

Є.Г. Худий

(Україна, Дніпропетровськ, ДВНЗ «Національний гірничий університет»)

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ВИПРОБУВАЛЬНОЮ НАПРУГОЮ ШИРОКОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

Вступ

Сучасні технології експлуатації, обслуговування та ремонту обладнання розвиваються великими темпами. Планово-попереджувальні ремонти еволюціонували в обслуговування за фактичним станом. Наступним кроком стала поява систем управління ризиками та надійністю підприємства, тобто спостерігається зміна масштабу прийняття рішень та інтеграція з іншими системами управління підприємством. Слід відзначити, що рішення, які приймають подібні системи, значною мірою впливають на ефективність використання фінансових та матеріальних ресурсів, планування виробництва, формування людських ресурсів та ін. Для здійснення аналізу необхідна адекватна і точна інформація про фактичний технічний стан обладнання, що зумовлює актуальність розвитку методів діагностики обладнання.

Однією з наукових задач загальної проблеми діагностування технічного стану обладнання є діагностика технічного стану ізоляції електрообладнання. Ремонт ізоляції електричних двигунів - досить витратна операція, яка може також бути пов'язана із зупинкою частини виробничого процесу. Планування ремонтів електричних машин повинно здійснюватись з урахуванням ефективного використання ресурсів.

Один із шляхів підвищення достовірності та інформативності результатів діагностування технічного стану ізоляції електричних машин - це розширення методів дослідження її властивостей [1]. Пошук нових методів дослідження стану ізоляції є актуальним також з точки зору розширення їх застосування для різного класу обладнання, різних режимів роботи обладнання та ін. [2].

Аналіз досліджень і публікацій

Різноманітні види поляризації, що мають місце в діелектриках, по-різному проявляються в різних діелектриках [3]. Крім того, в діелектриках спостерігається змінення показників зі зміною частоти прикладеної напруги. Ці залежності використовуються для визначення, наприклад, коефіцієнта абсорбції (як відношення ємкості при 2 Гц до ємкості при 50 Гц) [4], для діагностики технічного стану ізоляції за результатами вимірювання $tg\delta$ в діапазоні частот до 10 Гц [5, 6]. Не менш цікавим є і дослідження цих залежностей у більш широкому спектрі частот, де мають місце інші види поляризації [3], та використання

цих залежностей у задачах діагностики технічного стану ізоляції електричних машин.

Мета роботи

Визначити перспективність використання залежностей $tg\delta$ від частоти прикладеної напруги в розширеному діапазоні частот для створення нових методів діагностики технічного стану ізоляції електричних машин.

Викладення основного матеріалу

Для пошуку зв'язку між технічним станом ізоляції та залежністю $tg\delta$ від частоти прикладеної напруги були проведені дослідження на синхронних двигунах з ізоляцією одного класу та напруги (табл. 1). Вимірювання здійснювались при відносній вологості 68 % та температурі обмоток +22°C.

Для кожного з двигунів проведено комплексне вимірювання, яке містить у собі як стандартні вимірювання параметрів ізоляції, так і вимірювання на низькій частоті.

Таблиця 1

Характеристики двигунів

№ двигуна	Номінальна потужність, кВт	Номінальна напруга, В	Клас нагрівостійкості ізоляції	Фактичний строк експлуатації ізоляції
1	2000	6000	F	3 роки
2	2000			4 роки
3	2600			23 роки
4	2600			23 роки
5	2000			11 років
6	2000			9 років
7	2000			9 років
8	8000			1 рік
9	2000			28 років
10	2000			28 років
11	2000			33 роки
12	2000			33 роки
13	800			33 роки
14	800			33 роки

Для реалізації стандартних методів вимірювань використовувались прилади:

1. Fluke 1507 – вимірювання DAR , PI , R_{60} ;
2. ЦС-0202-1 – вимірювання R_{60} , $K_{аб}$;
3. Е7-22 – вимірювання Q , C ;
4. Fluke 971 – вимірювання вологості та температури повітря;

5. Для вимірювання $tg\delta$ на частоті 50 Гц використано джерело синусоїдальної напруги 2500 В потужністю 2500 ВА;
6. За результатами вимірювань R_{60} та C розраховувалась постійна часу ізоляції t .

