

УДК 621.315.62.027.3.004.1.

Н. В. Собчук, к. т. н., доц.; О. В. Слободянюк, к. п. н.

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВЕЛИЧИНИ ВИПРОБУВАЛЬНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ

*Проаналізовано електрофізичні процеси пошкодження ізоляції електричних машин для визначення оптимальної величини випробувальної напруги та ефективного контролю за станом ізоляції. Запропоновано високовольтні випробування випрямленою напругою, за якої діелектричні втрати мінімальні й місцеве нагрівання під час випробування ізоляції буде відсутнє.*

**Ключові слова:** ізоляція електричних машин, електрофізичні процеси в ізоляції, контроль за станом, мінімальні діелектричні втрати.

На електричних станціях систематично проводять облік і аналіз пошкоджень ізоляції експлуатаційним персоналом вищої кваліфікації. Електрофізичні процеси пошкодження ізоляції призводять до чисто електричного механізму пробую, електротеплового механізму, іонізаційного механізму та їх комбінації.

Як свідчить досвід випробувань, величини пробивних напруг мають статистичний розкид, а інтегральну функцію ймовірності пробую  $P_{np}(U)$  добре описує нормальний закон розподілу [1]:

$$P_{np}(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2}} dU, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – стандарт розподілу;  $\bar{U}$  – середнє значення пробивних напруг.

Практично можливе відхилення пробивної напруги від  $\bar{U}$  не перевищує  $\pm 3\sigma$ . Ймовірність такої величини відхилення оцінюють у 0,0013, а ймовірність відхилення  $\pm 3\sigma$  оцінюють у 0,023. Ось чому для характеристики пробивної напруги заданої форми (аперіодичний імпульс, синусоїда, постійна напруга) достатньо знати  $\bar{U}$  і  $\sigma$ .

У разі застосування правила  $3\sigma$  для ізоляційної конструкції треба враховувати можливість зниження пробивної напруги до  $\bar{U}-3\sigma$ .

За постійної високої напруги іонізаційні та електротеплові явища виражені слабо, проте виникає новий вид старіння ізоляції – хімічне старіння, тобто електромагнітні явища, які поступово призводять до хімічного переродження діелектричного матеріалу, зростання струмів провідності й остаточно до електричного або теплового пробую.

Електроліз виникає в діелектриках із підвищеною іонною провідністю, наприклад, у паперово-масляній ізоляції.

Дослідження дії перенапруг грозового і внутрішнього походження на головну ізоляцію електричних машин і апаратів показали [2], що пробивна напруга ізоляції без дефектів у 2÷2,5 рази вища за залишкову напругу обмежувачів перенапруг, тому ці перенапруги безпечні.

В експлуатації ізоляція старішає внаслідок низки повільних процесів, таких як загальна зміна структури ізоляції під дією сильних електричних полів, температур, які вищі за клас нагрівостійкості діелектриків.

Особливо негативна дія концентраторів: напруженості електричного поля, механічних навантажень, теплових втрат. Ці концентратори створюють появу місцевих дефектів ізоляції, які повільно збільшуються.

В ізоляції нових електричних машин і апаратів є конструктивні недоопрацювання (хибні

конструкції), технологічні недоопрацювання (недосконалі технології) і недостатня ефективність заводських випробувань.

Почнемо з оцінки ефективності високовольтних випробувань головної ізоляції нових електродвигунів.

Величина випробувальної напруги промислової частоти для двигунів із номінальною напругою  $U_{ном} = 600$  В становить:

$$U_{випр.f=50Г0} = 2U_{ном} + 1000 = 2,2 \text{ кВ.}$$

Як показано в [3], випробувальна напруга 2,2 кВ дозволяє виявити тільки 45% наскрізних отворів, а випробувальна напруга 1,5 кВ – відповідно 40%.

Ці показники ефективності виявлення наскрізних дефектів випробувальною напругою промислової частоти стосуються незволоженої ізоляції. Для ізоляції в стані експлуатаційного зволоження й забруднення ефективність профілактичних випробувань буде вища. Загалом величина випробувальної напруги промислової частоти для таких двигунів малоефективна, тому що не виявляє суттєвої кількості навіть грубих дефектів.

Аналіз результатів випробувань ізоляції мегомметром на 1000 В показує, що тільки у 2÷3% випробувань опір ізоляції з наскрізними дефектами суттєво знижується, а відповідно, у 98÷97% опір залишається незмінним.

