

ПРИНЦИП ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНИЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНА

О. М. Матвієнко, аспірант кафедри інженерії енергосистем

В. Є. Кривоносов, доктор технічних наук, професор

Н. Д. Пруднікова, кандидат технічних наук, доцент

М. К. Сіренко, студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: o.matvienko@nubip.edu.ua

Анотація. Простота конструкції асинхронного двигуна (АД) дозволяє широко застосовувати їх у промисловості. Парк АД часом досягає 80 % всього навантаження підприємства. За даними статистики більше 60 % виходу з ладу АД спостерігається через пошкодження ізоляції обмотки статора АД. Причиною є передчасне динамічне та термічне старіння ізоляції, що призводить до виходу провідної та пазової частин обмотки АД. У результаті зниження діелектричних властивостей ізоляції виникають пошкодження в статорних обмотках АД, такі як виткові, міжфазні замикання, які, як правило, переростають у коротке замикання. Замикання в обмотках статора АД є аварійними та призведе до раптового відключення АД від мережі живлення існуючими засобами релейного захисту, наприклад, струмова відсічка чи тепловий захист. Раптове, не санкційне відключення електродвигуна від мережі живлення приводе до зупинки технологічного обладнання, пошкодження обладнання, сировини та економічним втрат. Метою роботи є розробка принципів своєчасного контролю та прогнозування стану корпусної та міжфазної ізоляції статорних обмоток АД з використанням енергії конденсаторів при локальній компенсації реактивної потужності. Для досягнення поставленої мети проведені дослідження на лабораторній установці з АД, у якого зроблено відгалуження витків. Розглянуто перехідні процеси розряду конденсатора та запропоновано нові методи контролю та прогнозування залишкового ресурсу ізоляції. Новий метод базується на моніторингу стану ізоляції після кожного відключення АД від мережі живлення, при цьому використовувати енергію яка залишається в конденсаторах. Застосування зміни швидкісної характеристики сталої часу розряду конденсатора дозволило прогнозувати залишковий термін експлуатації АД. Особистість дослідження є те, що в умовах локальної компенсації реактивної потужності можливо використовувати енергію, яка залишається в конденсаторах, для діагностики та прогнозування стану ізоляції, а також зміни швидкісної характеристики сталої часу розряду конденсатора, яка є критеріальним параметром для прогнозування залишкового терміну експлуатації АД. Проведені дослідження підтвердили розвиток тестової діагностики в умовах компенсації реактивної напруги, що є новим напрямком у системах неруйнівної

діагностики, який потребує продовження досліджень та застосувань у промисловості.

Ключові слова: *ізоляція обмоток електродвигуна, локальна компенсація реактивної потужності, прогнозування, контроль, неруйнівна діагностика*

Актуальність. Простота конструкції асинхронного двигуна (АД) дозволяє широко застосовувати їх у промисловості. Парк АД часом досягає 80 % всього навантаження підприємства. За даними статистики більше 60 % виходу з ладу АД спостерігається через пошкодження ізоляції обмотки статора АД. Причиною є передчасне динамічне та термічне старіння ізоляції, що призводить до виходу провідної та пазової частин обмотки АД. У результаті зниження властивостей ізоляції виникають пошкодження в статорних обмотках АД такі як виткові, міжфазні замикання, які переростають у коротке замикання. Замикання в обмотках статора АД є аварійними та приводить до раптового відключення АД від мережі живлення існуючими засобами релейного захисту, наприклад, струмова відсічка чи тепловий захист. Раптове, не санкційне відключення електродвигуна від мережі живлення призводить до зупинки технологічного обладнання, пошкодження обладнання, сировини та економічним втрат.

Тому розробка нових методів неруйнівного тестового контролю та прогнозування залишкового ресурсу електродвигуна із застосуванням енергозберігаючих принципів є нині актуальною метою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для виявлення зміни технічного стану електрообладнання застосовують системи неруйнівного тестового і функціонального діагностування. У системах тестового діагностування на об'єкт подаються спеціально організовані тестові впливи та вивчаються результати їх дії. У системах функціонального діагностування використовуються тільки параметри робочих показників (струми, напруги, температури та інші)

Розвиток функціонального діагностування розглянуто метод контролю зсувів між кутами фазних струмів та фазними напругами під час експлуатації АД. Цей додатковий діагностичний параметр контролює несиметричні режими в статорних

обмотка АД. Але в цій роботі відсутні дослідження впливу несиметрії фазної напруги мережі живлення на чутливість виявлення кількості замкнутих витків.

