

УДК 621.313.019.3

Ю.О. Ясинський, П.В. Васюченко, О.Ю. Васюченко

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛІЗ І РОЗРАХУНКИ НАДІЙНОСТІ ЗАНУРЕНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВОДЯНИХ ШПАР

Проаналізована конструкція занурених асинхронних електродвигунів, що істотно відрізняється від конструкцій загальнопромислових типів АД. Проаналізовані результати проведених у лабораторних і виробничих умовах досліджень властивостей і механізму виходу з порядку ізоляції обмоток занурених АД. Встановлено, що з параметрів, які вимірялися при проведенні цих досліджень (опір ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ , ємність, залежність струмів витоку  $I_y$  від прикладеної напруги, поріг іонізації, а також залежності перерахованих вище параметрів від температури) для подальшого аналізу їх як параметрів діагностики ізоляції обмоток занурених АД доцільно вибрати такі: залежність струмів витоку  $I_y$  і тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  від напруги й часу наробітку занурених АД. Запропонована методика оцінки надійності занурених АД в експлуатації з урахуванням дії на обмотки внутрішніх перенапруг.

**Ключові слова:** занурений асинхронний електродвигун, обмотка статора, надійність, аналіз, розрахунок.

### Вступ

**Постановка проблеми і аналіз літератури.** Є загально визнаним, що в період нормальної експлуатації асинхронних електродвигунів (скорочено АД) мають місце тільки їх раптові відмови [1 – 4].

Слід відмітити, що конструкція обмотки статора занурених АД суттєво відрізняється від конструкцій обмотки статора АД усіх інших типів.

У занурених АД обмотку статора намотують проводом ПЭВВП, що має двошарову ізоляцію. Нижній шар ізоляції завтовшки 0,05 мм виготовляють із емальлака «вініфлекс», а верхній зовнішній шар завтовшки 0,4-0,8 мм – з полівінілхлоридного пластикату ПХВ-489.

Ізоляція з полівінілхлоридного пластикату відрізняється від ізоляції обмоток АД єдиних серій як по своєму складу, так і за умовами роботи.

В [1] описані проведені в лабораторних і виробничих умовах дослідження властивостей і механізму виходу з ладу ізоляції обмоток занурених АД.

В процесі випробувань протягом 21 тисячі годин через кожні 2 тисячі годин роботи макетів вимірялися опір ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ , ємність, залежність струмів витоку  $I_y$  від прикладеної напруги, а також визначалися залежності перерахованих вище параметрів від температури. Крім того, вимірялася напруга початку іонізації ізоляції (поріг іонізації).

Дослідження в умовах експлуатації проводилися на занурених АД, встановлених у водопідйомних шпарах.

**Метою роботи** є проведення аналізу параметрів ізоляції статорної обмотки занурених АД і обґрунтування їх параметрів діагностики, розробка методики оцінки надійності занурених АД в експлуатації.

### Основний матеріал

Аналіз отриманих в [1] результатів показав, що параметрами, які характеризують технічний стан ізоляції занурених АД, є струми витоку  $I_y$  і тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ . Встановлені залежності струмів витоку  $I_y$  ізоляції обмоток занурених АД від наробітку свідчать, що ці струми перед уведенням АД в експлуатацію мають невелике значення і перебувають у межах від 1,5 до 6 мкА.

На основі аналізу струми витоку  $I_y$  ізоляції обмоток занурених АД можна розділити по характеру зміни на такі три групи: 1 – стабільно зменшуються; 2 – зменшуються на незначну величину біля своїх середніх значень; 3 – збільшуються із значною інтенсивністю.

Доцільно технічний стан ізоляції занурених АД розділити також на три групи (класи), причому кожна група має відповідний гарантований строк безвідмовної роботи.

