

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Шутенко Олег Володимирович

УДК 621.314

**УДОСКОНАЛЕННЯ ДІАГНОСТИКИ СИЛОВИХ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ
ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТРИВАЛОГО СТАРІННЯ МАСЕЛ**

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бондаренко Володимир Омелянович,
Національний технічний університет “Харківський
політехнічний інститут”,
завідуючий кафедрою передачі електричної енергії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Набока Борис Григорович
Національний технічний університет “Харківський
політехнічний інститут”,
професор кафедри електроізоляційної і кабельної техніки

кандидат технічних наук, доцент
Абрамов Володимир Борисович
Національний технічний університет України “Київський
політехнічний інститут”,
доцент кафедри техніки та електрофізики високих напруг

Захист відбудеться " 25 " березня 2010 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий « » _____ 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Юр'єва О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з найбільш актуальних проблем сучасної електроенергетики є старіння устаткування. Понад 70 % силових високовольтних трансформаторів значно перевищили нормативний термін експлуатації – 25 років. Заміна застарілого устаткування проводиться повільно, тому найближчими роками в експлуатації будуть знаходитися все старіші трансформатори. Забезпечення надійної експлуатації таких трансформаторів є завданням державної ваги. Одним з недоліків існуючої системи діагностики трансформаторів є обмежені можливості раннього виявлення тих із них, де йде прискорена деструкція ізоляції внаслідок дії високих струмів та сильних електричних полів. Удосконалення діагностики принципово неможливе без врахування впливу на ізоляцію реальних експлуатаційних факторів. Якщо роль основних факторів, що визначають інтенсивність старіння масел – температури, вмісту кисню, хімічно активних компонентів – визначена достатньо повно (хоча дослідження проводилися в лабораторних умовах), то вплив факторів, що притаманні тривалій експлуатації високовольтних силових трансформаторів, висвітлені недостатньо. Практично відсутня інформація про закономірності дрейфу ізоляційних показників масел в умовах тривалого впливу сильних електричних полів, не досліджено зв'язок між струмами завантаження високовольтних трансформаторів і інтенсивністю старіння масел. Визначені положення обумовлюють актуальність науково-практичної задачі – удосконалення діагностики стану високовольтних силових трансформаторів на основі аналізу закономірностей тривалого старіння масел та складають напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» згідно плану науково-дослідних робіт в рамках держбюджетних тем МОН України «Розробка системи безперервного контролю внутрішньої електричної ізоляції обладнання об'єктів електричних систем (ДР № 0100U001673) та «Розробка теоретичних основ створення інформаційно-діагностичного комплексу для контролю ізоляції об'єктів електроенергетичної системи» (ДР № 0103U001512), де здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в удосконаленні діагностики силових високовольтних трансформаторів за рахунок виявлення і врахування впливів сильних електричних полів та великих струмів на закономірності тривалого старіння трансформаторних масел.

Для досягнення поставленої мети вирішено ряд завдань:

- досліджені фізичні закономірності дрейфу ізоляційних показників трансформаторних масел в умовах тривалої дії сильних електричних полів та високих струмів;

- виконано аналіз факторів, що притаманні тривалій експлуатації високовольтних силових трансформаторів (дії сильних електричних полів, великих струмів, перенапружень, струмів коротких замикань та ін.) на інтенсивність старіння трансформаторних масел;

- розроблено метод оцінки ступеня старіння трансформаторних масел з урахуванням фізичних закономірностей дрейфу ізоляційних показників і експлуатаційних факторів, що впливають на інтенсивність старіння масел;

- запропоновано метод інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів з урахуванням впливу аварійних режимів роботи електричної мережі;

- обґрунтовано метод прогнозування значень ізоляційних показників трансформаторних масел.

Об'єкт дослідження – тривалий (протягом 50 років) вплив великих струмів і сильних електричних полів на процеси погіршення ізоляційних характеристик трансформаторних масел в баках високовольтних силових трансформаторів.

Предмет дослідження – залежності ізоляційних характеристик трансформаторних масел від часу експлуатації в умовах дії сильних електричних полів, великих струмів, перенапружень, струмів коротких замикань та інших чинників, що притаманні експлуатації високовольтних трансформаторів.