Розглянуто метод превентивного захисту, який забезпечує своєчасне виявлення можливих пошкоджень двигуна при його роботі та здійснює прогноз їх розвитку, який заснований на постійному моніторингу робочих параметрів та зміни параметрів математичної моделі.

Для двигунів напругою більше 1 кВ ефективним методом є підрахування розрядів в ізоляції. Представлено компактну систему для оцінки зношування ізоляційних матеріалів, що використовуються у високовольтних силових установах, яка одночасно визначає зміну трьох основних параметрів, що є важливими для оцінки зносу високовольтних ізоляційних матеріалів: провідності, діелектричної проникності та накопичення заряду.

Розглянуто метод оцінки стану ізоляції за частотними розрядами, проведено огляд відповідних типів електромагнітних методів вимірювання та датчиків. Застосування методів підрахунку частотних розрядів є важливим при діагностуванні електрообладнання напругою більше 1 кВ. Для контролю та оцінки зміни властивості ізоляції як при технічному обслуговуванні, так і після ремонту АД використовується неруйнівна тестова діагностика. Найзастосованіший тестовий метод контролю виткових замикань в обмотках непрацюючого електродвигуна - це метод мілівольтметра й амперметра. Існує метод виявлення міжвиткового замикання за величиною спадання напруги на випробовуваній обмотці при живленні її змінним струмом через реостат. Розглянуто спосіб виявлення короткозамкнених витків в обмотках АД на основі безпосереднього вимірювання опорів цих обмоток при змінному струмі. Також розглянуто тестові випробування міжвиткової ізоляції непрацюючого електродвигуна. На фазні обмотки подається імпульсна напруга 1000-2500 В, фіксуються сигнали у вигляді амплітудного значення напруги з кожної з обмоток електродвигуна. Порівнюють сигнали при випробуваннях двох обмоток, інформація обробляється методом «Проні». Встановлюють коефіцієнт розбіжності параметрів сигналів та роблять висновок про пошкодження обмоток. Також відомий метод оцінки пошкодження обмоток - метод співвідношення площі помилок.

Відомий метод оцінки пошкодження обмоток - метод співвідношення площі помилок (% індекс EAR). Цей метод є ефективним для аналізу зареєстрованих сигналів перенапруги під час випробування до та після ремонту електродвигуна. За цим методом виконується порівняння між амплітудами двох сигналів, отриманих від двох пар фаз ($AB = 1$, $BC = 2$, $CA = 3$), що випробовуються у трифазній обмотці двигуна, співвідношення площі помилок визначається за виразом:

$$\%EAR = \frac{\sum_{i=1}^N [A_i - B_i]}{\sum_{i=1}^N [A_i]} \cdot 100$$

де A_i - це оцифрована вибірка даних першої записаної форми імпульсу або еталонного сигналу, B_i - відповідна оцифрована вибірка даних другої форми імпульсу, i - індекс підсумовування кожної вибірки даних, N - кількість вибірок форми імпульсу. Коли два сигнали перенапруги під час іспиту ідентичні, $\%EAR$ дорівнює 0, а якщо існує різниця, наприклад, типове значення вище 5-10 % вказує на погіршення ізоляції витка.

Недоліками методу є те, що він використовується при випробуваннях непрацюючого електродвигуна, потребує окремого джерела живлення високої напруги, для забезпечення достатньої чутливості потребує проведення N - кількість вибірок під час випробування та не враховує розбіжність параметрів обмоток електродвигуна.

Досліджено вплив імпульсної напруги на ізоляцію обмоток при комутаційному розриві постійного струму, що живить обмотку. Проводиться аналіз перехідного процесу, який свідчить про рівень дефектності. Розглянуто діагностично-системний модуль, який може забезпечити систему планово-попереджувальних ремонтів інформацією про стан ізоляції обмоток.

