

УДК 621.313.34

Ю.О. Ясинський, А.О. Немчинов, О.М. Нікішин

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ ЯКОСТІ СПОЖИВАЄМОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

За умовами технології виробництва вузли електрообладнання, як і інших технічних пристроїв, виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному і структурному складу матеріалів. На інтенсивність зносу ізоляції електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Знос і старіння – це процеси, які характеризують зміну технічного стану електрообладнання у часі. Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання. Для орієнтовного порівняння технічного стану ізоляції електрообладнання, що діагностується і характеризується різними діагностичними параметрами, можна користуватися поняттям коефіцієнту технічного ресурсу. Виділені основні шляхи отримання результатів прогнозу, які об'єднують групи методів прогнозування і застосовуються на практиці.

Ключові слова: ізоляція електрообладнання, прогнозування технічного стану, розрахунки.

Вступ

Постановка задачі. За умовами технології виробництва ізоляційні конструкції електрообладнання виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному і структурному складу матеріалів ізоляції. Це впливає на інтенсивність зносу або старіння ізоляції електрообладнання. Крім того, на інтенсивність зносу ізоляції електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування і ремонти проводять нерегулярно або взагалі не проводять, швидкість зносу ізоляції вузлів значно збільшується і зноси швидко досягають своїх граничних значень. Тому всі переховані вище фактори впливають на достовірність прогнозування роботи електрообладнання.

Слід відзначити, що розроблені до теперішнього часу методи прогнозування не дають можливості передбачати раптові відмови, тобто відмови, які характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану ізоляції електрообладнання до межового значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, які характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану і обумовлені зносом або старінням матеріалу ізоляції електрообладнання.

Вплив багатьох різних факторів призводить до прискорення або уповільнення процесів зносу та старіння ізоляції у часі, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зносу та старіння ізоляції в основному містять детерміновану і випадкову складові. Вплив кожної з цих складових для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відображається на характері процесу зносу.

Основним завданням прогнозування є визна-

чення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання, що дає можливість скоротити трудомісткість і вартість робіт, які виконуються при поточних ремонтах, встановлених лише за необхідністю; встановити терміни (періодичність) проведення діагностування.

Аналіз літератури. У [1 – 7] описані методи, які найбільше пристосовані для прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання. При цьому в відомих публікаціях не враховується дія якості електроенергії на інтенсивність зносу ізоляції.

Визначення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання дозволяє об'єктивно визначити момент необхідності ремонтного впливу, який відповідає найповнішому використанню її ресурсу. При цьому можна користуватися поняттям коефіцієнту технічного ресурсу [1 – 3]. За допомогою цього коефіцієнта оцінюють залишковий ресурс ізоляції електрообладнання. Для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються в процесі експлуатації електрообладнання, коефіцієнт технічного ресурсу підраховується за формулою:

$$k_{\text{зал}} = (P_{\text{н}} - P_{\text{н}}) / (P_{\text{н}} - P_{\text{н}}), \quad (1)$$

де $P_{\text{н}}$ – граничне значення параметра; $P_{\text{н}}$ – номінальне значення параметра; $P_{\text{н}}$ – виміряне значення параметра.

Якщо у процесі експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу визначається виразом:

$$k_{\text{зал}} = (P_{\text{н}} - P_{\text{н}}) / (P_{\text{н}} - P_{\text{н}}). \quad (2)$$

Для нової ізоляції електрообладнання $k_{\text{зал}} = 1$, а для тої, що повністю вичерпала свій ресурс $k_{\text{зал}} = 0$. Згідно з аналізом даних з [1 – 7], доцільно виділити три методи прогнозування: аналітичного прогнозування, імовірнісного прогнозування та статистичної класифікації, які повністю охоплюють означені ви-

ще підходи щодо прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання.

Метод аналітичного прогнозування доцільно використовувати для завдань, коли зміна параметра, який контролюється, інерційна у часі і всі зміни поступово накопичуються. Таку зміну параметру Π , який контролюється, можна представити функцією $\Pi(t)$, як це зображено на рис. 4 в [3]. При цьому є дані вимірювань значень функцій $\Pi(t_0)$, $\Pi(t_1)$ і $\Pi(t_2)$ відповідно в моменти часу t_0 , t_1 і t_2 . Завданням прогнозування є визначення за відомими значеннями функції $\Pi(t)$ у минулому і у теперішньому часі величини функції у майбутньому, тобто в моменти часу t_i , а також визначення моменту часу, коли параметр досягне свого припустимого значення Π_d .