Для оцінювання технічного стану ізоляції використовувався комплексний показник технічного стану ізоляції Q , який враховує всі показники стандартних вимірювань [1]. Комплексний показник технічного стану ізоляції розраховується за формулою

$$Q = \sum_{i=1}^N (K_{ni} \cdot m_i), \quad (1)$$

де K_{ni} – нормоване значення параметра, m_i – ваговий коефіцієнт параметра.

Результати вимірювань за стандартними методами наведені в табл. 2, в якій також наведено комплексний показник технічного стану ізоляції.

Таблиця 2

Результати стандартних вимірювань

№ двигуна	R_{60} , МОм	$K_{аб}$	DAR	PI	$tg\delta(50 \text{ Гц})$, %	t, с	Q
1	472	1,44	1,2	1,2	3	45	0,51
2	909	1,78	1,5	1,8	21	102	0,48
3	7,96	1,03	1	1	12	2	0,22
4	16,5	1,01	1	1	19	4	0,23
5	270	1,38	1,2	1,3	27	22	0,39
6	425	1,77	1,4	2,5	22	24	0,56
7	755	1,75	1,4	1,2	26	47	0,53
8	1337	3,35	1,9	3,8	14	300	0,75
9	79	1,32	1,2	1	24	15	0,28
10	77	1,17	1,1	1	19	15	0,24
11	276	1,9	1,4	2,5	16	24	0,55
12	205	1,25	1,2	1,3	3	9	0,36
13	391	1,5	1,3	1,7	5	17	0,54
14	47	1,16	1	1,1	12	2	0,26

Для проведення досліджень в широкому спектрі частот між обмоткою та корпусом машини була прикладена напруга прямокутної форми частотою 1 кГц (рис. 1).

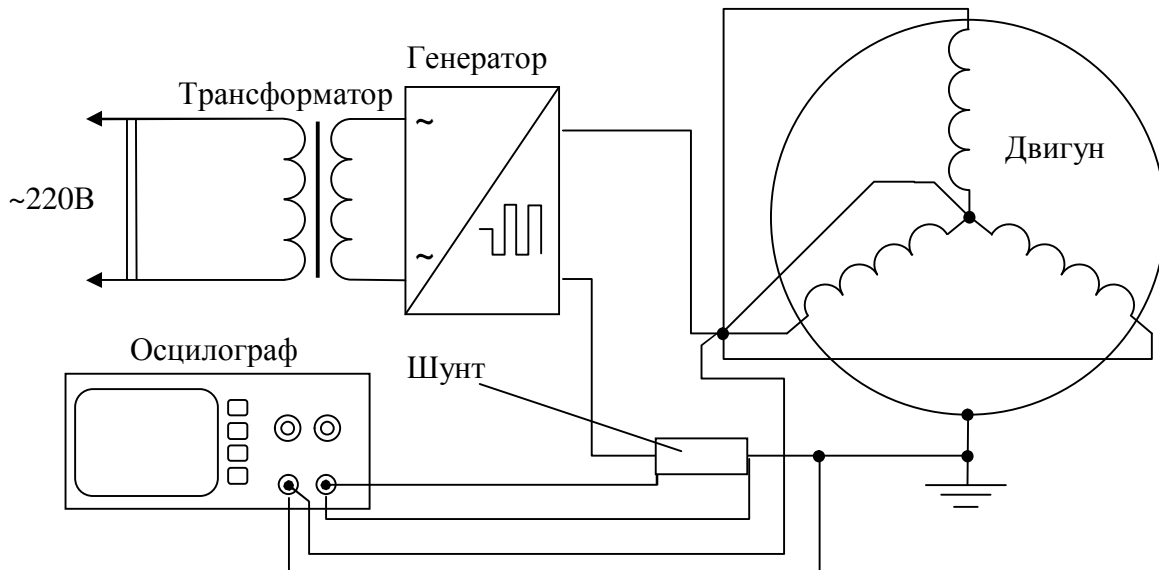


Рис. 1. Схема вимірювання тангенса кута діелектричних втрат у широкому спектрі частот

На основі отриманих осцилограм напруги та струму розраховано значення $\tan \delta$ на частотах від 1 до 100 кГц та побудовано гістограми залежності $\tan \delta(f)$ (рис. 2, 3).