Аналіз відомих наукових праць свідчить, що удосконалення тестових методів та розробка нових автоматизованих систем своєчасного контролю розвитку виткового замикання в обмотках АД під час їх експлуатації є актуальною задачею, яка сприяє підвищенню надійності ЕТК.

Мета дослідження - розробка принципів своєчасного контролю та прогнозування стану корпусної ізоляції статорних обмоток АД з використанням енергії конденсаторів при локальній компенсації реактивної потужності

Матеріали та методи дослідження. Досліджувався АД, встановлений в лабораторній установці. Застосовано електричний метод дослідження перехідного процесу розряду конденсатору.

На (рис.1) наведена експериментальна установка дослідження зміни інформаційно-критеріальних параметрів для прогнозування зниження властивості ізоляції АД.

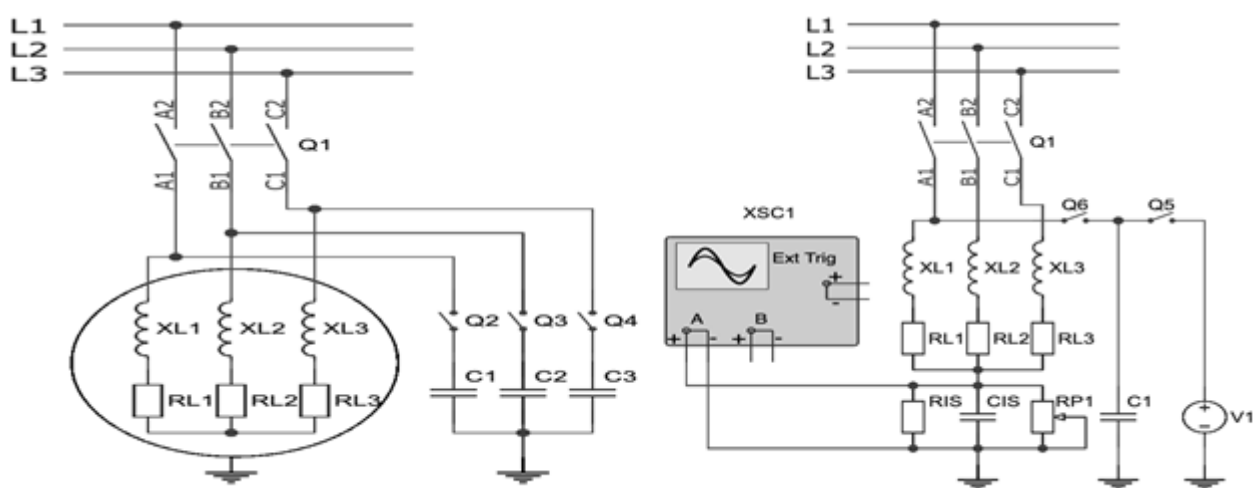


Рис. 1. Експериментальна установка дослідження зміни інформаційно-критеріальних параметрів для прогнозування зниження властивості ізоляції АД

На рис.2 наведені осцилограми перехідного процесу розряду конденсаторів при тестовій діагностиці корпусної ізоляції.

На рис.3 приведені осцилограми перехідного процесу розряду конденсаторів при контролі виникнення виткових замикань у статорних обмотках АД.

В основу принципу прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції АД при локальній компенсації реактивної потужності покладено зміну швидкості розряду конденсатора на опір корпусної ізоляції після кожного відключення АД від мережі живлення [1,2]. У процесі експлуатації АД термічні та механічні навантаження на ізоляцію приводять до втрат її діелектричної властивості.