З певним припущенням можна вважати, що середні значення струмів витоку  $I_y$  кожної групи стану ізоляції мають лінійну залежність від кількості годин роботи занурених АД. Для першої групи ця залежність описується формулою (1), для другої – формулою (2), для третьої – формулою (3):

$$I_{y1} = 7,194 - 0,021t, \quad (1)$$

$$I_{y2} = 9,957 - 0,168t, \quad (2)$$

$$I_{y3} = 7,194 - 12,65t, \quad (3)$$

де  $I_{y1}$ ,  $I_{y2}$ ,  $I_{y3}$  – струми витоку для відповідних груп, мкА;  $t$  – наробіток заглибного АД, тис. годин.

Для уточнення висновку про стан ізоляції в деяких випадках також доцільно визначати, крім залежностей струмів витоку  $I_y$  від часу наробітку АД, залежності струмів витоку  $I_y$  від напруги.

У зв'язку з тим, що обмотки занурених АД оточені водою, що заповнює їхню внутрішню порож-

нину для охолодження, на відміну від АД загальнопромислового виготовлення, струми витоку  $I_y$  ізоляції обмоток занурених АД можуть проходити тільки через товщу ізоляції, тобто струми по поверхні ізоляції в їх обмотках відсутні.

Якщо в ізоляції обмоток занурених АД немає місцевих дефектів, то значення струмів витоку  $I_y$  обумовлені об'ємною провідністю ізоляції й крива залежності струмів витоку  $I_y$  від прикладеної напруги не повинна значно відрізнятися від лінійної. При наявності в ізоляції місцевих дефектів при певних напругах, що відповідають величині й характеру дефектів в ізоляції (мікроскопічні тріщини, сторонні включення в пластикаті, шпилькові отвори й ін.), крива залежності струмів витоку  $I_y$  від напруги має характерний перегин, а далі йде збільшення струмів витоку  $I_y$  через дефект в ізоляції.

Ізоляцію обмоток занурених АД по характеру залежності струмів витоку  $I_y$  від напруги можна розділити на дві групи. Одна група має невелике збільшення струмів витоку  $I_y$  при підвищенні напруги і при 3000 В струми витоку  $I_y$  не перевищують 25 мкА, а для другої групи характерним є різке збільшення струмів витоку  $I_y$ . При вимірі струмів витоку  $I_y$  напруга, що прикладалася до ізоляції обмоток АД цієї групи, не підвищувалася вище 2000 В у зв'язку з погрозою пробою ізоляції.

Аналіз отриманих при експериментальних дослідженнях даних показав, що залежності струмів витоку  $I_y$  від напруги при діагностуванні ізоляції занурених АД не можна використати як основні показники, тому що деякі обмотки, що мають значне збільшення струмів витоку  $I_y$  при підвищенні напруги працювали ще порівняно тривалий час. Збільшення струмів витоку  $I_y$  при підвищенні напруги свідчить про наявність дефекту в ізоляції, однак швидкість розвитку дефекту залежить від його розміщення в обмотці (відстані до металевих частин, робочої напруги обмотки в місці дефекту й ін.). Тому залежності струмів витоку  $I_y$  від напруги доцільно використовувати для додаткового підтвердження висновку про технічний стан ізоляції, як це буде описано нижче. Обробка отриманих даних при вимірі параметрів ізоляції обмоток занурених АД показала, що другим основним параметром для оцінки технічного стану ізоляції є тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ .

По характеру зміни тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ , як і по зміні струмів витоку  $I_y$ , технічний стан ізоляції обмоток занурених АД можна розділити на три групи (класи).

Залежності середніх значень тангенса кута діелектричних втрат ізоляції  $\text{tg}\delta$  від часу роботи для цих груп виражаються:

$$\begin{aligned} & \text{– для 1-ї групи формулою (4):} \\ & \text{tg}\delta_1 = 6,478 - 0,0099t, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{– для 2-ї групи формулою (5):} \quad \text{tg}\delta_2 = 7,382 - 0,0038t, \quad (5)$$

$$\text{– для 3-ї групи формулою (6):} \quad \text{tg}\delta_3 = 7,139 + 0,041t, \quad (6)$$

де  $t$  – напрацювання АД, тис. годин.