Як видно з рисунків, для двигунів з погіршеним станом ізоляції (двигуни № 3, 4, 9, 10, 14) гістограма залежності $\tan \delta(f)$ має більшу щільність заповнення. Для двигунів із задовільним станом ізоляції (особливо для двигуна №8) гістограма залежності $\tan \delta(f)$ має, певною мірою, меншу щільність.

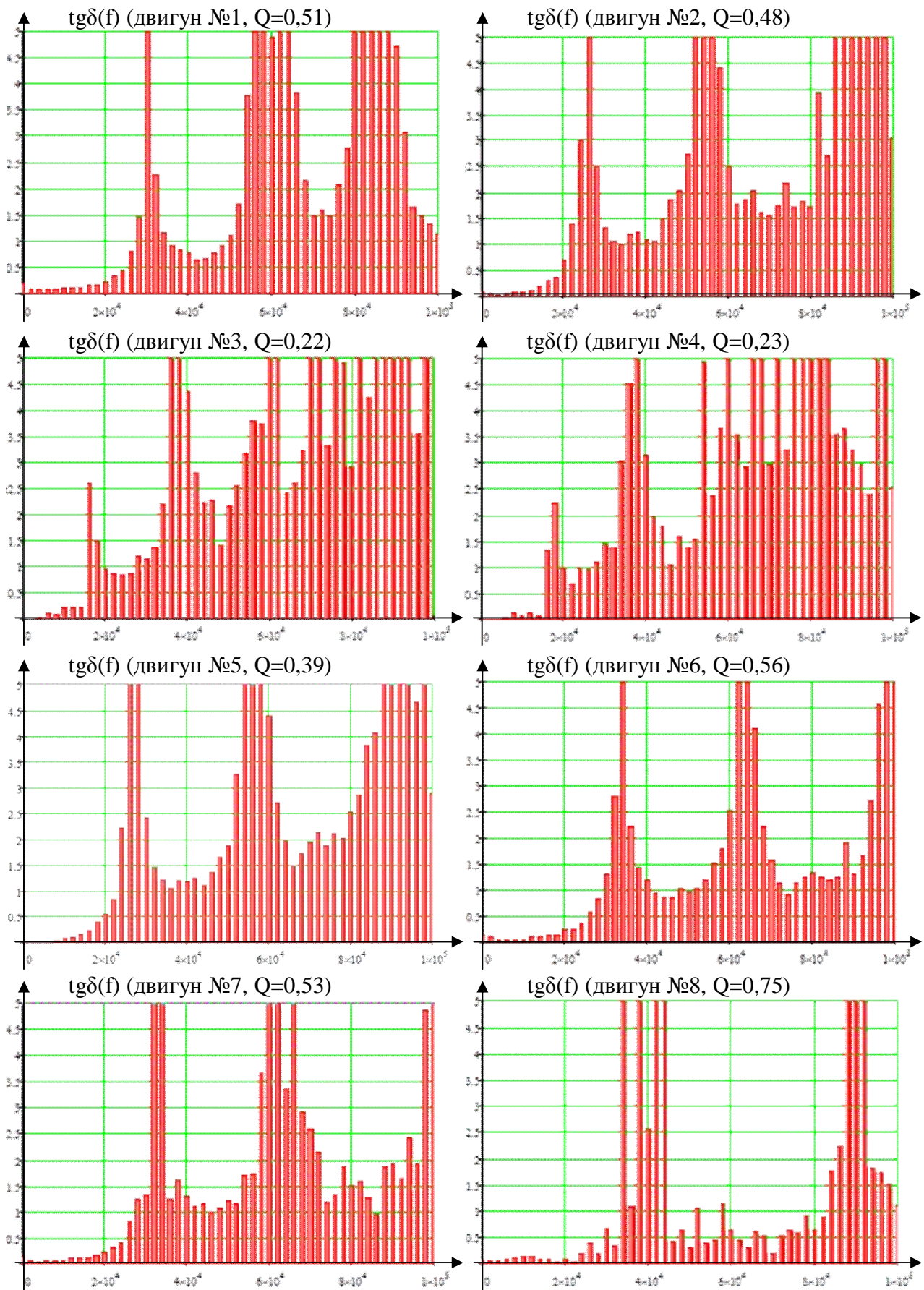


Рис. 2. Гістограми результатів розрахунків $\text{tg}\delta$ на частотах від 1 до 100 кГц (двигун №1-8)

