивна діагностика[1]. Мета всіх трьох напрямків полягає у визначенні причини виникнення аномалій та проведення необхідних заходів, щодо виходу з ладу, шляхом збору даних минулого та поточного стану обладнання, таких як вібрація, шум, температура, стан змащення та інше. Моніторинг електромеханічного обладнання складається з трьох етапів: виявлення ознак, діагностика несправностей і прогнозування [2]. Виявлення ознак та діагностика збоїв зазвичай необхідні для виявлення аномального стану,

визначення місця знаходження дефектів та прогнозування ступеню відмов[3].

Шахтні електричні двигуни призначені для перетворення електричної енергії, яку вони одержують від трансформаторних підстанцій, в енергію механічну, за допомогою якої виконується руйнування гірничих мас, транспортування речовин та обладнання, інші операції, необхідні при видобутку корисних копалин[4].

Можливі дефекти електродвигунів та причини їх виникнення наступні [4]:

- двигун при включенні в мережу не розвиває номінальної частоти обертання, видає ненормальний шум. при повертанні валу від руки працює нерівномірно. Причина: можливий обрив фази при з'єднанні обмоток статора зіркою або двох фаз при з'єднанні трикутником;

- ротор двигуна не обертається, сильно гуде, швидко нагрівається до вище допустимих температур. Причина: обрив фази обмотки статора;

- двигун сильно гуде (особливо при пуску), ротор обертається повільно і працює стійко. Причина: обрив в фазі ротора;

- двигун стійко працює при номінальному навантаженні на валу, з частотою обертання, менше номінальної, струм в одній фазі статора збільшений. Причина: обрив в одній фазі статора при з'єднанні обмоток трикутником;

- при роботі електродвигуна на холостому ходу спостерігаються місцеві перегріви активної сталі статора. Причина: замкнуті між собою листи сердечника статора через псування межлистової ізоляції або вигорання зубців при пошкодженнях обмотки;

- перегрів обмотки статора в окремих місцях при несиметрії струмів в фазах: двигун гуде і не розвиває номінального моменту. Причина: виткові замикання однієї фази в обмотці статора; міжфазове замикання в обмотках статора;

- рівномірний перегрів всього електродвигун. Причина: несправний вентилятор (система вентиляції).

З вище сказаного видно, що у приведеному переліку немає інформації про зміну зсуву фаз струмів, втрат холостого ходу, спотворення зміни струму в часі - відхилення від синусоїдальної форми цієї зміни, тому окрім вище зазначених явищ, ці також необхідно враховувати при діагностуванні електричних двигунів з урахуванням ймовірності їх появи при тому чи іншому дефекті.

Головна мета даної наукової роботи полягає у визначенні кореляційного зв'язку між електричними параметрами двигунів гірничих машин та опорами виткової ізоляції для подальшої діагностики їх технічного стану.

Основний матеріал дослідження. Існуючі засоби діагностики базуються на функціональному зв'язку дефекту та його виникнення при зміні будь-якого параметра, доступного виміру. Так, наприклад, захист електромеханічного обладнання від перевищення струму діагностується максимальним реле, що реагує певним чином на точно задане значення струму. Коли з появою дефекту значення вимірюваної величини може в певних межах приймати будь-які значення, а її статистичні характеристики змінюються за певним законом, то зв'язок є статистичним. Тоді як кореляційний зв'язок є випадком статистичного зв'язку, який полягає в тому, що різним значенням однієї змінної, наприклад, опору ізоляції, відповідають різні середні значення іншої, наприклад, струму від джерела електроенергії. Зі зміною значення опору ізоляції закономірним чином змінюється середнє значення струму, в той час як в кожному окремому випадку значення ознаки може приймати безліч значень – звичайно, з різними ймовірностями.

Найпростішою системою кореляційного зв'язку є зв'язок між двома ознаками, який зветься парною кореляцією. Практичне її значення полягає в тому, що існують системи, в яких серед усіх факторів, що впливають на результативну ознаку, виділяється один фактор, який визначає варіацію результативної ознаки. Наприклад, струм трансформатора, або двигуна чи якогось іншого електротехнічного пристрою, залежить від кількох факторів:

навантаження, напруги, наявності гармонік та будь-яких інших, але з якоюсь вірогідністю і від опору ізоляції. В нашому випадку визначення парних кореляцій виконується між дефектами і параметрами електричного струму. Параметри струму як ознаки дефекту обрані тому, що вони, в порівнянні з іншими, можуть бути виміряні за допомогою пристроїв, якими оснащено, або може бути оснащено, існуюче електрообладнання.