Метод імовірнісного прогнозування застосовують для завдань, де необхідно визначити ймовірність виходу або невиходу діагностичного параметру Π , який діагностується, за встановлені межі. Задача формулюється наступним чином. Є значення параметра Π у моменти часу t_0 , t_1 , t_2 , у яких стани елемента, який прогнозується, характеризуються функціями розподілу $F_i(\Pi)$ ([3, рис.3]). За цими відомими значеннями необхідно визначити ймовірність збереження ізоляції працездатності у майбутньому, тобто що функція $\Pi(t)$ не вийде за своє припустиме значення Π_d .

При вирішенні завдань прогнозування методами статистичної класифікації відомі значення параметру в певні моменти часу відносять до одного із класів, тобто до свого роду еталону, а потім, виходячи із закономірності зміни параметрів даного класу, вирішують, як буде змінюватися даний параметр у майбутньому. При цьому поділ значень параметрів на класи може бути тимчасовим (за часом або напрацюванням) або параметричним (за величинами параметрів, які контролюються). Число і діапазон зміни параметрів у кожному класі залежить від особливостей конструкції та умов роботи елемента електрообладнання, який діагностується. На рис. 4 в [1] показано приклад розмежування значень параметрів, які вимірюються, на класи.

Метою роботи є підвищення надійності роботи ізоляції електрообладнання шляхом врахування дії якості електроенергії, що споживається електрообладнанням, на зниження реального строку служби ізоляції.

Основний матеріал

Нижче наведений опис найпростіших методів прогнозування, які достатньо легко пристосовувати для прогнозування ресурсу роботи електрообладнання і не вимагають використання складного математичного апарату.

Метод лінійного прогнозування. В його основу покладено припущення, що у процесі експлуата-

ції зовнішні впливи на ізоляцію електрообладнання, яка діагностується, є незмінними, а залежність зміни величини діагностичного параметру від часу – лінійна. Для застосування методу необхідно мати дані про напрацювання об'єкта з початку експлуатації до моменту діагностування, а також про межове і номінальне значення параметра.

Напрацювання об'єкта діагностування до настання граничного стану $t_{\text{ост}}$ визначають за формулою

$$t_{\text{ост}} = t \frac{k_{\text{ост}}}{1 - k_{\text{ост}}}, \quad (3)$$

де t – напрацювання від початку експлуатації до моменту діагностування, год.; $k_{\text{ост}}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу, який визначається із формул (1) або (2).

Метод доцільно використовувати для орієнтовного визначення залишкового ресурсу вузлів електрообладнання (в першу чергу електричних машин).

Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування. Метод базується на даних вимірювань, які проводяться при систематичних діагностуваннях через будь-які проміжки часу [2 – 6]. Визначення терміну безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання, яка діагностується, за цим методом проводиться до наступного діагностування. Метод багатоступеневого лінійного прогнозування враховує дійсну закономірність зношування або старіння об'єкта діагностування у даних конкретних умовах експлуатації. Крім того, при прогнозуванні на період до наступного діагностування приймається, що об'єкт діагностування буде працювати у більш несприятливих умовах, у зв'язку з чим ресурс безвідмовної роботи визначається за максимально можливою середньою інтенсивністю зміни параметра за період між двома останніми діагностуваннями. Після наступного діагностування знову встановлюють гарантований ресурс безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання. Діагностування проводять таким чином до повного вичерпання ресурсу об'єкта.

Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування не потребує даних про напрацювання і зміну величини параметрів з початку експлуатації електричної машини або апарату. В результаті лінійної апроксимації і екстраполяції зміни параметрів на деякий проміжок часу отримують величину періоду безвідмовної роботи завжди меншу дійсного, тобто завжди резервується певний запас надійності результатів прогнозу.

Гарантований ресурс безвідмовної роботи деталей, вузлів і сполучень, технічний стан яких характеризується параметрами, що мають лінійні або криволінійні залежності від часу роботи, визначається із виразу:

$$t_{\text{гар}} = (\Pi_n - \Pi_n) / (\Pi_n - \Pi_{n-1}) t_0 k_0, \quad (4)$$

де $t_{\text{гар}}$ – гарантований ресурс безвідмовної роботи,

Π_n – межеве значення параметра; Π_n, Π_{n-1} – виміряна величина параметра відповідно при даному і попередньому діагностуванні; t_0 – період між даними і попередніми діагностуваннями, од. напрацювання; k_0 – коригувальний коефіцієнт.