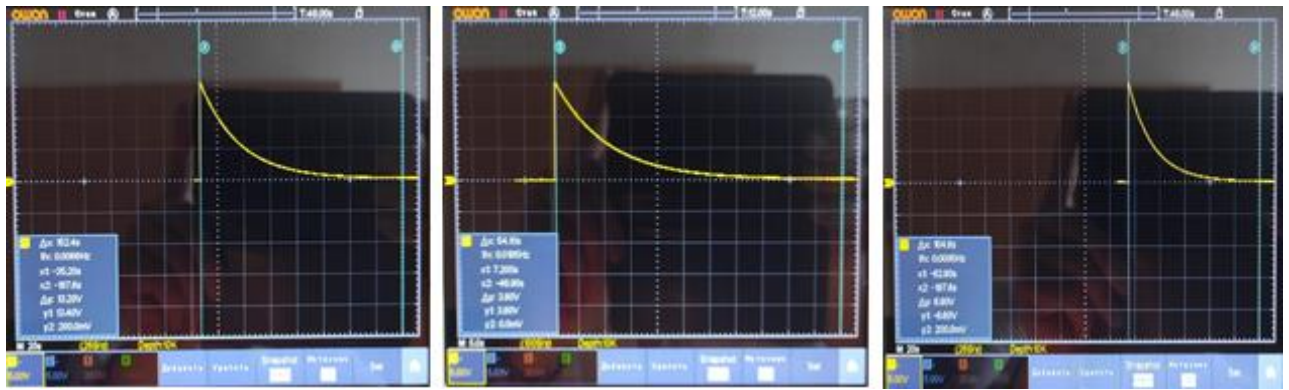


Рис. 2. Осцилограми перехідного процесу розряду конденсаторів при тестовій діагностиці корпусної ізоляції

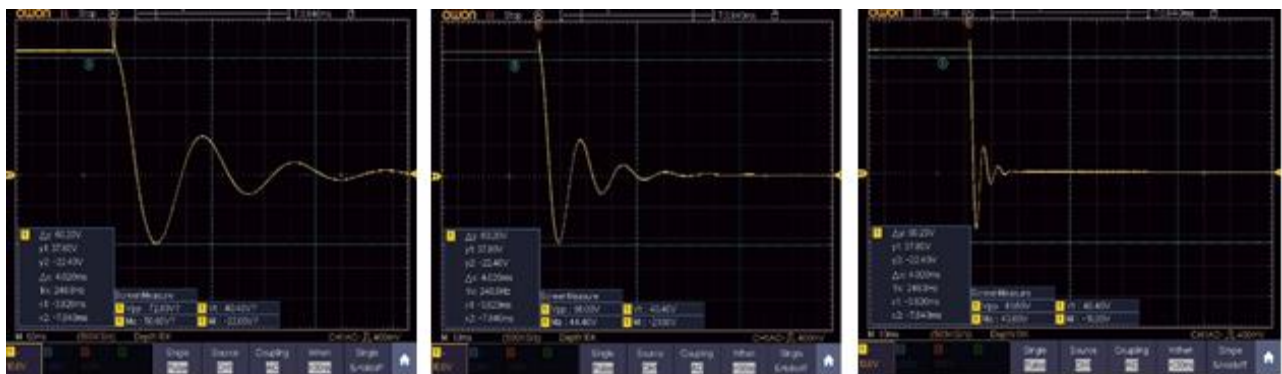


Рис. 3. Осцилограми перехідного процесу розряду конденсаторів при виявленні виткових замикань у статорних обмотках АД

Для вирішення цієї задачі розроблено спосіб [3,4], пристрій та програмне забезпечення, яке дозволяє діагностувати та прогнозувати стан ізоляції.