Методи досліджень. Теоретичною базою досліджень є фундаментальні засади техніки та електрофізики високих напруг, фізики діелектриків та методів обробки експериментальних даних. Для аналізу процесів електричного та теплового старіння використовувались співвідношення Ареніуса та вирази для оцінки змін концентрацій розчинених у маслі газів під дією часткових розрядів. Для виявлення трансформаторів із значущим дрейфом ізоляційних показників масел використовувались методи аналізу часових рядів і однофакторний регресійний аналіз. Для оцінки впливу умов експлуатації на інтенсивність старіння трансформаторних масел – коваріаційний аналіз лінійних моделей. Для виділення груп трансформаторів з однаковою швидкістю старіння масел запропоновано критерій максимуму кореляційного відношення. Для дослідження впливу експлуатаційних чинників на інтенсивність старіння трансформаторного масла використано моделі багатофакторного дисперсійного аналізу. Для розробки методу оцінки старіння трансформаторних масел – метричні методи розпізнавання. Для розробки методу інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів – теорія кореляції і теорія нечіткої логіки. Для розробки методу прогнозування значень ізоляційних показників масла – нечіткі нейронні мережі.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. На основі аналізу експлуатаційних даних, вперше встановлено, що в умовах тривалої (до 50 років) дії великих струмів і сильних електричних полів фізико - хімічні показники трансформаторних масел змінюються нелінійно: після періоду індукції (прихованого протікання процесів старіння) настає період самоприскорення, протягом якого відбувається погіршення показників масел внаслідок накопичення продуктів старіння.

2. Вперше встановлено, що ранньою діагностичною ознакою розвитку в ізоляції високовольтних трансформаторів процесів іонізаційного старіння і термічної деструкції є поява систематичного тренда в часових залежностях вмісту газів вуглеводневого ряду; перевищення ж їх концентрацій регламентованих гра-

ничних значень (традиційний критерій) не завжди відображає пошкодження ізоляції, оскільки часто носить зворотний характер.

3. Отримав подальший розвиток аналіз впливу експлуатаційних факторів на погіршення ізоляційних характеристик масел; встановлено, що утворення в маслі водорозчинних кислот (найбільш небезпечних продуктів окислення) відбувається тільки в тих трансформаторах, для яких значення струмів завантаження перевищувало 50 % від номінального, впродовж останніх 13 років. Збільшення завантаження трансформатора з 10 до 50 % приводить до збільшення вмісту органічних кислот через 25 років експлуатації в 3,5 рази: з 0,029 до 0,102 мг КОН на 1 г масла.

4. Вперше встановлено, що під впливом струмів короткого замикання, перенапруг і інших аварійних режимів роботи електричних мереж зростання концентрацій газів спостерігається у всіх трансформаторах підстанції, що дозволяє розпізнати внутрішні та зовнішні причини газовиділення. Збільшення струму короткого замикання з 9 до 16 кА приводить до збільшення приростів концентрацій розчинених в маслі газів в 2 рази.

Практичне значення одержаних результатів роботи для електроенергетики: метод для оцінки ступеню старіння трансформаторних масел впроваджено в службах ізоляції та грозозахисту АК «Харківобленерго» і ВАТ «Сумиобленерго». Метод інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів для виявлення процесів іонізаційного старіння та термічної деструкції трансформаторних масел і основної ізоляції трансформаторів впроваджено в службах ізоляції і грозозахисту АК «Харківобленерго», ВАТ «Сумиобленерго» і в службі діагностики і захисту від перенапруг ХМЕС Північної електроенергетичної системи НЕК «Укренерго». Запропонований метод прогнозування значень ізоляційних показників масел, побудований на основі нечітких нейронних мереж впроваджено в службах ізоляції і грозозахисту АК «Харківобленерго», ВАТ «Сумиобленерго».

Розроблений метод обробки результатів періодичних випробувань стану трансформаторних масел використовується в науковій діяльності кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», при дослідженні процесів старіння ізоляції трансформаторів напругою 35 та 330 кВ.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХП» в лекційних курсах «Техніка та електрофізика високих напруг», «Математичні основи технічної діагностики», «Основи експлуатації об'єктів електроенергетичних систем», «Теорія планування експерименту».

Особистий внесок здобувача. Результати досліджень отримані здобувачем самостійно, серед них аналіз причин технологічних порушень і відмов високовольтних маслонаповнених трансформаторів, зібрано масив статистичних даних періодичних випробувань стану масел по 249 трансформаторам 110 кВ, вдосконалено метод статистичної обробки результатів випробувань, досліджено закономірності тривалого (до 50 років) старіння масел. Проаналізовано вплив сильних електричних полів, високих струмів, перенапружень і струмів короткого зами-