На рис. 4 в [6] показаний приклад багатоступінчатого лінійного прогнозування зміни параметра технічного стану асинхронного електродвигуна. Якщо діагностування проводилося у моменти часу t_1, t_2, t_3 і при цьому отримані значення параметра відповідно Π_1, Π_2, Π_3 , то середня інтенсивність зміни параметру за відрізок часу між 1-м і 2-м, 2-м і 3-м діагностуваннями складе:

$$t_{cp1-2} = (\Pi_2 - \Pi_1) / (t_2 - t_1); \quad (5)$$

$$t_{cp2-3} = (\Pi_3 - \Pi_2) / (t_3 - t_2). \quad (6)$$

Таким чином, після кожного діагностування коректують результат прогнозування з урахуванням середньої інтенсивності зміни параметру за час між останнім і попереднім діагностуваннями. При цьому припускається, що за період часу, який прогнозується, до наступного діагностування інтенсивність зміни параметра не може перевищити інтенсивність, яка була у попередньому періоді. У іншому випадку закономірність зміни параметра повинна змінитися, тобто спадна інтенсивність повинна змінитися на зростаючу.

На рис. 4 з [6] видно, що після 2-го діагностування гарантований ресурс безвідмовної роботи склав $t_{rap2} = t'_2 - t_2$, а після 3-го діагностування – $t_{rap3} = t'_3 - t_3$. Коригувальний коефіцієнт k_0 введений у вираз (4) у зв'язку з тим, що діагностичні параметри ізоляції електрообладнання можуть змінюватися і з спадною, і з зростаючою інтенсивністю. При спадній інтенсивності зміни діагностичного параметру під час прогнозування коригування проводиться автоматично у бік зменшення гарантованого ресурсу безвідмовної роботи. У такому випадку значення коригувального коефіцієнта дорівнює одиниці.

Якщо діагностичний параметр змінюється за зростаючою криволінійною залежністю зі зростаючою інтенсивністю, то коригувальний коефіцієнт визначається як відношення значень параметра при попередньому і даному діагностуванні, тобто:

$$k_0 = \Pi_{n-1} / \Pi_n. \quad (7)$$

У випадках зменшення параметра при роботі об'єкта діагностування зі зростаючою інтенсивністю, коригуючий коефіцієнт визначають за формулою:

$$k_0 = (\Pi_{поч} + \Pi_n - \Pi_{n-1}) / \Pi_{поч}, \quad (8)$$

де $\Pi_{поч}$ – початкове значення параметру.

Таким чином, для підвищення достовірності даних при прогнозуванні ресурсу ізоляції електрообладнання за допомогою багатоступінчатого лінійного методу прогнозування необхідно попередньо знати загальну закономірність зміни діагностичних параметрів. Якщо загальна закономірність параметрів

рів невідома, то розрахунок гарантованого ресурсу безвідмовної роботи проводиться з урахуванням коригувального коефіцієнта, обчисленого за формулою, яка відповідає закономірності зі зростаючою інтенсивністю зміни параметра. При цьому гарантований ресурс роботи до наступного діагностування буде скоригований у бік зменшення.

Визначення строку служби ізоляції. Найважливішим показником, що використовуються при експлуатації, діагностуванні й прогнозуванні працездатності ізоляції є строк її служби. Особлива увага з боку дослідників [1 – 7] була приділена встановленню залежності терміну служби ізоляції T від температури, при якій вона працює:

$$\ln T = (E_a / R \cdot Q) - G, \quad (9)$$

де Q – температура нагрівання ізоляції; T – термін служби ізоляції, років; E_a – енергія активації; R – універсальна газова постійна; G – розрахункова величина для заданого типу ізоляції.

З рівняння (9) видно, що логарифм терміну служби ізоляції має лінійну залежність від температури. Вираження (9) встановлено на підставі великого обсягу експериментального матеріалу, але в ньому не враховується дія якості електроенергії.

Як показує аналіз, якість електроенергії впливає на нагрів струмоведучих частин і ізоляції електрообладнання, тому результати розрахунків по вираженню (9) будуть завжди надмірно завищеними.

Зниження якості електроенергії в порівнянні з діючими нормативами на станції є причиною появи в струмоведучих частинах і ізоляції електрообладнання додаткових втрат активної потужності ΔP_a , які є джерелом додаткового нагрівання ізоляції (додаткові втрати ΔP_a в асинхронних і синхронних електродвигунах і трансформаторах мають місце в обмотках, а в кабельних лініях – в ізоляції). Тому реальний строк служби ізоляції електрообладнання буде зменшеним на величину $\Delta T_{о.с.}$

Прийmemo, що процес нагрівання елементів електрообладнання від дії додаткових втрат ΔP_a має адиабатичний характер, тоді ці втрати ΔP_a внаслідок дії несиметрії й несінусоїдальності напруги можуть бути визначені у такий спосіб:

$$\Delta P_a = \left(k' \cdot \varepsilon_{U^*}^2 + k'' \sum_{v=2}^n \frac{U_{v^*}^2}{v \sqrt{v}} \right) \cdot P_{ном}, \quad (10)$$

де v – номер гармоніки напруги; ε_{U^*} – відносна величина коефіцієнта несиметрії; U_{v^*} – відносна значення напруги v -й гармоніки (стосовно напруги першої гармоніки U_1); k', k'' – коефіцієнти, що враховують збільшення додаткових втрат потужності від впливу відповідно несиметрії й несінусоїдальності напруги; $P_{ном}$ – номінальна потужність елект-

родвигуна (для трансформатора замість $P_{\text{ном}}$ підставляємо $S_{\text{ном}}$).