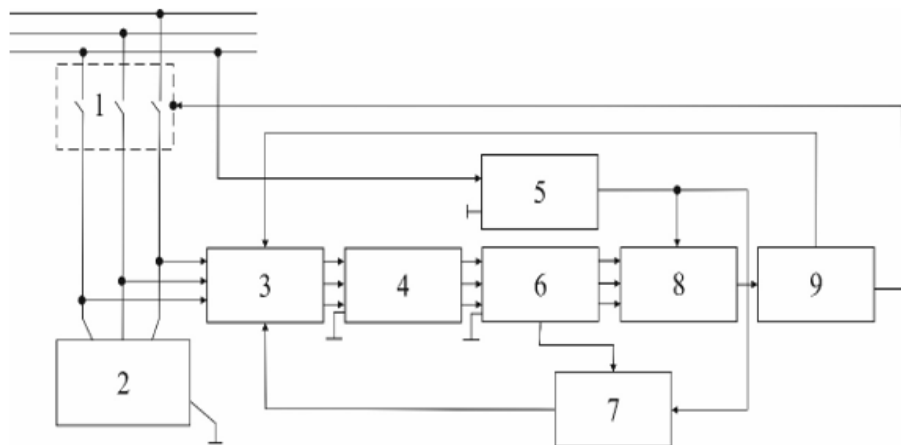


Рис. 4. Пристрій контролю та прогнозування стану ізоляції статорних обмоток АД

На рис.4 наведена блок-схема пристрою контролю та прогнозування стану ізоляції і захисту електроустаткування, де позначено: комутаційний апарат 1, електроустаткування 2, блок комутації конденсаторів 3, блок конденсаторів 4, блок живлення 5, блок високоомних подільників 6, блок виділення найбільшої позитивної напруги 7, мікропроцесор 8, блок управління 9. Технологічний цикл роботи електроустаткування настає при натисканні кнопки «Пуск» блоку управління 9. Сигнали надходять в операційні ланцюги комутаційного апарату 1 і блоку комутації конденсаторів 3. Електроустаткування підключається до мережі, а блок конденсаторів підключається паралельно електроустаткуванню для компенсації реактивної потужності. На клеммах конденсаторів (блок конденсаторів 4) з'являється напруга. Під дією цієї напруги блок високоомних подільників 6 формує сигнали, що надходить на входи мікроконтролера 8. Програмне забезпечення мікропроцесора 8 дозволяє вимірювати миттєві значення напруги на кожному з конденсаторів і провести обчислення діючих значень прямої і зворотної послідовностей напруги, розрахувати коефіцієнт несиметрії напруги. За отриманими значеннями виявляють мінімальний спад напруги, одно-, двофазні замикання в мережі на землю з точною вказівкою фази, а також міжфазні короткі замикання і обрив фази. Отримані результати обчислення порівнюються з заданими значеннями. Результати порівнянь приводять до формування сигналу на виході мікропроцесора 8, цей сигнал поступає в блок управління 9. При виявленні аварійного режиму в мережі живлення блок управління 9 включає сигналізацію про аварійний режим, а сигнал на відключення електроустаткування в першу чергу проступає в блок комутації конденсаторів 3, які в першу чергу відключаються від мережі блоку конденсаторів 4, в другу чергу вимикають електроустаткування. На клеммах кожного конденсатора залишається напруга, значення і знак якої визначається вектором миттєвого значення напруги мережі на момент відключення конденсаторів від мережі. У другу чергу сигнал з блоку управління 9 надходить в операційні ланцюги комутаційного апарату 1, здійснюються відключення електроустаткування 2 від мережі. Залишкова напруга на клеммах конденсаторів надходить через блок високоомних подільників 6 на блок виявлення найбільшої напруги 7. У блоці 7 встановлюється, на якому з

конденсаторів найбільша напруга. Після відключення електроустаткування 2 комутаційним апаратом 1 і виявлення конденсатора з найбільшою напругою однополюсний пускач підключає цей конденсатор до фази електроустаткування. У разі виявлення двох однакових за величиною і полярністю напруг на клеммах конденсаторів вибирається один з конденсаторів, який підключається до клемми «фаза + корпус» електродвигуна. Відбувається розряд конденсатора через елементи електроустаткування і опору ізоляції.