З формул (4) – (6) видно, що для 1-ї і 2-ї групи технічного стану ізоляції середні значення тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  зменшуються при збільшенні наробітку, а для 3-ї групи вони збільшуються.

Таким чином, при діагностуванні висновок про технічний стан ізоляції обмоток занурених АД можна зробити на підставі даних вимірів струмів витоку  $I_y$  й тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ .

Якщо значення струмів витоку  $I_y$  й тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  при збільшенні годин роботи занурених АД стабільні або зменшуються, можна гарантувати надійну роботу ізоляції. Збільшення значень обох параметрів у процесі експлуатації електродвигуна свідчать про наявність дефектів і ослаблення ізоляції, внаслідок чого обмотка через певний час вийде з ладу. Якщо один з параметрів нестабільний або постійно збільшується, а другий залишається незмінним або зменшується, стан ізоляції обмоток незадовільний і гарантувати надійну її роботу не можна.

Для точного визначення технічного стану ізоляції треба періодично через певні проміжки часу (3 – 4 місяці) вимірювати струми витоку  $I_y$  й тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  і порівнювати отримані дані з даними попередніх вимірів. При 1-му діагностуванні про технічний стан ізоляції роблять висновок по залежності струмів витоку  $I_y$  від напруги і за абсолютним значенням тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ .

#### Розробка методики оцінки надійності занурених АД в експлуатації

На підставі проведених досліджень був розроблений спосіб прогнозування працездатності ізоляції занурених АД, що використовує метод статистичної класифікації.

Рис. 1, а ілюструє визначені статистичним шляхом області струмів витоку  $I_y$  для трьох груп (класів) технічного стану ізоляції з гарантованими строками безвідмовної роботи, а рис. 1, б – області значень тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  для цих же груп стану ізоляції.

Висновок про працездатність ізоляції обмоток робиться по даним виміру струмів витоку  $I_y$  при напрузі 600 В і тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  при напрузі 100 В змінного струму із частотою 50 Гц. Залежно від напрацювання занурених АД та значень струму витоку  $I_y$  за даними рис. 1, а визначається, до якої групи по діагностичному параметрові

струми витoku  $I_y$  ” відноситься ізоляція АД, який діагностується.

Потім за значеннями тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  (рис. 1, б) визначається, до якої групи технічного стану по діагностичному параметрові «тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ » ставиться ізоляція цього ж АД. Якщо групи, до яких ставиться ізоляція АД за значеннями струму витoku  $I_y$  та тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  збігаються, ізоляцію відносять до вказаної групи. У випадку, коли групи, що визначені по цим ознакам, не збігаються, то питання про віднесення ізоляції АД до тієї або іншої групи зважується на підставі результатів виміру збільшення струмів витoku  $I_y$  при підвищенні напруги від 1000 до 1100 В. При збільшенні струмів витoku  $I_y$  до  $\sim 7,5$  мкА ізоляція ставиться до групи, що відповідає кращому технічному стану, визначеному по одному з діагностичних параметрів. Якщо збільшення струмів витoku  $I_y$  при підвищенні напруги від 1000 до 1100 В перевищує 7,5 мкА, ізоляцію відносять до групи, що відповідає більш поганому стану, також визначеному по одному з діагностичних параметрів. Залежно від групи технічного стану, до якої віднесена ізоляція обмотки, визначають гарантований строк її безвідмовної роботи. Якщо ізоляція зануреного АД ставиться до III групи, тобто найближчим часом можливий вихід обмотки з ладу, рекомендується провести підготовчі роботи, підняти електронасос на поверхню й замінити або відремонтувати занурений АД. Якщо ізоляція обмоток ставиться до I або II груп технічного стану, занурений АД залишають працювати і після закінчення гарантованого строку безвідмовної роботи, потім знову діагностують і визначають працездатність ізоляції.