кання на інтенсивність старіння трансформаторних масел. Розроблено методи оцінки старіння трансформаторних масел, інтерпретації результатів хроматографічного аналізу і прогнозування значень ізоляційних показників масел. Загальне завдання підвищення експлуатаційної надійності високовольтних маслонаповнених трансформаторів та напрями досліджень поставлені науковим керівником.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на XII, XVI, XVII міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2004 р., 2008 р., 2009 р.); III промисловій конференції з міжнародною участю «Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах» (с. Славське, Львівська обл., 2003 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці» (Львів, 2003 р.); II науково – технічному семінарі «Невизначеність вимірювань: нормативні, наукові, методичні і виробничі аспекти» (Харків, 2005 р.); IX симпозиумі «Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики» (Істра, Московська обл., 2007 р.); семінарі «Проблеми експлуатації трансформаторів струму та напруги, методи дефектації, діагностика, державна метрологічна атестація та забезпечення експлуатації після тривалої роботи обладнання» (Львів, 2008 р.); II міжнародній науково-практичній конференції «Кабельна техніка сучасного рівня і ізоляція. Перегляд «Норм і методів випробувань і вимірювань електрообладнання і апаратів електроустановок споживачів» (Харків, 2008 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, 2008 р.); V науково-технічній конференції «Стан електричних мереж обленерго і основні напрями підвищення їх ефективності. Зменшення втрат електроенергії в електромережах» (сmt Корєїз, AP Крим, 2008 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 21 роботу, зокрема 1 монографія, 16 статей у фахових виданнях ВАК.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, 8 додатків і списку використаних джерел. Загальний об'єм дисертації складає 288 сторінок, в тому числі 38 рисунків по тексту, 27 рисунків на 24 окремих сторінках, 17 таблиць по тексту, 1 таблиці на 1 окремій сторінці, 8 додатків на 103 сторінках та список використаних літературних джерел із 99 найменувань на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета і завдання досліджень. Приведені характеристики об'єкту і предмету досліджень, викладена наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, наведені відомості про публікації здобувача і апробації результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** на основі аналізу інформаційних джерел і публікацій

розглянуто основні види технологічних порушень високовольтних маслонаповнених трансформаторів. Виконано порівняльний аналіз методів оцінки стану трансформаторних масел, які використовуються в Україні та за кордоном. Розглянуто методи інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів, які застосовуються провідними світовими електроенергетичними компаніями (S.D. Myers – США, Hydro Quebec – Канада, National Grid – Англія, Siemens Trafo Union, ABB – Німеччина та інш.). Результати виконаного аналізу дозволили сформулювати основні напрями теоретичних і експериментальних досліджень і постановку завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ роботи присвячений аналізу залежностей ізоляційних показників трансформаторних масел від тривалості експлуатації в умовах дії сильних електричних полів та великих струмів. Класичні моделі, що характеризують старіння ізоляції під дією напруженості електричного поля і температури, доповнені статистичним аналізом часових рядів і статистичними моделями старіння масел. Для побудови таких моделей сформовано масив початкових даних на основі результатів періодичних випробувань трансформаторних масел по 249 трансформаторам напругою 110 кВ і потужностями від 6,3 до 63 МВА, по 6 областям України. Загальний об'єм масиву даних склав 44728 вибіркового значень по 20 ізоляційним показникам (таблиця 1).

Математична модель часових рядів має вигляд

$$\vec{x}_t = \vec{G}_t + \vec{\eta}_t + \vec{\xi}_t, \quad (1)$$

де \vec{G}_t – систематична складова, що характеризує незворотні зміни в об'єкті (тренд); $\vec{\eta}_t$ – періодична складова, що характеризує зворотні зміни; $\vec{\xi}_t$ – стохастична складова, що не пов'язана зі старінням.

Перевищення систематичної складової \vec{G}_t над двома іншими $\vec{\eta}_t$ і $\vec{\xi}_t$ свідчить про дрейф параметрів масел, тобто значущий вплив на них тривалості експлуатації. Для виділення таких часових рядів використовувався однофакторний регресійний аналіз. Вплив тривалості експлуатації визнавався значущим, якщо F - статистика перевищувала табличне значення при основній гіпотезі $H_0: b_1=0$ – кутовий коефіцієнт регресії дорівнює нулю, тобто лінія тренда паралельна осі часу. Результати регресійного аналізу наведені в табл. 1. В чисельнику – загальні кількості часових рядів, у знаменнику - кількості рядів з дрейфом параметрів (з трендом). Останніх, як виявилось, близько 30 % від усіх результатів спостережень. Тобто, третина всіх даних відображає процеси незворотного старіння масел. Аналіз дозволив виявити значимі відмінності між часовими залежностями фізико-хімічних показників масел і вмістом розчинених в маслі газів. Якщо для фізико-хімічних показників переважною є систематична складова \vec{G}_t (регулярний тренд), то для залежностей вмісту розчинених в маслі газів (у бездефектних трансформаторах), переважаючою є зворотна складова $\vec{\eta}_t$. Ці відмінності обумовлені різними механізмами старіння: іонізаційним (під дією напруженості електричного поля) – для вмісту розчинених в маслі газів, тепловим (під дією струмів завантаження) – для фізико-хімічних показників.

Таблиця 1

Ізоляційні та фізико-хімічні показники трансформаторних масел та об'єми вибірок: кількості часових рядів, об'єми вибірових значень до (в чисельнику) та після (в знаменнику) регресійного аналізу для виділення трендів.