Більшість дефектів у сухій ізоляції також не виявляють мегомметром 1000 В. Винятки становлять проколи ізоляції, на стінках яких є частки сублимованих металів або вуглецеві сліди.

Багаторічний експлуатаційний досвід свідчить про те, що за умови збільшення величини випробувальної напруги кількість виявлених дефектів зростає, а аварійність від пошкоджень ізоляції зменшується.

Розрахунок рівнів ізоляції електричних машин і апаратів ґрунтується на припустимій напруженості електричного поля, яка дорівнює 2,0÷2,2 кВ/мм. У реальних умовах головна ізоляція ЕМ працює в умовах нерівномірного електричного поля. Аналіз розподілу місць пробою ізоляції із мікастрічки й лакотканини показує, що найвразливішими є ребра секції, де число пробоеів складає близько 80% від загальної кількості пробоеів, а решта 20% приблизно порівну розподіляються між боковими, нижньою й верхньою гранями. Це пояснюється найбільшою нерівномірністю електричного поля на ребрах. Коефіцієнт нерівномірності в пазовій частині обмотки найбільший на ребрах і залежить від відношення радіуса закруглення  $r$  та товщини ізоляції  $d$ . Величина радіуса закруглення ребер  $r = 3÷5$  мм. За відношення  $r/d \leq 0,5$  досягається задовільна величина коефіцієнта нерівномірності  $K_n$

$(r/d \geq 0,5) < 1,5$ . Тоді  $d > \frac{r}{0,5} = \frac{3÷5}{0,5} = 6÷10$  мм. Виходячи з товщини  $d \geq 6÷10$  мм і допустимої напруженості  $E_{нрпн} = 2,0÷2,2$  кВ/мм, можна отримати величину випробувальної напруги

$$U_{випр} = \frac{2,0÷2,2}{1,5} \cdot d = \frac{2,0÷2,2}{3} \cdot 2d = (0,67÷0,73) \cdot (12÷20) = 8÷14,6 \text{ кВ.}$$

Іншим напрямком підвищення ефективності випробувань ізоляції електродвигунів  $U_n = 600$  В є випробування випрямленою напругою. За такої напруги діелектричні втрати мінімальні й небезпечного місцевого нагрівання під час випробування ізоляції не буде.

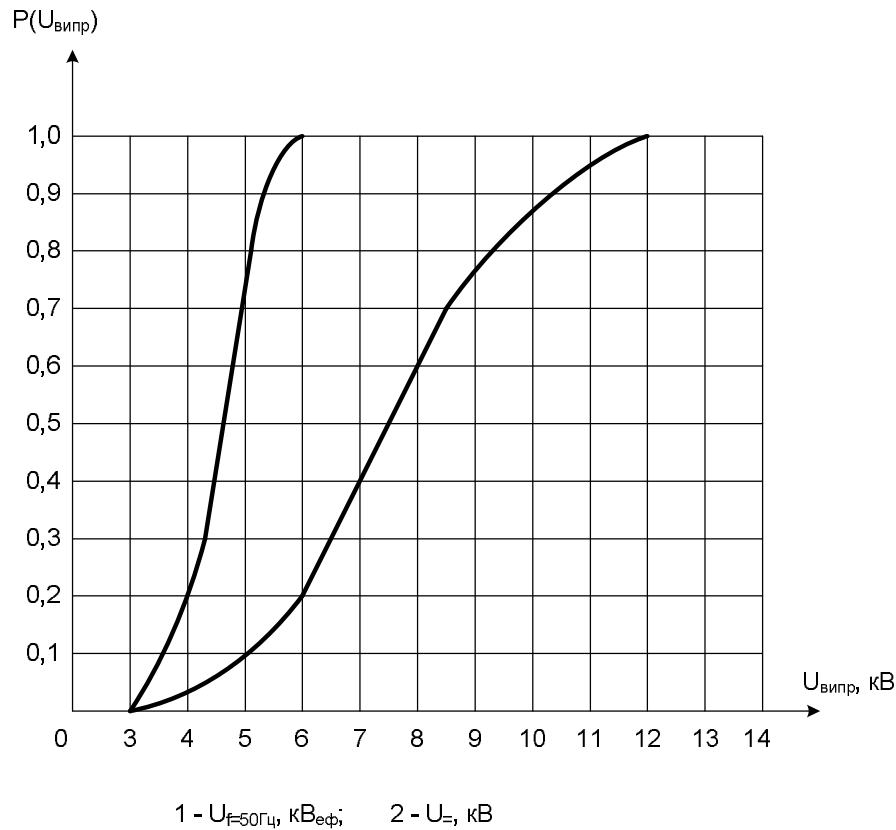


Рис. 1. Інтегральні криві розподілу електричних пробивів мікастрічкової ізоляції пазових частин електродвигунів за змінної (1) й постійної (2) напруги