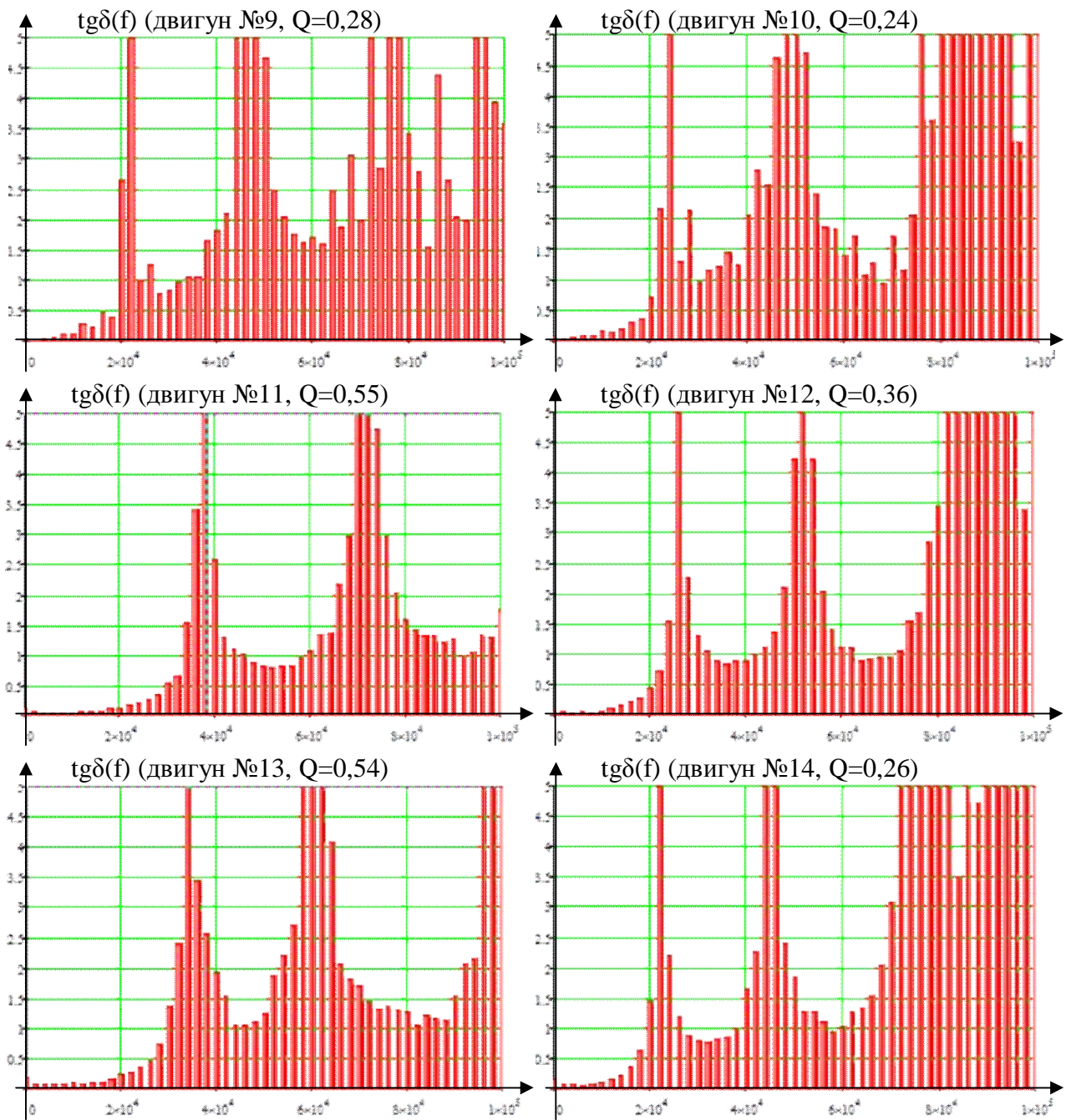


Рис. 3. Гістограми результатів розрахунків $tg\delta$ на частотах від 1 до 100 кГц (двигуни №9-14)