З метою виявлення такого кореляційного зв'язку виконується обчислювальний експеримент по визначенню кореляції між струмом і напругою фаз, та опорами міжвиткової ізоляції електричного двигуна. Суть даного експерименту полягає у заміні об'єкта дослідження його математичною моделлю і дослідженні сучасними обчислювальними засобами математичних моделей.

Визначення коефіцієнту кореляції здійснюється за наступним виразом [5]:

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right) \cdot \left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)}}, \quad (1)$$

де r - коефіцієнт кореляції між величинами, x і y – величини, між якими відшукується кореляція, наприклад, між зсувом фаз струму і напруги електричного двигуна та струмом витоку через ізоляцію, n – кількість ступенів свободи.

Коефіцієнт кореляції може приймати значення в межах від -1 до +1. Чим ближче він за абсолютною величиною до 1, тим тісніше зв'язок. Знак при коефіцієнті вказує напрямок зв'язку: знак «+» відповідає прямій залежності, знак «-» – зворотної. Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, то зв'язку між ознаками немає; якщо він дорівнює одиниці, то між ознаками існує функціональний зв'язок. Коефіцієнт кореляції має бути суттєвою величиною, тому оцінка суттєвості проводиться з використанням t -критерія Стюдента за наступною формулою [5]:

$$t = \frac{|r|}{S_r}, \quad (2)$$

де S_r – середньоквадратична похибка коефіцієнту кореляції:

$$S_r = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{N-2}}, \quad (3)$$

де N – кількість вибірки. Критичне значення t_T визначено по розподілу Стюдента для числа ступенів свободи $N-2$. У нашому випадку $N=29$, так що число ступенів свободи дорівнює 27.

Дефект виткової ізоляції електричних двигунів, який приводить до виткового замикання, є поширеним явищем при експлуатації шахтного електрообладнання. Його діагностика складна внаслідок того, що замикання одного або декількох витків не призводить до істотного зниження опору обмотки і, отже, не відбивається суттєво на значенні струму фази. Однак по закорочених витках проходить великий струм, а це в свою чергу істотно знижує індуктивність обмотки фази двигуна. Внаслідок цього повинен змінюватися зсув фаз між напругою і струмом фази. Схема дослідження представлена на рисунку 1.

Схема містить джерело трифазної напруги, електричний двигун та індуктивності, які

включені паралельно фазам двигуна. Для вимірювання параметрів в схему включені амперметри та вольтметри, зсув фаз вимірювався як зворотна тригонометрична функція відносини активної і повної потужностей. Схема вимірювання представлена на рисунку 2

Рисунок 1 – Схема визначення параметрів, з якими корелюється виткове замикання

Вимірювання відбувається наступним чином. Струми і напруги визначаються відповідними перетворювачами, значення їх перетворюються в діючі і виводяться на дисплей і на помножувач. На виході помножувача повна потужність. Миттєві значення перемножуються, і визначається середнє значення добутку, який являє собою значення активної потужності. Далі воно ділиться на значення повної потужності – виходить значення косинуса кута зсуву фаз напруги і струму. За цим значенням визначається вказаний кут в радіанах. У таблиці 1 зведені розрахункові критичні значення коефіцієнтів кореляції.

Рисунок 2 – Схема вимірювання при дослідженні кореляції з витковим замиканням

З проведеного експерименту можна зазначити, що виткове замикання добре корелюється з зсувом фаз між напругою і струмом (майже в 6,5 разів перевершує критичне для 14 ступенів свободи значення) і значимо корелюється з різницею струмів у фазах, протилежних той, де з'явилось виткове замикання. Ймовірність того, що ці явища свідчать про порушення ізоляції між вітками визначені нижче.