Із рис. 1 видно, що внаслідок діелектричних втрат в ізоляції за  $U_{\text{випр},f=50\text{Гц}}$  пробивна напруга  $\bar{U}_{\text{проб}}$  в 1,73 раза менша, ніж за  $U_{\text{випр},=}$ , і відповідно  $\bar{U}_{\text{проб},=}$ . Ось чому тривалість прикладання випробувальної напруги  $U_{\text{випр},f=50\text{Гц}}$  треба обмежувати для зниження впливу перегрівання ізоляції на результат випробувань.

За постійної випробувальної напруги пробивна напруга за  $P(U) = 0,5$  перевищує номінальну в  $7500/600 = 12,5$  разів. За змінної випробувальної напруги пробивна напруга за  $P(U) = 0,5$  перевищує номінальну в  $4700 \cdot 1,41/600 = 11$  разів.

Перенапруги обмежені: при наявності розрядників – їх характеристиками; при відсутності розрядників – рівнем ізоляції контактної системи.

Відомо, що рівень ізоляції контактної мережі визначають підтримувальними й натяжними ізоляційними підвісками. Довжина шляху витoku по поверхні таких підвісок залежить від зони забруднення по трасі й відповідної питомої довжини шляху витoku  $\lambda_{\text{эф}}$ . В ПУЕ  $\lambda_{\text{эф}}$  дається в ефективних значеннях синусоїдальної напруги, тому у випадку мереж постійного струму  $\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{эф}\sim} \cdot \sqrt{2}$ .

Ось чому для мережі  $U_{\text{ном}} = 600 \text{ В}$  для III зони забруднення  $\lambda_{=} = 2,25 \cdot 1,41 \text{ см/кВ}_{\text{max}} = 3,172 \text{ см/кВ}_{\text{max}}$ . Довжина шляху витoku по поверхні ізолятора в мережі 600 В дорівнюватиме

$$L_{\text{ш.в.}} = U_{\text{ном}} \cdot 3,1725 = 5 \text{ кВ} \cdot 3,1725 = 15,8 \text{ см.}$$

Відомо [4], що розрахунковий рівень ізоляції визначають із рівняння

$$U_{\text{розр}} \geq (0,85 \div 0,9) U_{\text{випроб}} \cdot \sqrt{2} \cdot k_1, \tag{2}$$

де  $U_{\text{випроб}}$  – випробувальна напруга промислової частоти, якою ізоляцію електродвигунів

перевіряють після періодичних відновлювальних ремонтів, 2,1 кВ<sub>еф</sub>;  $k_i$  – коефіцієнт імпульсу ізоляції, який приймають для обладнання після профілактичного ремонту, дорівнює 1,1÷1,2.

$$U_{розр} \geq (0,85 \div 0,9) \cdot 2,1 \cdot \sqrt{2} \cdot (1,1 \div 1,2) = 3,2 \text{ кВ.}$$

Останнім часом на заміну традиційним вентильним розрядникам прийшли нові електричні апарати – обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН), які порівняно з розрядниками глибше обмежують комутаційні та грозові перенапруги.

ОПН – апарат на основі металооксидних варісторів без іскрових проміжків.

Захисних характеристик ОПН дві:

1. Грозовий рівень захисту – залишкова напруга  $U_{з.г.}$  за дії нормованого струму  $I_n$ .
2. Комутаційний рівень захисту – найбільша із залишкових напруг  $U_{з.к.}$  під час дії комутаційних імпульсів струму з нормованими амплітудами.

### Перенапруги на корпусній ізоляції тягових електродвигунів

Атмосферні перенапруги, які діють на корпусну ізоляцію, створюють такі види струмів блискавки:

- імпульс струму з крутим фронтом (тривалість фронту 1 мкс, тривалість імпульсу 2÷20 мкс);
- імпульс струму великої амплітуди із формою 4/10 мкс;
- грозовий імпульс струму із формою 8/20 мкс;
- комутаційний імпульс струму із формою 30/60 мкс;
- «довгий» імпульс струму прямокутної форми тривалістю 2000÷4000 мкс.