Для кількісної оцінки щільності гістограм використовуємо середнє арифметичне значення

$$tg d_{cp} = \frac{\sum_{f=1}^{100} (tg d(f))}{100}, \quad (2)$$

Аналіз даних, наведених у табл. 3, підтверджує зв'язок між технічним станом ізоляції та середнім арифметичним значенням залежності $tg\delta(f)$ – чим гірше стан ізоляції, тим більше середнє арифметичне значення $tg\delta(f)$.

**Порівняння результатів стандартних вимірювань та вимірювань $tg\delta$
у широкому спектрі частот**

№ двигуна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Q	0,51	0,48	0,22	0,23	0,39	0,56	0,53	0,75	0,28	0,24	0,55	0,36	0,54	0,26
tgδ_{ср}	2,07	2,11	2,86	2,62	2,31	1,53	1,72	1,21	2,28	2,45	1,38	2,17	1,67	2,41

Висновки

Виконані дослідження вказують на зв'язок поточного технічного стану ізоляції зі спектром тангенса кута діелектричних втрат. Подальший розвиток досліджень у цьому напрямку є перспективним для створення нового методу діагностики стану ізоляції, який буде доповнювати існуючі методи та дозволить підвищити достовірність оцінки поточного технічного стану ізоляції.

Список літератури

1. Худий, Є.Г. Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин [Текст]/ Є.Г. Худий, І.І. Пельтек // Вісник Національного технічного університету "ХПІ: сер. «Електротехніка, електроніка та електропривод». – 2010. – № 31 – с. 549-550.
2. Худий, Є.Г. Діагностика стану ізоляції електричних машин [Текст]/ Є.Г. Худий // Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип.84. – с.197-203.
3. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов [Текст]/ Б.М. Тареев – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
4. Забокрицкий, Е.И. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики. [Текст]/ Е.И. Забокрицкий – К.:Наук. дума, 1985. – 340 с.
5. Jan Subocz. Contemporary Diagnostic Methods of HV Rotating Machine and Transformer Insulation / Jan Subocz, Marek Szrot, Janusz Płowucha, Ryszard Malewski // CIGRE WG D1.33 – 2005. – A2-209. – 237 с.
6. Bhumiwat S.A. Field Experience in Insulation Diagnosis of Industrial High Voltage Motors using Dielectric Response Technique / S.A. Bhumiwat // 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, QC, Canada. – 2009. – 678 с.

Рекомендовано до друку: доцентом Головченко А.С.

УДК 621.313.04

Є.Г. Худий, І.І. Пельтек

(Україна, Дніпропетровськ, Національний гірничий університет)

СТАН ІЗОЛЯЦІЇ ТА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ. ДОСВІД ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Вступ

Відомо [1], що причиною аварій електричних машин є пошкодження ізоляції (понад 40% у порівнянні з іншими факторами). Ізоляційна конструкція елект-

ричних машин зазвичай має складну багатошарову структуру. Зміна у часі фізико-хімічних показників, що характеризують процес старіння ізоляції, проявляється у вигляді мікротріщин, мікропор, утворень молекулярних структур провідникового походження та інших дефектів. Зважаючи на умови, що впливають на електричну міцність ізоляції, слід зробити висновок про необхідність врахування структури та кількості дефектів. Водночас при виконанні процесу діагностування технічного стану ізоляції слід враховувати не тільки енергію хімічних зв'язків та масштаби дефектів діелектричної речовини, але й умови експлуатації електричної машини. Методами неруйнівного контролю неможливо визначити енергію хімічних зв'язків та оцінити ступінь дефектів (для цього застосовуються методи руйнівного контролю). У процесі технічного обслуговування і ремонту за фактичним станом найбільшого поширення набули неруйнівні методи діагностики, які, однак, на сьогодні потребують подальшого вдосконалення.