№ п./п	Показник масел	Об'єм вибірових значень	
		кількості рядів	кількості значень
1	Температура спалаху	230 / 102	3746 / 1957
2	Кислотне число	231 / 137	3741 / 2458
3	Пробивна напруга	231 / 66	3723 / 937
4	tgδ при 20°C	31 / 13	268 / 121
5	tgδ при 70°C	49 / 23	397 / 210
6	tgδ при 90°C	60 / 46	570 / 439
7	Колір масла	121 / 76	2108 / 1558
8	Вміст водорозчинних кислот	46 / 37	1191 / 1032
9	Вміст вологи	73 / 25	1635 / 871
10	Питома вага	6 / 6	70 / 70
11	Вміст механічних домішок	1 / 0	9 / 0
12	Вміст осаду	1 / 0	5 / 0
13	Вміст CO	102 / 5	2598 / 102
14	Вміст CO ₂	164 / 10	4306 / 336
15	Вміст CH ₄	152 / 45	3847 / 1128
16	Вміст C ₂ H ₂	154 / 34	3937 / 957
17	Вміст C ₂ H ₄	162 / 44	4159 / 1075
18	Вміст C ₂ H ₆	148 / 28	3773 / 707
19	Сума газів вуглеводневого ряду	157 / 41	3993 / 1028
20	Вміст H ₂	22 / 0	652 / 0
Всього		2141 / 738	44728 / 14986

Для виявлення різниць у швидкості дрейфу показників в різних трансформаторах був використаний коваріаційний аналіз. Результати вимірювань представлені як:

$$Y_{ji} = \alpha_j + \beta_j \cdot t_{ji} + Z_{ji}, \quad (2)$$

де i – номер виміру $i = \overline{1, n_j}$ для j -го показника; t_{ji} – час i -го виміру значень j -го показника; α_j, β_j – часткові коефіцієнти регресії для значень j -ї групи результатів виміру; Z_{ji} – випадковий неконтрольований залишок.

Як основна гіпотеза перевірялася гіпотеза $H_0: (a_1=a_2=\dots=a_k=a; b_1=b_2=\dots=b_k=b)$, підтвердження якої відповідає однаковій швидкості старіння масел у всіх трансформаторах, що аналізуються. Цю гіпотезу зручно розбити на чотири частки, кожна з яких можна перевіряти окремо:

$H_0^{(1)}$: лінії регресії паралельні, тобто $a_1 = b_2 = \dots = b_k$;

$H_0^{(2)}$: групові середні лежать на прямій (2);

$H_0^{(3)}$: кутовий коефіцієнт цієї прямої рівний b_C , тобто збігається з a_1, b_2, \dots, b_k ;

$H_0^{(4)}$: групові вільні члени збігаються, тобто $a_1 = a_2 = \dots = a_k$.

Для перевірки даних гіпотез знайдено повне дисперсійне розкладання (2). Коваріаційний аналіз по кожному з показників якості масла показав наявність адитивного і мультиплікативного зсуву між рядами показників. Це означає, що швидкість тренду залежить від якості і типу масла та режиму експлуатації трансформатора.

Для формування груп трансформаторів з однаковою швидкістю дрейфу показників запропоновано критерій максимуму кореляційного відношення:

$$\hat{\eta}_{y/x} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot \bar{y}_i - \bar{y}^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_j} \tilde{y}_{ij} - \bar{y}^2}, \quad (3)$$

де N – об'єм вибірки; $\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \tilde{y}_{ij}$ – умовне середнє, отримане для значень x_i

при $j = \overline{1, m_j}$; $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i$ – загальне середнє по всіх експериментальних точках;

\tilde{y}_{ij} – результати спостережень в i -тій експериментальній точці.

За результатами обробки по кожному з показників масла, що характеризують зміну його ізоляційних властивостей, складено кілька підмножин однорідних даних, які визначили допустимі межі дрейфу параметрів.

Третій розділ роботи присвячений дослідженню впливу сильних електричних полів та великих струмів, що притаманні експлуатації високовольтного електроенергетичного обладнання на інтенсивність погіршення ізоляційних характеристик масел.

Двохфакторний перехресний дисперсійний аналіз показав наявність значущого систематичного зміщення математичних очікувань показників як по осі часу (спостерігається дрейф показників), так і між підмножинами показників (старіння протікає з різною швидкістю). При цьому ефекти від зміни рівнів факторів (тривалості експлуатації і номера підмножини) є неадитивні. Взаємопов'язаність між ними є відображенням різних умов експлуатації масел.

Дисперсійний аналіз перевірки часових залежностей показників на відхилення від лінійності дозволив встановити, що для всіх аналізованих показників залежності від часу є нелінійними. Для фізико-хімічних показників масел виділено дві характерні ділянки: індукційний період (прихованого протікання процесів старіння) і період самоприскорення, протягом якого погіршення показників масел відбувається за рахунок накопичення продуктів старіння. Дані ділянки приведені на рис. 1, горизонтальні лінії характеризують індукційний період, похилі – період самоприскорення. Часові ряди показників в кожній з підмножин мають приблизно однакову тривалість індукційного періоду і швидкості дрейфу на ділянці самоприскорення.

Рис. 1. Залежності кислотного числа трансформаторного масла від тривалості експлуатації.