Втрати потужності за постійної напруги

$$P_{=} = \frac{U_{вип}^2}{R_V} \quad (3)$$

Втрати за змінної напруги визначають за формулою:

$$P_{\approx} = U_{вип}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta. \quad (4)$$

Визначимо, у скільки разів відрізняються втрати:

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = \frac{U_{вип}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta}{U_{вип}^2 / R_V} = \omega \cdot R_V \cdot C \cdot \text{tg} \delta. \quad (5)$$

Між ємністю  $C$  і опором ділянки ізоляції існує співвідношення:

$$R_V \cdot C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_V. \quad (6)$$

Підставимо (4) в (3) й отримаємо величину  $\frac{P_{\approx}}{P_{=}}$ :

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_V \cdot \text{tg} \delta. \quad (7)$$

Відомо, що добуток  $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \delta = k_{д.в.}$  – коефіцієнт діелектричних втрат, тому

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = \omega \cdot \rho_V \cdot k_{д.в.} \quad (8)$$

Визначимо  $k_{д.в.}$  для таких діелектриків:

Полістирол:  $\varepsilon = 2,6 \div 2,8$ ;  $\text{tg} \delta = 12 \cdot 10^{-3}$ ;  $\rho_V = 10^{14} \div 10^{15}$  Ом·м.

$$k_{д.в.} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \delta = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м} \cdot 2,7 \cdot 12 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_V \cdot k_{0.с.} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Ом} / \text{м} \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ ф} / \text{м} \cdot 2,7 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 2390 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 28,68$$

$$\omega = 2\pi f = 3,14 \cdot 2 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}$$

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = 28,68 \cdot 314 = 9000.$$

Слюда:  $\varepsilon = 6,1 \div 8,4$ ;  $\text{tg}\delta = 12 \cdot 10^{-3}$ ;  $\rho_V = 10^{13} \div 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

$$k_{0.с.} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot (6,1 \div 8,4) \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 240 \cdot 10^{-16} = 2,4 \cdot 10^{-14}$$

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = 2,4 \cdot 10^{-14} \cdot 314 \cdot 10^{14} = 753.$$

Поліетилен:  $\varepsilon = 2,1 \div 2,4$ ;  $\text{tg}\delta = (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$ ;  $\rho_V = 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_V \cdot \text{tg}\delta = 19480 \text{ с} \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = 4,87;$$

$$\frac{P_{\approx}}{P_{=}} = 4,87 \cdot 314 = 1530.$$

Скло:  $\varepsilon = 3,75 \div 8,0$ ;  $\rho_V = 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Фарфор:  $\varepsilon = 6 \div 7$ ;  $\text{tg}\delta = 0,03$ ;  $\rho_V = 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Гетинакс:  $\varepsilon = 5 \div 6$ ;  $\text{tg}\delta = 10 \cdot 10^{-2}$ ;  $\rho_V = 10^6 \div 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Отже, випробування ізоляції змінною напругою є небезпечним для ізоляції порівняно з постійною напругою внаслідок великих втрат, енергія яких витрачається на нагрівання ізоляції. При цьому зростає ймовірність електротеплового механізму пробою.

### Висновки

1. Рівень головної ізоляції електродвигунів  $U_{ном} = 600 \text{ В}$  у 12 разів вищий за номінальну напругу.
2. За 12 – 15 років експлуатації цей рівень зменшується в 1,5 раза, тобто у 8 разів вищий за номінальну напругу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Техника высоких напряжений : учебник для Вузов / [под ред. Г. С. Кучинского]. – СПб : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с.
2. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 320 с.
3. Справочник по сопротивлению материалов / [Писаренко Г. С, Яковлев А. П., Матвеев В. В.] ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Киев : Наукова думка, 1988. – 736 с.
4. Собчук В. С. Координація параметрів ізоляції електрообладнання і пристроїв технічної діагностики / В. С. Собчук, В. Н. Пашенко // Вісник ВПШ. – 1995. – № 3. – С. 41 – 43.
5. Руцкий А. И. Электрические станции и подстанции. Часть 1. Основное техническое оборудование / А. И. Руцкий. – Минск, 1984. – 394 с.

**Собчук Наталья Валеріївна** – доцент кафедри ЕСС.

**Слободянюк Олена Валеріївна** – ст. викладач кафедри ІКГ.

Вінницький національний технічний університет.