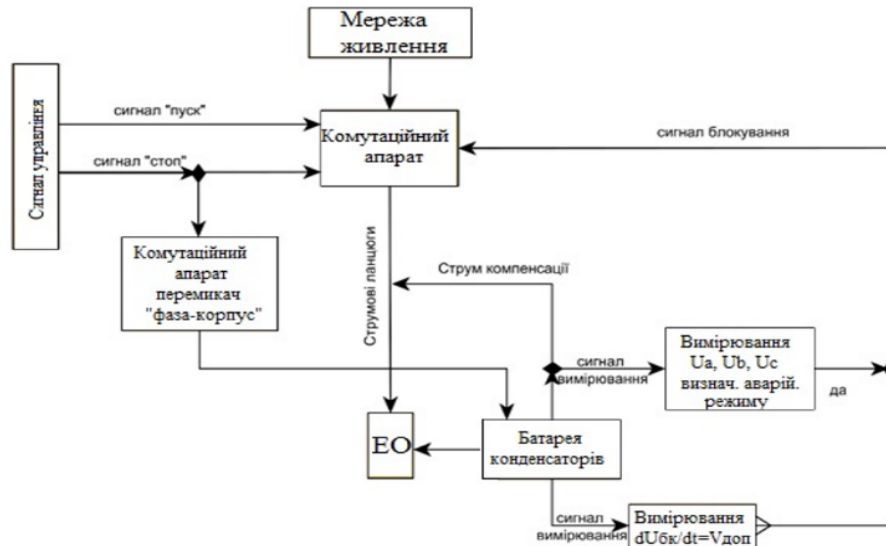


Рис. 5. Логічна схема проходження інформаційних сигналів

На рис.5 представлено логічну схему проходження сигналів. Програма реалізує роботу пристрою так. Електродвигун підключають до мережі живлення і при цьому фіксують час включення $t_{\text{вмі}}$. Паралельно електродвигуну до кожної фази підключають блок конденсаторів. Визначають рівень лінійних напруг. Якщо виявлено неповнофазний режим мережі, електродвигун блокують від підключення, визначають реактивну складову струму, підключають потрібну ступінь компенсації реактивної напруги. Перевірка лінійних напруг здійснюється з інтервалом Δt_1 протягом періоду роботи.

За формулою $\tau_{\text{кр}} = C1 \cdot RIS_{\text{кр}}$, де $C1$ - ємність фазного конденсатора (на прикладі фази А), $RIS_{\text{кр}} = 0,5 \text{ МОм}$ - критичне значення опору ізоляції обмотки електродвигуна, визначають критичне значення сталої часу розряду батареї конденсаторів - $\tau_{\text{кр}}$.

Після першого відключення електродвигуна від мережі та підключення до клем «фаза» та «корпус» електродвигуна фазного конденсатора розраховують початкову постійну часу розряду фазного конденсатора за виразом: $\tau_{\text{пер}} = \frac{t_{\text{раз1}}}{5}$, де $t_{\text{раз1}}$ - час розряду фазного конденсатора після першого відключення електродвигуна від мережі та підключення фазного конденсатора до клем «фаза» та «корпус» електродвигуна. Для виконання технологічного процесу електродвигун знову підключають до мережі живлення. Фіксують час підключення та відключення електродвигуна. Визначають час роботи електродвигуна за другий період підключення до мережі як $\Delta t_2 = t_{\text{вм2}} - t_{\text{вимк2}}$.

За час роботи електродвигуна діелектрична властивість ізоляції втрачається, що приводить до зниження опору ізоляції і сталої часу розряду фазного конденсатора. Визначають постійну часу розряду фазного конденсатора $\tau_2 = \frac{t_{\text{роз2}}}{5}$, де $t_{\text{роз2}}$ - час розряду фазного конденсатора у другого підключенні фазного конденсатора до клем «фаза» та «корпус» електродвигуна. Розраховують швидкість зміни сталої часу за другий період роботи електродвигуна за виразом $V_{\text{роз2}} = \frac{\tau_{\text{пер}} - \tau_2}{\Delta t_2}$, визначають остаточний термін експлуатації електродвигуна до критичного значення опору ізоляції за виразом: $t_{\text{ост.крит}} = \frac{\tau_2 - \tau_{\text{кр}}}{V_{\text{раз1}}}$. При подальших підключеннях електродвигуна до мережі живлення та його відключень фіксують час роботи електродвигуна за кожний період як $\Delta t_i = t_{\text{вкi}} - t_{\text{вимкi}}$, розраховують постійну часу розряду фазного конденсатора у поточному періоді за виразом $\tau_i = \frac{t_{\text{розi}}}{5}$ та швидкість зміни сталої часу за поточні періоди роботи електродвигуна за виразом $V_{\text{разi}} = \frac{\tau_{\text{пер}} - \tau_i}{\sum_i^n \Delta t_i}$, де τ_i - сталі часу розряду фазного конденсатора за поточний період, n - кількість періодів роботи електродвигуна, і коригують залишковий час експлуатації електродвигуна як: $t_{\text{ост.кор}} = \frac{\tau_i - \tau_{\text{кр}}}{V_{\text{розi}}}$, визначають остаточний ресурс експлуатації електродвигуна у відсотках так: $F_{\text{остат}} = (1 - \frac{\tau_{\text{пер}} - \tau_{\text{кр}}}{\tau_{\text{пер}} - \tau_i}) \cdot 100\%$.