Вдалося встановити істотні відмінності між складом підмножин фізико-хімічних показників і розчинених в маслі газів. Якщо підмножини фізико-хімічних показників включають трансформатори з різних областей України, то підмножини розчинених в маслі газів включають виключно трансформатори встановлені на одній підстанції або трансформатори з сусідніх підстанцій. Це свідчить про різну природу факторів, що визначають дрейф фізико-хімічних показників і розчинених в маслі газів. Якщо дрейф фізико-хімічних показників трансформаторних масел відбувається під дією температури (вплив великих струмів завантаження), то на варіації вмісту розчинених в маслі газів більшою мірою впливають процеси, характерні для сильних електричних полів (часткові і дугові розряди різної потужності, перекриття). Ці процеси розвиваються в трансформаторі як внаслідок погіршення властивостей ізоляції (іонізаційне старіння), так і внаслідок дії на трансформатор струмів і напруги, які перевищують номінальні значення (перенапруги, короткі замикання).

Досліджено вплив струмів завантаження високовольтних силових трансформаторів на інтенсивність старіння масел. Кількісна оцінка проводилася з використанням середнього значення коефіцієнта завантаження трансформаторів. Вплив завантаження трансформаторів на кислотне число масла ілюструє рис. 2.

а)

б)

Рис. 2 – Кореляційні залежності між середньою завантаженістю і інтенсивністю старіння, характерною для виділених підмножин М1 – М6.

а) залежність кислотного числа масла від часу експлуатації.

б) розподіл трансформаторів по середній завантаженості в кожній з підмножин М1 – М6.

Враховуючи нелінійний характер залежностей показників від тривалості експлуатації, були отримані залежності тривалості індукційного періоду і приросту показників через 25 років експлуатації від середнього завантаження трансформаторів, які приведені на рис. 3.

a)

б)

в)

г)

Рис. 3. Залежності тривалості індукційного періоду і приросту показників масел від середнього завантаження трансформаторів для:

- a)* кислотного числа;
- б)* вмісту водорозчинних кислот;
- в)* температури спалаху;
- г)* пробивної напруги.

Отримані залежності дозволяють прогнозувати поведінку показників масел ще на етапі проектування електричної мережі, що дозволить оптимізувати періо-

дичність контролю масел і перейти на ремонт трансформаторів за технічним станом, а не за календарним планом.

При аналізі чинників концентрацій, що впливають на зміну розчинених в маслі газів, особлива увага приділялася впливу струмів і напруги, що перевищують номінальні значення внаслідок аварійних режимів роботи електричної мережі. Встановлено, що короткі замикання, перенапруги і інші пошкодження на підстанції, пов'язані з дією аномальних струмів і напруг призводять до короткочасного зростання концентрацій розчинених в маслі газів. При цьому такі концентрації можуть на декілька порядків перевищувати граничні значення. Зростання концентрацій газів при перенапругах обумовлене переходом початкових часткових розрядів в критичні, а при коротких замиканнях – перегрівом обмоток трансформаторів (струми короткого замикання як мінімум в 3 рази перевершували номінальні струми трансформаторів) і витискування газових і повітряних включень з обмотки під дією електродинамічних сил, що призводить до деформації обмотки. Встановлені залежності приростів концентрацій розчинених в маслі газів від значення струмів короткого замикання (рис. 4 а) і від кількості днів між датами відбору проб масла і датами проведення аналізів (рис. 4 б). Збільшення струму короткого замикання з 9 до 16 кА приводить до збільшення приростів концентрацій розчинених в маслі газів в 2 рази, а збільшення інтервалу між датами відбору проб масла і датами проведення аналізів до місяця призводить до зниження вмісту газів вуглеводневого ряду в пробах на порядок. Також встановлено, що при дії аварійних режимів роботи мережі зростання концентрацій газів спостерігається у всіх трансформаторах підстанції (спостерігається значуща кореляція між газами сусідніх трансформаторів), що дозволяє розпізнати внутрішні і зовнішні причини газовиділення.

Рис. 4. Залежності приростів суми газів вуглеводневого ряду від:

- а) струму короткого замикання;
- б) від інтервалу між датами відбору проб і датами проведення аналізів.

Досліджено статистичні зв'язки між показниками масел. В результаті встановлено, що значима кореляція присутня тільки між тими показниками, які характеризують один і той же процес старіння. Так, для термоокислювальних процесів вдалося встановити наявність кореляції між кислотним числом масла і вмістом водорозчинних кислот, кольором масла, тангенсом кута діелектричних втрат,

вмістом вологи. Не виявлено значимого зв'язку між температурою спалаху і іншими показниками за виключенням питомої ваги масла. Крім того, вдалося встановити незначні залежності: між кислотним числом масла і CO_2 , вмістом водорозчинних кислот і CO_2 . Для розчинених у маслі газів встановлено наявність зв'язку серед вмісту газів; CH_4 та C_2H_4 ; CH_4 та C_2H_6 ; C_2H_4 та C_2H_6 ; C_2H_4 та C_2H_2 ; C_2H_2 та H_2 .