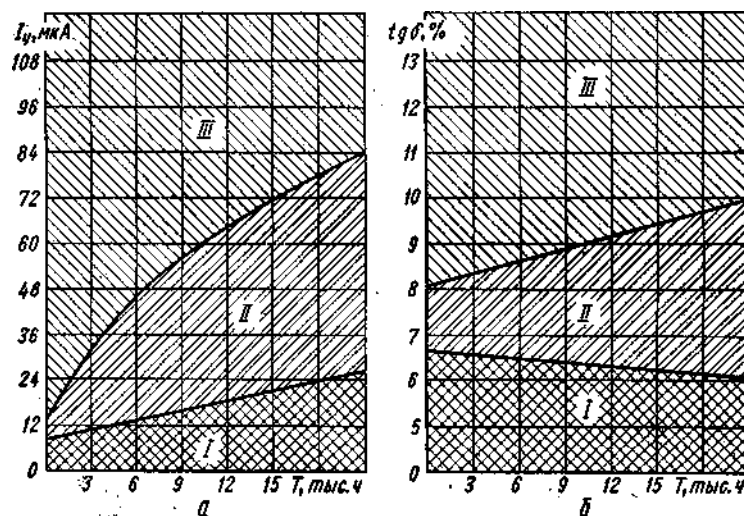


Рис. 1. Области значень величин струмів витoku  $I_y$  (а) і тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  (б) для трьох груп технічного стану занурених електродвигунів:  
 I – гарантований строк безвідмовної роботи не менш як 3500 годин;  
 II – не менш як 1500 годин; III – до 500 годин

### Визначення дії перенапруг на обмотку статора зануреного АД

В умовах експлуатації занурених АД на їх обмотки статора діють комутаційні перенапруги. В [6] показано, що при аналізі надійності обмотки статора АД загальнопромислових типів необхідно враховувати дію на них комутаційних перенапруг.

Нижче дана оцінка впливу комутаційних перенапруг на обмотку статора зануреного АД із врахуванням конструктивних властивостей цих обмоток (по конструкції вони усипні).

Усипну обмотку статора зануреного АД можна розглядати як систему послідовно з'єднаних елементів. Тому її надійність характеризується такою формулою:

$$P_{об}(t) = P_B(t) \cdot P_{II}(t) \cdot P_M(t) \cdot P_C(t), \quad (7)$$

де  $P_B(t)$  – надійність міжвиткової ізоляції;  $P_{II}(t)$  – надійність пазової ізоляції;  $P_M(t)$  – надійність міжфазо-

вої ізоляції;  $P_C(t)$  – надійність міжсекційної ізоляції.

З чотирьох співмножників у правій частині рівняння (7) найменшим по величині є перший. Він, в основному, і визначає надійність обмотки. Особливе значення складової надійності  $P_B(t)$  обумовлено низькою електричною міцністю міжвиткової ізоляції і значною кількістю витків в пазу осереддя статора АД, тому у першу чергу необхідно розглянути математичну модель надійності міжвиткової ізоляції. Остання може бути створена на основі так званої моделі найбільш слабкої ланки [5]. За елемент розрахунку в цьому випадку приймається пара сусідніх активних провідників, що перебувають у пазу або в лобовій частині обмотки і розділені міжвитковою ізоляцією, що складається із власної ізоляції обмотувального проведення, просочувального лаку і повітряних прошарків. Відмова настає, коли напруга між провідниками пари перевищує електричну міцність міжвиткової ізоляції.