Результати досліджень та їх обговорення. Існуючі методи [5, 6, 7] контролю стану корпусної ізоляції потребують додаткового обладнання, енергетичного

ресурсу та здійснюють моніторинг стану ізоляції при виведенні АД з технологічного обладнання, що потребує час та обслуговуючого персонал.

Запропонований принцип контролю та прогнозування залишкового ресурсу ізоляції дозволяти моніторити стан ізоляції після кожного відключення АД від мережі живлення, причому використовується енергія, яка залишається в конденсаторах. Застосування зміни швидкісної характеристики сталої часу розряду конденсатора дозволило прогнозувати залишковий термін експлуатації АД.

Висновки і перспективи.

1.В умовах локальної компенсації реактивної потужності можливо використовувати енергію, яка залишається в конденсаторах, для діагностики та прогнозування стану ізоляції.

2.Зміна швидкісної характеристики сталої часу розряду конденсатора є критеріальним параметром для прогнозування залишкового терміну експлуатації АД.

Проведені дослідження підтвердили розвиток тестової діагностики в умовах компенсації реактивної напруги, що є новим напрямком у системах неруйнівної діагностики, який потребує продовження досліджень та застосування в промисловості.

Список використаних джерел

1. Кривоносов В. Е. Диагностика состояния изоляции асинхронного двигателя и питающего кабеля в условиях локальной компенсации. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ: Международный научно-техн. журнал. Минск: БНТУ, 2017. Вып. № 6. Т. 60. С. 536-543.

2. Kryvonosov, V., Matviienko, A. Studies of the Change in the Time Constants of the Discharge of the Capacitor to Predict the Residual life of the Operation of the Electric Motor. Problems of the Regional Energetics., 2023, 3(59), с. 147–159.

3. Патент № 98353 С2 Україна, МПК H02K15\12(2006.01), Кривоносов В.Є. Спосіб контролю зміни опору ізоляції електродвигуна й живильного кабелю. Опубл.10.05.2012, Бюл. № 9. 4 с.

4. Авторське свідоцтво № 122459 від 28.12.2023р. на комп'ютерну програму «Прогнозування залишкового ресурсу ізоляції обмоток електродвигуна при локальної компенсації реактивної потужності» Кривоносов В. Є, Матвієнко А. М., та ін.

5. Tokarev O. V., Boryagin D. O., Sheremet O. T. Analysis of the causes of damage to asynchronous motors. Nausny Bulletin of the DSEA, No. 1 (25E), 2018, pp. 39-49.

6. Gubarevich O. V., Galway S. M. Analysis of diagnostic methods for the technical

condition of electric motor insulation; <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>.

7. Gerlici J, Goolak S., Gubarevych O., Kravchenko K., Kamchatna-Stepanova K., Toropov A. Method for Determining the Degree of Damage to the Stator Windings of an Induction Electric Motor with an Asymmetric Power System. *Symmetry* 2022, 14(7), 1305; <https://doi.org/10.3390/sym14071305>.

References

1. Kryvonosov, V. E. (2017). Dyagnostyka sostoianiya yzoliatsyy asynkhronnoho dvyhatelia y pytaiushcheho kabelia v uslovyakh lokalnoi kompensatsyy [Diagnostics of the insulation state of an asynchronous motor and supply cable under conditions of local compensation]. *Enerhetyka. Yzvestyia visshykh uchebnikh zavedenyi y enerhetycheskykh ob'edynenyi SNH: Mezhdunarodnyi nauchno-tekhn. zhurnal*. Mynsk: BNTU, 60 (6), 536-543.