Четвертий розділ роботи присвячений удосконаленню діагностики силових високовольтних трансформаторів за рахунок врахування виявлених впливів сильних електричних полів та великих струмів на закономірності тривалого старіння трансформаторних масел.

Наявність функціонального зв'язку між показниками якості масла, часом експлуатації і струмами завантаження трансформаторів дозволяє використовувати детерміністичні методи для оцінки ступеню старіння масла. Отримані підмножини однорідних даних можна розглядати як функції часу, які є еталонними траєкторіями, що описують зміни цих показників з часом. При такому підході оцінка ступеню старіння масла зводиться до порівняння дійсних траєкторій з еталонними, що дозволяє встановити, до якого з класів відноситься об'єкт за своїм станом. Для кожної з підмножин показників були розраховані діаметри і центри траєкторій. Враховуючи жорсткий зв'язок між траєкторіями показників і завантаженням трансформаторів (рис. 2), загальну процедуру оцінки ступеня старіння масла можна сформулювати таким чином: часовий ряд перевіряється на приналежність одночасно трьом підмножинам даних. При цьому перша підмножина має середнє завантаження рівне середньому завантаженню трансформатора; друга – найближчу більшу; третя найближчу – меншу. Якщо ряд належить першій підмножині, то темп старіння масла вважається нормальним. Якщо часовий ряд належить підмножині з вищим значенням завантаження, то незалежно від того перевищило значення показника граничне значення чи ні, старіння вважається за аномальне і рекомендується застосувати заходи по інгібуванню процесів старіння. Якщо часовий ряд показника належить підмножині з меншим завантаженням, то з'ясовуються причини, за яких сталося зниження значення показника. Вирішення про приналежність тимчасового ряду до i -тої траєкторії проводиться згідно виразу

$$L_i = \min, \text{ то } x \in D_i, \quad (4)$$

де $L_i = \left(\sum_{j=1}^N |x_j - a_j|^v \right)^{\frac{1}{v}}$ - діагностична відстань між центром еталонної траєкторії і часовим рядом в j -й момент часу.

В існуючих методах інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів основним критерієм наявності дефекту, що розвивається, є концентрації розчинених в маслі газів. Виконані дослідження показали, що перевищення концентрацій газів не лише граничних, але і гранично-допустимих значень можливо і в бездефектних трансформаторах. Встановлено, що діагностичною ознакою наявності дефекту може служити не лише концентрація розчинених

в маслі газів, але і характер їх зміни в часі. Для кожного із станів трансформатора встановлений свій чітко визначений тип залежностей розчинених в маслі газів від часу експлуатації. Так, для бездефектних трансформаторів залежності газів вуглеводневого ряду від часу експлуатації носять стохастичний характер (практично відсутня значуща кореляція газів з часом і між собою). За наявності зовнішніх дій відбувається одночасне зростання концентрацій деяких газів вуглеводневого ряду з подальшим їх зниженням (відсутня значуща кореляція газів з часом, але є значуща кореляція газів між собою). За наявності дефекту в трансформаторі для всіх газів вуглеводневого ряду властиво стан повної впорядкованості (значуща кореляція газів з часом і між собою). Позначимо результат перевірки умови зв'язку будь-якого з газів вуглеводневого ряду з часом змінною K_1 , яка має дві можливі реалізації $K_1=0$ – відсутність або незначуще зростання концентрації газів в часі і $K_1=1$ – значуще зростання. Результат перевірки зв'язку між газами вуглеводневого ряду позначимо через K_2 і прийемо $K_2=0$ при відсутності зв'язку і $K_2=1$ при його наявності. Зв'язок між однойменними газами в сусідніх трансформаторах позначимо як K_3 і прийемо $K_3=0$ при відсутності зв'язку і $K_3=1$ при його наявності. Вирішальне правило виявлення дефектів, що розвиваються, можна представити у вигляді табл. 2. Для формалізації прийняття рішення дане правило реалізоване за допомогою математичного апарату нечіткої логіки.

Таблиця 2

Вирішальне правило для виявлення дефектів, що розвиваються

Ключі			Стан
K_1	K_2	K_3	
0	0	0	Найвірогідніше дефект відсутній
0	0	1	Найвірогідніше дефект відсутній, картини газів ідентичні для всіх трансформаторів підстанції
0	1	0	Зростання концентрації газів без розвитку в часі, зовнішні дії
0	1	1	Зростання концентрації газів без розвитку в часі, картини газів ідентичні для всіх трансформаторів підстанції, зовнішні дії
1	0	0	Зростання концентрації окремих газів, необхідні додаткові аналізи
1	0	1	Зростання концентрації окремих газів, картини газів ідентичні для всіх трансформаторів підстанції, зовнішні дії
1	1	0	Наявність дефекту
1	1	1	Найвірогідніше інтенсивні зовнішні дії, необхідні додаткові аналізи

Наявність функціональних залежностей між завантаженням трансформаторів і інтенсивністю дрейфу показників масел, а також значимого статистичного зв'язку між показниками масел дає можливість ефективного застосування техніки нечітких нейронних мереж для прогнозування значень показників. Прогнозування кислотного числа проводилось за часом експлуатації та коефіцієнтам завантаження, а прогнозування кольору масел за часом експлуатації та кислотним числом масел.