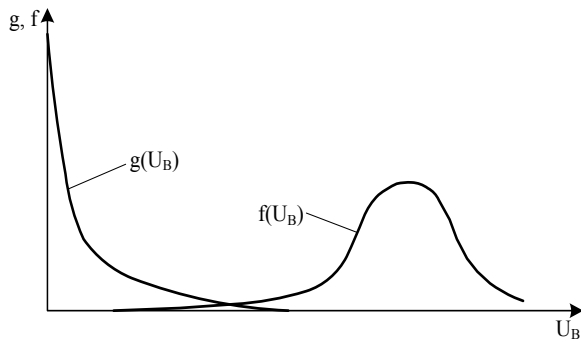


Рис. 2. К визначенню надійності міжвиткової ізоляції

Рис. 2 ілюструє розглянуту модель надійності. На цьому рисунку:  $g(U_B)$  – щільність розподілу напруги, прикладеної між провідниками пари;  $f(U_B)$  – щільність розподілу електричної міцності (пробивної напруги) міжвиткової ізоляції.

Надійність міжвиткової ізоляції обмотки, що складає з  $n$  пар провідників, має вигляд:

$$P_B = \int_0^{\infty} g(U_B) [1 - F(U_B)]^2 dU_B, \quad (8)$$

де  $F(U_B)$  – функція розподілу пробивної напруги міжвиткової ізоляції.

Кількість пар провідників обмотки визначається таким чином:

$$n = (2S_{НАР} + 3S_{ВН})Z_1 \approx 2,7N_1, \quad (9)$$

де  $S_{НАР} = \Pi_n/d_{из}$  – кількість провідників у зовнішньому шарі, тобто розташованих по периметру перетину паза;  $S_{ВН} = S - S_{НАР}$  – кількість провідників у внутрішніх шарах;  $Z_1$  – кількість пазів статора;  $N_1$  – загальна кількість провідників обмотки.

Напруга  $U_c$ , прикладена між провідниками, що утворюють пари, визначається значенням номінальної фазної напруги  $U_\phi$ , кратністю комутаційних перенапруг  $K$  і взаємним розташуванням провідників у пазу:

$$U_B = \frac{U_c K l}{\omega_c}, \quad (10)$$

$$U_c = 2U_\phi \frac{a m_1}{C_1 Z_1}, \quad (11)$$

де  $U_c$  – напруга на кінцях секції,  $B$ ;  $U_\phi$  – фазова напруга,  $B$ ;  $K$  – кратність комутаційних перенапруг;  $\omega_c$  – кількість витків у секції;  $l$  – номер провідника один по одному намотування секції;  $a$  – кількість паралельних кіл обмотки;  $m_1$  – кількість фаз обмотки статора;  $Z_1$  – кількість пазів статора;  $c_1=1$  або  $2$  – кількість шарів обмотки.

Вірогідність розподілу провідників у пазу може бути виражена однією з наступних емпіричних формул [5]:

$$P(l) = \frac{\ln \frac{\omega_c}{l}}{\ln \frac{\omega_c}{\omega_c - 1}}, \quad (12)$$

або

$$P(l) = \frac{\ln \frac{\omega_c}{l}}{0,98\omega_c - 1,6}. \quad (13)$$

Розрахунок по цих формулах дає близькі результати. Безпосередньою причиною міжвиткових замикань у більшості випадків є комутаційні перенапруги, що виникають в обмотці при перехідних процесах, зокрема при відключенні працюючих АД. Особливо значні перенапруги виникають внаслідок зрізу струму при швидкому охолодженні дуги у вимикачі. Максимальна величина перенапруги може бути знайдена з рівняння

$$U_{max} = I_{CP} Z_B, \quad (14)$$

де  $U_{max}$  – амплітуда перенапруги,  $B$ ;  $I_{CP}$  – струм зрізу,  $A$ ;  $Z_B$  – сумарний хвильовий опір,  $\Omega$ .

Сумарний хвильовий опір складається з хвильового опору АД (змінюється в межах 1–9 кОм), та хвильового опору з'єднуючих кабелів (змінюється в межах 50–100 Ом).

За певних умов такі комутаційні перенапруги можуть досягати десятикратної (і більше) величини стосовно номінальної напруги. Варто брати до уваги, що по своєму впливі на ізоляцію перенапруги імпульсного характеру не ідентичні робочій напрузі промислової частоти. Облік цієї обставини надалі враховується за допомогою коефіцієнта імпульсу  $k_{\text{и}}$ , що дорівнює відношенню амплітуд середніх пробивних напруг (імпульсної й промислової частоти).