2. Kryvonosov, V., Matviienko, A. (2023). Studies of the Change in the Time Constants of the Discharge of the Capacitor to Predict the Residual life of the Operation of the Electric Motor. *Problems of the Regional Energetics.*, 3(59), –159.

3. Patent № 98353 S2 Ukraine, MPK N02K15\12(2006.01), Kryvonosov V.Ye. Sposib kontroliu zminy oporu izoliatsii elektrodvyhuna y zhyvylnoho kabeliu [Method for monitoring the change of insulation support of an electric motor and a housing cable]. Opubl.10.05.2012, Biul. № 9, 4.

4. Kryvonosov, V. Y, Matviienko, A. M. Avtorske svidotstvo № 122459 vid 28.12.2023r. na komp'uternu prohramu «Prohnozuvannia zalyshkovoho resursu izoliatsii obmotok elektrodvyhuna pry lokalnoi kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti» [Prediction of excess insulation life of electric motor windings with local compensation of reactive force].

5. Tokarev, O. V., Boryagin D. O., Sheremet, O.T. (2018). Analysis of the causes of damage to asynchronous motors. *Nausny Bulletin of the DSEA*, 1 (25E), 39-49.

6. Gubarevich, O. V., Galway, S. M. Analysis of diagnostic methods for the technical condition of electric motor insulation <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>.

7. Gerlici, J, Goolak, S., Gubarevych, O., Kravchenko, K., Kamchatna-Stepanova, K., Toropov, A. (2022). Method for Determining the Degree of Damage to the Stator Windings of an Induction Electric Motor with an Asymmetric Power System. *Symmetry* 14(7), 1305; <https://doi.org/10.3390/sym14071305>.

Principle of predicting the reduction of insulation properties of electric motor windings

A. Matviienko, V. Krivonosov, N. Prudnikova, M. Sirenko

Abstract. *The simplicity of the design of the asynchronous electric motors (AM) allows them to be widely used in industry. The AM fleet sometimes reaches 80% of the total load of the enterprise. According to statistics, more than 60% of AM failures are observed due to damage to the insulation of the AM stator winding. The reason is premature dynamic and thermal aging of the insulation, which leads to the failure of the conductive and grooved parts of the AM winding. As a result of a decrease in the dielectric properties of the insulation, damage occurs in the stator windings of AM, such*

as turn, phase-to-phase short circuits, which tend to develop into a short circuit. Short circuits in the stator windings of the AM are emergency and lead to a sudden disconnection of the AM from the power supply network by existing relay protection means, for example, current cut-off or thermal protection. Sudden, non-sanctioned disconnection of the electric motor from the power supply leads to the shutdown of technological equipment, damage to equipment, raw materials and economic losses. The aim of the work is to develop the principles of timely monitoring and prediction of the state of housing and interphase insulation of stator windings of AM using the energy of capacitors with local compensation of reactive power. To achieve this goal, research was carried out at a laboratory institution with AM, in which branches of turns were made. The transient processes of capacitor discharge are considered and new methods for monitoring and predicting the residual insulation life are proposed. The new method is based on monitoring the condition of the insulation after each disconnection of the AM from the power supply, while using the energy that remains in the capacitors. The use of a change in the velocity characteristic of the constant discharge time of the capacitor made it possible to predict the residual service life of the AM. The personality of the study is that under the conditions of local compensation of reactive power, it is possible to use the energy remaining in the capacitors to diagnose and predict the state of insulation, as well as the change in the velocity characteristic of the capacitor discharge time constant, which is a criterion parameter for predicting the residual service life of the AM. The carried out studies confirmed the development of test diagnostics in conditions of reactive voltage compensation, which is a new direction in systems non-poisonous diagnostics, which requires continued research and applications in industry.

Key words: *insulation of motor windings, local reactive power compensation, forecasting, control, non-destructive diagnostics*