Прогнозування кислотного числа трансформаторного масла. У створеній нечіткій нейронній мережі всього є 16 входів: 10 – за часом і 6 – за коефіцієнтами завантаження. Було обрано дві функції приналежності для кожної вхідної змінної.

Кожна з функцій є трапецеїдальною. Кількість циклів навчання склало 600 епох. Помилка навчання склала $3,01 \cdot 10^{-6}$ мг КОН на 1 г масла. Після чого мережа була протестована на вибірці з даних, які не використовувалися в навчальній вибірці. В результаті поведінку мережі можна вважати за цілком адекватну: середньоквадратична похибка прогнозу склала 0,00292 мг КОН на 1 г масла, що, враховуючи обмежений об'єм навчальної вибірки, є прийнятним.

Прогнозування значення кольору масла. Створена мережа має 20 входів: 10 входів за часом і 10 входів за кислотним числом. Так само як і для попередньої мережі, обрано дві функції приналежності для кожної вхідної змінної, ці функції є трапецеїдальними. Кількість циклів навчання нейронної мережі склало 500 епох, помилка навчання - 0,324 КЧ. Далі мережа тестувалася на незалежній вибірці, середньоквадратична похибка прогнозу склала 0,352 ЦЧ, що дозволяє визнати навчену нейронну мережу адекватною.

У додатках приведені результати аналізу початкової вибірки, результати коваріаційного аналізу, статистичні характеристики однорідних підмножин показників масел, результати двохфакторного перехресного дисперсійного аналізу, результати перевірки часових рядів показників на відхилення від лінійності, результати дослідження стохастичного зв'язку між показниками якості масел. Представлено процедури нечіткого виводу для інтерпретації результатів ХАРГ, а також наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу удосконалення діагностики силових високовольтних трансформаторів, яка полягає у виявленні і урахуванні закономірностей старіння трансформаторних масел в умовах тривалих дій сильних електричних полів, робочих температур, а також короткочасних дій аварійних режимів.

Основні теоретичні і практичні результати виконаної роботи полягають в наступному:

1. Виконаний аналіз існуючих методів діагностики стану трансформаторних масел високовольтних трансформаторів виявив ряд суттєвих недоліків, зокрема: відсутність можливості оцінки стану трансформаторних масел в області допустимих значень показників, що не дозволяє своєчасно виявляти трансформатори з аномальним старінням масел; відсутність можливостей для прогнозу залишкового ресурсу і значень показників якості масел, що не дозволяє оптимізувати процес експлуатаційного контролю і здійснити перехід на ремонт по стану; відсутність можливості розпізнавати процеси іонізаційного старіння і термічної деструкції на ранній стадії їх розвитку. У зв'язку з цим виникає об'єктивна необхідність в удосконаленні методів діагностики стану трансформаторних масел високовольтних трансформаторів.

2. Отримані залежності ізоляційних показників масел від часу при тривалій дії сильних електричних полів і робочих температур; встановлений їх нелінійний характер, дана інтерпретація характерних ділянок залежностей по кожному з по-

казників;

3. Отримана кількісна оцінка впливу завантаження трансформаторів на інтенсивність дрейфу показників масел, зокрема залежності тривалості індукційного періоду (час, протягом якого значення показників не змінюються) і значення приростів показників масел через 25 років експлуатації від значень середнього завантаження трансформаторів за даний період. Встановлено, що утворення в маслі водорозчинних кислот (найбільш небезпечних продуктів окислення) відбувається тільки в тих трансформаторах, чиє середнє завантаження перевищувало 50 % впродовж останніх 13 років. Збільшення завантаження трансформатора з 10 до 50 % приводить до збільшення вмісту органічних кислот через 25 років експлуатації в 3,5 рази: з 0,029 до 0,102 мг КОН на 1 г масла.

4. Встановлено вплив струмів короткого замикання, перенапруг, перевантажень і інших аварійних дій на зростання концентрацій газів у всіх трансформаторах підстанції, при цьому концентрації газів можуть перевищувати граничні на декілька порядків. Збільшення струму короткого замикання з 9 до 16 кА призводить до збільшення приростів концентрацій розчинених в маслі газів в 2 рази.

5. Встановлено, що однією з причин уявного зниження концентрацій газів є методичні помилки внаслідок тривалих інтервалів між датами відбору проб і проведенням хроматографічного аналізу масел. Збільшення інтервалу до місяця призводить до зниження вмісту газів вуглеводневого ряду в пробах на порядок.