Розподіл комутаційних перенапруг може бути показаний у вигляді суперпозиції усіченого нормального розподілу і усіченого розподілу Коші:

$$g(K) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K-1)^2}{0,08}} + \frac{0,355}{1 + (K-3)^2}, \quad (15)$$

де  $K$  – кратність комутаційних перенапруг, а середнє квадратичне відхилення нормального розподілу  $\sigma = 0,2$ .

Наявність двох максимумів у розподілі  $K$  обумовлена існуванням двох коливальних контурів. Один з них може бути утворений міжвитковою ємністю і індуктивністю обмотки, інший – індуктивністю обмотки і її ємністю щодо заземленого корпусу.

Тоді розподіл напруги між сусідніми провідниками буде мати вигляд:

$$g(U_B) = \sum_{l=1}^{\omega_c-1} P(l) \frac{\omega_c}{U_c l} g(K) = \frac{\omega_c}{U_c \ln \frac{\omega_c}{\omega_c - 1}} \times \sum_{l=1}^{\omega_c-1} \frac{\ln \frac{\omega_c}{l}}{l} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{U_a \omega_c - 1}{U_c l}\right)^2}{0,08}} + \frac{0,355}{1 + \left(\frac{U_B \omega_c}{U_c l} - 3\right)^2} \right]. \quad (16)$$

Розподіл пробивної напруги міжвиткової ізоляції має складний характер. Однак найбільше практично важливою є ліва галузь кривої  $f(U_B)$ , що показана на рис. 3. У цій зоні зміна пробивної напруги може бути апроксимована розподілом Вейбулла вигляду

$$F(U_B) = 1 - e^{-\frac{U_B^k}{U_0^k}} \quad (17)$$

Тоді вираз (8) для надійності міжвиткової ізоляції обмотки приймає наступну форму:

$$P_B = \left[ \int_{\frac{U_B}{K}}^{U_B} g(U_B) e^{-\frac{n}{U_B} \left(\frac{U_B^k}{k_n}\right)} dU_B \right], \quad (18)$$

де  $v$  – кількість включень двигуна за розрахунковий період;  $k_n=0,9$  – коефіцієнт імпульсу.

Параметри розподілу Вейбулла  $U_0$  і  $k$  можна визначити тільки експериментальним шляхом. Будучи один раз отримані для двигунів певного типу, ці параметри можуть бути використані для розрахунку надійності аналогічних по конструкції двигунів за умови збереження марки й розміру обмотувального проведення, виду состава, що просочує, коефіцієнта заповнення пазів, технології укладання обмотки.

Визначення  $P_B(t)$  дається для декількох інтервалів часу, які вибираються так, щоб у межах кожного інтервалу значення  $U_0$  і  $k$  можна було вважати постійними. Імовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції у функції часу визначається шляхом перемножування значень  $P_B(t)$ , отриманих для послідовних інтервалів:

$$P_B(t) = \int_{t=1} P_{B_i}(t_i), \quad (19)$$

де  $P_{B_i}(t_i)$  – значення надійності в даному інтервалі часу  $t_i$ .

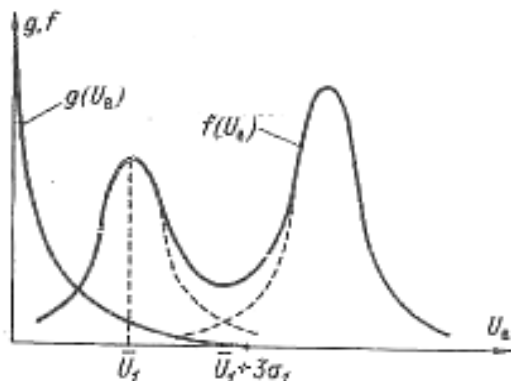


Рис. 3. Розподіл електричної міцності міжвиткової ізоляції

Ця методика дозволяє визначити надійність міжвиткової ізоляції для будь-яких періоду експлуатації й наробітку.