Таблиця 1 – Визначення критичних значень коефіцієнтів кореляції

Найменування параметра	Умове позначення	I_A-I_B , А	I_B-I_C , А	I_A-I_C , А	$\Delta\varphi_A-\Delta\varphi_B$, рад	$\Delta\varphi_B-\Delta\varphi_C$, рад	$\Delta\varphi_A-\Delta\varphi_C$, рад
коефіцієнт кореляції	$ r $	0,44	0,87	0,42	0,33	0,59	0,93
СКП коефіцієнта кореляції	Sr	0,24	0,13	0,24	0,25	0,22	0,1
t критерій Стюдента	t	1,83	6,60	1,73	1,31	2,73	9,46
порівняння t критерія з його критичним значенням $t_T=2,977$	$t-t_T$	-1,14	3,62	-1,25	-1,67	-0,24	6,49

Прийнято, що різниця зсуву фаз між струмом і напругою може бути викликана наступними обставинами: по-перше, дефектом ізоляції між фазами двигуна, по-друге – нерівномірним зсувом фаз між струмом і напругою самого джерела напруги, до якого підключений двигун. З цього випливає, що ймовірність того, що різниця зсуву фаз свідчить про дефект ізоляції:

$$P\left(\frac{\Delta\varphi_{\text{дв}}}{R_{\text{Витк.Із.дв.}}}\right) = \frac{N_{\text{Витк.Із.дв.}}}{\sum N_{\Delta\varphi_{\text{дв}}}} = \frac{1}{2} = 0,5 \quad (5)$$

Ймовірність того, що сукупність цих явищ, а саме різниць струмів і різниць зсуву фаз свідчить про наявність дефекту ізоляції між вітками дорівнює сумі сумісних ймовірностей:

$$\begin{aligned}
 P(R_{\text{Витк.Із.дв.}}) &= P\left(\frac{\Delta I}{R_{\text{Витк.Із.дв.}}}\right) + P\left(\frac{\Delta\varphi_{\text{дв}}}{R_{\text{Витк.Із.дв.}}}\right) - \\
 &- P\left(\frac{\Delta I}{R_{\text{Витк.Із.дв.}}}\right) \cdot P\left(\frac{\Delta\varphi_{\text{дв}}}{R_{\text{Витк.Із.дв.}}}\right) = \\
 &= 0,5 + 0,5 - 0,5 \cdot 0,5 = 0,75
 \end{aligned} \quad (6)$$

Висновки. З вище викладеного, можна зробити висновки, що:

1. Під час аналізу можливих несправностей електродвигунів гірничих машин та засобів їх виявлення визначено, що не всі можливі чинники дефектів індукуються та використовуються для діагностування стану, а саме не контролюється порушення виткової ізоляції двигунів.

2. Встановлено, що порушення виткової ізоляції, що є наслідком зменшення її опору і зміна індуктивності фази електродвигуна гірничих машин, корелюється з різницею зсуву фаз між струмом і напругою для різних фаз і з різницею струмів фаз, причому коефіцієнт

кореляції близький до 1. Ця обставина може бути використана для поточного контролю стану і профілактики дефектів ізоляції та запобігання аварій, пов'язаних з порушенням ізоляції.

3. Виявлена кореляція має місце при будь яких навантаженнях, так що контроль ізоляції може проводитися постійно, не потребує спеціальних умов для тестування, таких як відключення напруги, звільнення від залишкового заряду тощо.

4. Визначено ймовірність виникнення дефектів виткової ізоляції при різниці струмів і різниць зсуву фаз, яка дорівнює $P\left(\frac{\Delta\varphi_{\text{дв}}}{R_{\text{Витк.ІЗ.дв.}}}\right) = 0,5$ та $P(R_{\text{Витк.ІЗ.дв.}}) = 0,75$.

Перелік використаної літератури

1. Хальясмаа, А.И. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учеб. пособие. /А. И. Хальясмаа, С. А.Дмитриев, С. Е.Кокин, Д. А.Глушков // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. - 64 с.
2. Randall, R.B. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. /R. B. Randall /Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.,2011. - 312 p.
3. Sikorska, J.Z. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. /J.Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma / Mechanical Systems and Signal Processing , 25(5), 2011. - P. 1803–1836.
4. Пучков, Л.О.Електрифікація гірничого виробництва. Підручник для ВНЗ: у 2-х т./ Л.О.Пучков, О.В.Ляхомський, Л.О. Плащанський, М.І. Чеботаєв, В.І. Щуцький, Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.Т. Заїка, Ю.Т. Разумний, А.Я.Рибалко; за ред. Л.О. Пучкова і Г.Г. Півняка. Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2010. - Т. 1. - 503 с.
5. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие. /И.А. Реброва // Омск: СибАДИ, 2010. - 105 с.