Аналіз досліджень і публікацій

Методи контролю стану ізоляції, які базуються на вимірах неелектричних величин [2, 3], потребують точної інформації про фізичні властивості матеріалів та коефіцієнтів, які зазвичай неможливо виміряти або отримати. Крім того, ці параметри та коефіцієнти з часом змінюються. Найбільш розповсюдженими є методи неруйнівного контролю технічного стану ізоляції за електричними явищами. Цим методам присвячені роботи Серебрякова О.С., Чернишова В.О., Автаєва М.О., але вони орієнтовані або на вузький клас електричних машин, або на певний режим вимірювання (без відключення або з відключенням від мережі), що значно обмежує їх застосування.

Мета роботи

Огляд сучасних методів діагностики технічного стану ізоляції електричних машин, опис нового підходу до оцінювання технічного стану ізоляції з урахуванням широкого спектра параметрів, що характеризують її стан.

Викладення основного матеріалу

Методи неруйнівного контролю можна класифікувати за параметром, що вимірюється або розраховується. До цих параметрів належать: опір постійному струму, коефіцієнт абсорбції, індекс поляризації, тангенс кута діелектричних втрат, рівень зворотної напруги, інтенсивність та амплітуда часткових розрядів. Окреме використання цих методів не дозволяє адекватно оцінити технічний стан ізоляції. Опір постійному струму дозволяє виявити лише грубі дефекти, а для сухої пошкодженої ізоляції зі значним строком служби опір може дорівнювати опорі нової ізоляції. Коефіцієнт абсорбції та індекс поляризації значно залежать від зволоженості повітря та температури ізоляції, тому результати вимірювань дуже складно інтерпретувати. Інколи мають місце випадки, коли результат діагностики за частковими розрядами вказує на критичний стан ізоляції, але двигун ще працює значний час без аварій [4]. Результати досліджень на 15-ти двигунах з різним віком ізоляції виявили, що $\tan\delta$ також не є однознач-

ним показником для визначення стану ізоляції. Так, у деяких двигунів із 30-річним строком служби ізоляції (при цьому майже всі показники виходили за допустимі діапазони) спостерігався $\text{tg}\delta$ навіть меншим за $\text{tg}\delta$ двигунів зі строком служби ізоляції 1 рік. Складність інтерпретації результатів вимірювань за кожним окремим параметром пов'язана із залежністю цих результатів від умов вимірювань (температура, вологість) та природи дефектів (фізичне старіння, хімічне старіння, забруднення і т.д.). Ці умови і створюють розбіжності в результатах різних параметрів. Для покращення інтерпретації результатів вимірювань необхідно розглядати їх не окремо, а в комплексі. У роботі [5] запропоновано використовувати інтегральний показник ТРІ (узагальнений індекс поляризації). Однак і цей метод розглядає ізоляцію лише з точки зору її реакції на вплив постійного струму, але зазвичай ізоляція електричних машин знаходиться під дією змінного струму. З урахуванням цього необхідно проводити комплексні вимірювання всіма доступними методами.

Отже, кожен з параметрів, що розглядається, окремо не надає достатньої інформації для прийняття рішення про необхідність проведення ремонту електричної машини та визначення масштабу цього ремонту. Пропонується враховувати всі параметри, що характеризують технічний стан ізоляції, одночасно. Це дозволить значно підвищити достовірність оцінки технічного стану ізоляції. Для врахування всіх параметрів необхідно попередньо виконати їх нормування, тобто звести кожен параметр до одиниці. Пропонується за базову величину прийняти діапазон зміни параметра від найгіршого значення до найліпшого. Виходячи з базового діапазону для кожного параметра, визначається коефіцієнт відповідності нормам K_n . Якщо параметр знаходиться на максимально припустимій межі, то $K_n=0$. Якщо величина параметра дорівнює найкращому значенню з базового діапазону, то $K_n=1$.

Зі всього різноманіття параметрів неможливо виділити групу або групи параметрів, які могли б у рівній мірі визначати технічний стан ізоляції. Тому необхідно враховувати вагомість кожного з параметрів. Для цього кожному параметру повинен відповідати ваговий коефіцієнт m . Для визначення цього коефіцієнта застосовано метод аналізу ієрархій (МАІ) [6]. МАІ – один із найпоширеніших методів визначення вагових коефіцієнтів у статистичному аналізі. Для визначення вихідних даних для МАІ були проведені дослідження в умовах спеціалізованого електроремонтного підприємства з 5-ма електричними машинами з різним станом ізоляції. Технічний стан ізоляції оцінювався методами руйнівного контролю (хімічний аналіз, аналіз під мікроскопом, випробування на електричну міцність).