Надійність пазової ізоляції завжди значно вище надійності виткової ізоляції.

Це пояснюється як більше високою її електричною міцністю, так і більшою ефективністю методів її випробування.

Як правило, дефекти пазової ізоляції виявляються при випробуваннях двигунів на заводах-виготовлювачах. Пазова ізоляція машин із усипною обмоткою складається з декількох шарів різних ізоляційних матеріалів.

При розрахунку надійності пазова ізоляція може бути представлена у вигляді декількох конденсаторів, з'єднаних послідовно. Для розрахунку необхідно знати рівень комутаційних перенапруг і електричну міцність окремих шарів ізоляційних матеріалів. Для цього повинні бути виконані випробування зразків пазової ізоляції.

У такий спосіб імовірність пробою окремих шарів визначається експериментально в результаті випробувань досить представницької партії зразків.

Імовірність пробою елементарної ділянки двохшарової ізоляції визначається як імовірність двох спільних подій:

$$Q_{ЭЛ} = Q(AB) = Q(A)Q_A(B) + Q(B)Q_B(A) - Q(A)Q(B), \quad (20)$$

де  $Q(A)$  і  $Q_B(A)$  – імовірності пробою шаруючи А при непробитому й пробитому шарі В відповідно;  $Q(B)$  і  $Q_A(B)$  – імовірності пробою шару В при непробитому й пробитому шарі А відповідно. Рівняння, подібні (20), можуть бути складені для будь-якого числа шарів.

Маючи у своєму розпорядженні отриманими з досвідів розподілами пробивної напруги, можна визначити імовірності пробою окремих ізоляційних матеріалів, при різних сполученнях пробитих і непробитих шарів.

При цьому варто виходити з певної амплітуди комутаційної перенапруги, з огляду на те, що напруга, що доводиться на даний (і-й) шар ізоляції в такий спосіб залежить від його товщини й діелектричної проникності:

$$U_1 = \frac{KU_{\Phi} \frac{d_i}{\epsilon_i} \Pi \epsilon_i}{\sum_1^n \frac{d_i}{\epsilon_i} \Pi \epsilon_i}, \quad (21)$$

де  $KU_{\Phi} = (\ln v + 0.7) / 2,25$  – амплітуда комутаційної перенапруги на фазі обмотки, кВ;

$d_i$  – товщина і-го шару ізоляції;

$\epsilon_i$  – його діелектрична проникність.

При цьому діелектрична проникність пробитого шару приймається рівній одиниці, а його товщина – рівній нулю.

Надійність пазової ізоляції обмотки АД можна визначити таким чином:

$$P_{\Pi} = (1 - Q_{ЭЛ}) \frac{S_{\Pi}}{kS_{ЭЛ}}, \quad (22)$$

де  $S_{\Pi}$  — повна площа пазової ізоляції обмотки;  $S_{ЭЛ}$  — площа елементарної ділянки, що може бути прийнята рівної площі плоского електрода, застосовуваного при випробуваннях ізоляції ( $78,5 \text{ мм}^2$ );  $k'$  — коефіцієнт визначеності дефектів.

Коефіцієнт  $k'$  близький до одиниці, тому що контроль пазової ізоляції на заводах досить ефективний.

Викладена методика може бути використана й для розрахунку довговічності ізоляції обмоток, якщо відома залежність між дефектністю ізоляції, рівнем факторів, що впливають, і тривалістю їхнього впливу.

Такий розрахунок ґрунтується на наступному поданні про процес зношування ізоляції. Перший пробій пазової ізоляції імпульсом комутаційної перенапруги, якщо на шляху розряду є хоча б один непробитий шар, звичайно приводить не до короткого замикання з утворенням стійкої дуги, а лише до появи слабого місця, обумовленого наявністю наскрізного ушкодження всіх шарів у межах однієї елементарної ділянки. Кількість елементарних ділянок, що мають наскрізні дефекти, зростає зі збільшенням наробітку машини як внаслідок старіння ізоляції й появи в ній тріщин, так і у результаті пробою імпульсами комутаційних перенапруг бездефектних шарів.