References

1. Khalyasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E., Glushkov D.A. (2015), *Diagnostics of electrical equipment of power plants and substations: a manual for students*. Publishing house Ural. University, Ekaterinburg, Russia, 64 p.
2. Randall R. B. (2011), «Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications». *Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.*, 312 p.
3. Sikorska J. Z., Hodkiewicz M., Ma L. (2011), «Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry». *Mechanical Systems and Signal Processing* , vol. 25(5), p.p. 1803–1836.
4. Puchkov L.O., Lyakhomsky O.V. , Polshansky L.O., Chebotav M.I., Shchutsky V.I., Pivnyak G.G., Shkrabets FP, Zaika V.T., Reasonable Yu.T. (2010), *Elektrifikatsiya gornichogo virobnitstv*. For a man-in-charge of the VNZ: in 2 tons. Ed. L.O. Puchkova and G.G. Pivnyak. National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine, T. 1., 503 p.
5. Rebrova I.A. (2010), *Planning an experiment: a manual for students*. SibADI, Omsk, Russia, 105 p.

¹Э.А. Петелин, ²Т.В. Алтухова

¹ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

²Индустриальный институт ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», кафедра электромеханики и машиностроения

Определение диагностических параметров витковой изоляции шахтных двигателей.

Работа посвящена определению диагностических параметров витковой изоляции электродвигателей горно-шахтного оборудования. Выполнена оценка возможности

определения дефектного состояния изоляции по значениям тока и напряжения. Установлено, что не все возможные факторы дефектов двигателей индуцируются и используются для диагностирования нарушения витковой изоляции двигателей, в результате чего выяснено, что нарушения витковой изоляции хорошо коррелирует с разницей сдвига фаз между током и напряжением для разных фаз и с разницей токов фаз. Установленная корреляция имеет место при любых нагрузках электродвигателей горных машин, так что контроль изоляции может проводиться постоянно, а это, в свою очередь, не требует специальных условий для диагностики. Также определены вероятности появления дефектов в витковой изоляции шахтных двигателей при разнице сдвига фаз и совокупности явлений разниц сдвига токов и сдвига фаз.

Ключевые слова: электродвигатели, витковая изоляция, дефектное состояние, корреляционная связь, сдвиг фаз, диагностические факторы

¹E. Petelin, ²T. Altukhova

¹SHEE «Donetsk National Technical University»

²Industrial institute of SHEE «Donetsk National Technical University», Department of Electromechanics and Machine building.

Determination of diagnostic parameters of winding isolation of mine engines.

The work is devoted to the determination of the diagnostic parameters of the winding insulation of electric motors of mining equipment. The estimation of the possibility of determining the defective state of the insulation according to the values of current and voltage is made. It has been established that not all possible factors of engine defects are induced and used to diagnose violations of motor winding insulation, as a result of which it was found that violations of winding insulation correlate well with the difference in phase shift between current and voltage for different phases and with the difference in phase currents. The established correlation takes place at any loads of the electric motors of mining machines, so that the insulation control can be carried out continuously, and this, in turn, does not require special conditions for diagnostics. The probabilities of the occurrence of defects in the winding insulation of shaft motors are also determined when there is a difference in the phase shift and the combination of the phenomena of the difference in current and phase shifts.

Key words: motors, coil insulation, defective state, correlation, phase shift, diagnostic factors.

Петелін Едуард Анатолійович, Україна, закінчив Донецький національний технічний університет, доцент кафедри електронної техніки факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).
Основний напрямок наукової діяльності – енергозбереження.

Алтухова Тетяна Володимирівна, Україна, закінчила Донецький національний технічний університет, асистент кафедри електромеханіки і машинобудування Індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).
Основний напрямок наукової діяльності – діагностика електромеханічних систем промислових підприємств.