У методі аналізу ієрархій попарно порівнюються різні параметри. Потім порівнюються результати аналізу технічного стану різних зразків ізоляції за всіма параметрами окремо. Всі результати порівнянь заносяться до матриць, за якими розраховуються вагові коефіцієнти. Сума всіх вагових коефіцієнтів дорівнює 1. Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

**Вагові коефіцієнти параметрів ізоляції
для комплексної оцінки її технічного стану**

Параметр	Позначення	Ваговий коефіцієнт
Опір постійному струму	R_{60}	0,045
Коефіцієнт абсорбції	$K_{абс}$	0,149
Коефіцієнт нелінійності	$K_{нл}$	0,049
Коефіцієнт діелектричної абсорбції	DAR	0,189
Індекс поляризації	PI	0,194
Тангенс кута діелектричних втрат	$tg\delta$	0,185
Постійна часу релаксації	τ	0,189
РАЗОМ		1

При комплексному оцінюванні технічного стану ізоляції електричних машин для кожного i -го параметра враховується його нормоване значення K_{ni} та ваговий коефіцієнт m_i . Комплексний показник технічного стану ізоляції розраховується за формулою

$$Q = \sum_{i=1}^N (K_{ni} \cdot m_i).$$

У табл. 2 наведені результати досліджень стану ізоляції електричних машин напругою 6 кВ на діючих промислових установках. Порівнюючи результати досліджень з відомостями про експлуатацію, можна сказати, що оцінювання за комплексним показником надає адекватну інформацію про поточний технічний стан ізоляції.

Таблиця 2.

Результати досліджень та розрахунків комплексного показника

№ двигуна	P , МВт	Нормоване значення параметра, K_n							Q	Строк служби ізоляції, роки
		R_{60}	$K_{абс}$	$K_{нл}$	DAR	PI	$tg\delta$	t		
1	2600	0	0	0,13	0	0	0,84	0	0,16	20
2	2000	0	0	0,8	0	0	0,69	0	0,17	23
3	3200	1	1	1	0,67	0,5	0,61	0	0,58	3
4	2000	1	1	1	0,67	0,07	0,54	0	0,48	4
5	8000	1	1	1	1	0,93	0,8	0,1	0,78	1
6	4000	1	1	1	1	1	1	0,25	0,85	Нова ізоляція

Висновки

Комплексне оцінювання поточного технічного стану ізоляції забезпечує адекватні результати, зменшуючи при цьому ризик виникнення помилкових висновків. Комплексний показник технічного стану ізоляції може використовуватись для планування черговості ремонтних робіт. Подальше вдосконалення наведеного підходу полягає у підвищенні точності розрахунку вагових коефіцієн-

тів та встановленні на основі статистичних даних відповідності значень комплексного показника Q та необхідних дій, тобто необхідно визначити, при якому Q ізоляція потребує капітального ремонту, відновлювального ремонту або не потребує ремонту взагалі.

Список літератури

1. Петухов В.И. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.И. Петухов, В.О. Соколов. // Новости электротехники. – С.Пб.: ЗАО «Новости Электротехники», 2005. – № 1. – 63 с.
2. Грабко В.В. Математическая модель для диагностирования состояния изоляции работающей мощной электрической машины по ее тепловому портрету / В.В. Грабко // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – 178 с.
3. Суханкин Г.В. Компьютерная система акустической диагностики изоляции электрических машин / Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – 63 с.
4. Глинка Т.Я. Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянным током / Т.Я. Глинка, М.С. Якубец // Электротехника. – 2005. – № 7. – 104 с.
5. Обобщенный индекс поляризации как параметр контроля состояния изоляционных промежутков силовых трансформаторов / В.А. Чернышев, Е.В. Зенова, В.А. Чернов и др. // Материалы IV международной конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики». – 2009. – 653 с.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

Рекомендовано до друку: доцентом Головченко А.С.