## Висновки

1. Проаналізовано технічний стан занурених АД. Виявлені параметри їх діагностики.
2. Запропонована методика оцінки надійності занурених АД.

## Список літератури

1. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования / В.П. Таран. — К.: Техника, 1983. — 200 с.
2. Таран В.П. Техническое обслуживание электрооборудования водоподъемных скважин / В.П. Таран // Техника в сельском хозяйстве. — 1975. — №2. — С. 36-37.
3. Таран В.П. Техническое обслуживание электрооборудования водоподъемных скважин / В.П. Таран. — М.: Колос, 1975. — 304 с.
4. Таран В.П. Прогнозирование работоспособности изоляции обмоток погружных электродвигателей в процессе эксплуатации / В.П. Таран // Пром. Энергетика, 1978. — №2. — С. 19-20.
5. Похолков Ю.П. Вероятностный метод расчета надежности изоляции вьспных обмоток асинхронных электродвигателей / Ю.П. Похолков // Известия Томского политехнического института. — Томск, 1972. — Т. 242. — С. 216-221.
6. Похолков Ю.П. Исследование коммутационных перенапряжений в обмотках асинхронных электродвигателей / Ю.П. Похолков // Известия Томского политехнического института — Томск, 1972. — Т. 242. — С. 213-215.

Надійшла до редколегії 24.11.2009

Рецензент: докт. техн. наук, проф. С.Ф. Артюх, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

## АНАЛИЗ И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВОДЯНЫХ СКВАЖИН

Ю.А. Ясинский, П.В. Васюченко, А.Ю. Васюченко

*Проанализирована конструкция погружных асинхронных электродвигателей, которая существенно отличается от конструкций общепромышленных типов АД. Проанализированы результаты проведенных в лабораторных и производственных условиях исследований свойств и механизма выхода из строя изоляции обмоток погружных АД. Установлено, что из параметров, которые измерялись при проведении этих исследований (сопротивление изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , емкость, зависимость токов утечки  $I_y$  от приложенного напряжения, порог ионизации, а также зависимости вышеперечисленных параметров от температуры) для дальнейшего анализа их как параметров диагностики изоляции обмоток погружных АД целесообразно выбрать такие: зависимость токов утечки  $I_y$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  от напряжения и времени наработки погружных АД. Предложена методика оценки надежности погружных АД в эксплуатации с учетом действия на обмотки внутренних перенапряжений.*

**Ключевые слова:** погружной асинхронный электродвигатель, обмотка статора, надежность, анализ, расчет.

## THE ANALYSIS AND CALCULATION OF RELIABILITY LOADERS ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS OF WATER CHINKS

J.A. Jasinskiy, P.V. Vasjuchenko, A.J. Vasjuchenko

*The construction of loader asynchronous electric motors, which substantially differs from the constructions of total industry types AD, is analysed. The results of the properties and mechanism of death of isolation of coil of loader conducted in the laboratory and production terms of researches are analysed AD. It is set that from parameters which was measured during the leadthrough of these researches (resistance to the isolation, tangent of corner of dielectric losses of  $\text{tg}\delta$ , capacity, dependence of currents of loss  $I_y$  from the attached tension, threshold of ionization, and also dependences of the above-stated parameters from a temperature) for a further analysis them as parameters of diagnostics of isolation of coil loader AD it is expedient to choose such: dependence of currents of loss  $I_y$  and tangent of corner of dielectric losses of  $\text{tg}\delta$  from tension and time of work of loader AD. The method of estimation of reliability is offered loader AD in exploitation taking into account operating on coil of internal overstrains.*

**Keywords:** loader asynchronous electric motor, puttee of stator, reliability, analysis, calculation.