Використовуючи подання про нагрівання елементів електроустановки, розглянуті вище при визначенні додаткових втрат ΔP_a можна визначити додатковий відносний термін служби ізоляції $T_{\text{о.с.}}$:

$$T_{\text{о.с.}} = \exp \left[-d' \varepsilon_{U*}^2 + d'' \sum_{v=2}^n U_{v*}^2 v(v) \right], \quad (11)$$

де коефіцієнти d' , d'' ураховують відповідно додаткове нагрівання елементів електрообладнання від несиметрії й несінусоїдальності робочої напруги.

Як показує аналіз, якість електроенергії впливає на нагрів ізоляції електрообладнання і додатково скорочує термін її служби.

Висновки

1. Прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання, тобто процес завбачення зміни параметрів у майбутньому, є порівняно складним технічним завданням. Це пов'язане з тим, що на технічний стан навіть однотипних вузлів електрообладнання впливає поєднання великої кількості факторів, частину з яких важко врахувати.

2. Визначення залишкового ресурсу електрообладнання дозволяє об'єктивно визначити момент необхідності ремонтного впливу, який відповідає найповнішому використанню ресурсу вузлів електрообладнання.

3. Для орієнтовного порівняння технічного стану елементів машини або апарату, які діагностуються і характеризуються різними діагностичними параметрами, можна користуватися поняттям коефіцієнту технічного ресурсу.

4. Найважливішим показником, використовуваним при експлуатації, діагностуванні й прогнозуванні працездатності ізоляції є строк її служби.

Особлива увага з боку дослідників була приділена встановленню залежності терміну служби ізоляції від температури, при якій вона працює.

5. Як показує аналіз, якість електроенергії впливає на нагрів ізоляції електрообладнання і додатково скорочує термін її служби тому, вираження (9) досить спрощене.

Список літератури

1. Михлин В.М. Методические указания по прогнозированию технического состояния машин / В.М. Михлин. – М.: Колос, 1972. – 216 с.
2. Сельцер А.А. Таблицы оптимального допустимого отклонения параметров технического состояния, остаточного ресурса составных частей машин и методики обработки исходных данных / А.А. Сельцер. – М.: ГОСНИТИ, 1978. – 115 с.
3. Михлин В.М. Указания по определению остаточного ресурса элементов машин / В.М. Михлин. – М.: ГОСНИТИ, 1974. – 73 с.
4. Мозгалецкий А.В. Техническая диагностика / А.В. Мозгалецкий. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.
5. Скибиевский К.Ю. Методические указания по диагностированию машин / К.Ю. Скибиевский. – М.: ГОСНИТИ, 1976. – 118 с.
6. Таран В.П. Техническая диагностика при эксплуатации электрооборудования / В.П. Таран. – К.: Урожай, 1978. – 152 с.
7. Евлантьев В.А. Прогнозирование работоспособности обмоток погруженных электродвигателей в процессе эксплуатации / В.А. Евлантьев // Промышленная энергетика. – 1978. – № 2. – С. 19-20.

Надійшла до редколегії 3.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Г. Гриб, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ

Ю.А. Ясинский, А.А. Немчинов, А.М. Никишин

Основной задачей прогнозирования является определения остаточного ресурса изоляции электрооборудования. Для ориентировочного сравнения технического состояния изоляции электрооборудования, которая диагностируется и характеризуется разными диагностическими параметрами, можно пользоваться понятием коэффициента технического ресурса. Определены основные пути получения результатов прогноза, которые объединяют группы методов прогнозирования и могут быть применены на практике.

Ключевые слова: изоляция электрооборудования, прогнозирование технического состояния, расчеты.

PROGNOSTICATION OF THE TECHNICAL STATE OF ISOLATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT TAKING INTO ACCOUNT QUALITY CONSUMED

Yu.A. Yasinskiy, A.A. Nemchinov, A.M. Nikishin

The basic task of prognostication is determinations of remaining resource of isolation of electrical equipment. For reference comparison of the technical state of isolation of electrical equipment, which is diagnosed and characterized by different diagnostic parameters, it is possible to use the concept of coefficient of technical resource. The basic paths of receipt of results of prognosis, which unite the groups of methods of prognostication and can be applied in practice, are certain.

Keywords: isolation of electrical equipment, prognostication of the technical state, calculations.