6. Встановлена наявність значущих кореляційних зв'язків між: а) кислотним числом і вмістом водорозчинних кислот; б) кислотним числом і кольором масел; в) вмістом водорозчинних кислот і вмістом вологи; г) вмістом газів CH_4 і C_2H_4 , CH_4 і C_2H_6 , C_2H_4 і C_2H_6 , C_2H_2 і C_2H_4 , C_2H_2 і H_2 ; д) кислотним числом і CO_2 ; е) вмістом водорозчинних кислот і CO_2 . Це свідчить про спільні механізми термоокислювального старіння масел, що протікають в умовах дії сильних електричних полів в баці високовольтних трансформаторів.

7. Розроблено метод оцінки старіння трансформаторних масел, який полягає в тому, що показники масла співставляють не з граничними значеннями, а з розрахунковими траєкторіями; при цьому масло відноситься до тієї траєкторії, діагностична відстань до центру якої мінімальна. На відміну від існуючих методів, в яких граничні значення показників є незмінними на всьому інтервалі експлуатації, межі траєкторій змінюються як в часі (що дозволяє врахувати нелінійність дрейфу показників) так і залежно від завантаження трансформаторів (що дозволяє виявити трансформатори з прискореним старінням масла на ранній стадії, коли показники масел знаходяться в області допустимих значень). Рівень розпізнавання складає не менше 95 – 99 %, залежно від прийнятої міри діагностичної відстані.

8. Розроблено метод інтерпретації результатів хроматографічного аналізу, який полягає в тому, що для визначення стану трансформатора використовують коефіцієнти парної кореляції між газами і часом експлуатації, між газами в трансформаторі і між газами діагностуємого і сусіднього трансформаторів на підстанції; на підставі набутих значень ухвалюється рішення про стан трансформатора. На відміну від відомих методів, в яких основним критерієм наявності дефекту є

перевищення концентрацій газів граничних значень, запропонований метод дозволяє: виявляти і розпізнавати процеси іонізаційного старіння і термічної деструкції на ранній стадії їх розвитку (в середньому на 0,5 року раніше), коли не сталося руйнування ізоляції; виявляти зростання концентрацій розчинених в маслі газів, обумовлене впливом аварійних режимів роботи електричних мереж.

9. Розроблено метод прогнозування значень показників масел, заснований на використанні виявлених кореляційних зв'язків між показниками масел і встановлених залежностей між завантаженням трансформаторів і інтенсивністю старіння масел; практична реалізація методу з використанням нейро-нечітких мереж дозволила забезпечити похибку прогнозу по кислотному числу на рівні 0,003 мг КОН на 1 г масла, а за кольором - на рівні 0,35 КЧ.

10. Результати впроваджені в службах ізоляції і грозозахисту АК «Харківобленерго», ВАТ «Сумиобленерго» і в службі діагностики і захисту від перенапруг ХМЕС Північної електроенергетичної системи НЕК «Укренерго» та в навчальний процес кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шутенко О.В. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. [Монография] / В.Е. Бондаренко, П.Ф. Щапов, О.В. Шутенко – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 452 с.

Розділи 1.2, 1.5, 2.4, 2.5, 2.6, 2.6.1, 2.6.2, 2.6.4, 2.7, 2.8, 2.9, 4.1, 4.2, 5.3, 5.5, 5.6, 5.7 написані здобувачем самостійно. У розділах, написаних в співавторстві здобувачу належать: 1.3 – аналіз найбільш характерних дефектів елементів і вузлів високовольтних трансформаторів; 1.4 – огляд і характеристика показників використовуваних для оцінки стану трансформаторних масел; 2.1 – аналіз основного рівняння теплового старіння; 2.6.3 – дисперсійний аналіз регресійної моделі старіння масла; 3.5 – коваріаційний аналіз лінійних моделей показників якості на час експлуатації і інтерпретація отриманих результатів; 3.6 – інформаційний аналіз показників якості трансформаторних масел; 5.4 – регресійний аналіз моделей множинної регресії; 5.8 – метод кількісної оцінки ступеня старіння масла за допомогою множинної регресії.

2. Шутенко О.В. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла для технического эксплуатационного контроля маслonaполненного энергетического оборудования / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УДАЗТ. – 2003. – №2. – С. 46–50.

На основі регресійного аналізу здобувачем виявлені трансформатори зі значущим дрейфом показників масел. Виконано аналіз адекватності моделі множинної регресії.

3. Шутенко О.В. Ковариационный анализ моделей старения трансформаторного масла / О.В. Шутенко // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів. – 2003. – №485. – С. 163–169.

4. Шутенко О.В. Оценка информативности показателей качества трансформаторного масла при эксплуатационном контроле технического состояния изоляции высоковольтных трансформаторов / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – №7. – С. 88–98.

5. Шутенко О.В. Исследование влияния загрузки трансформатора на состояние масла в процессе эксплуатации / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – №22 – С. 121–126.

6. Шутенко О.В. Интерпретация результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, при обнаружении дефектов в изоляции трансформаторов / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 34. – С. 101–115.

7. Шутенко О.В. Метод выделения оптимального числа наиболее информативных показателей качества при синтезе регрессионных моделей для оценки степени старения жидкой изоляции трансформаторов / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України – 2006 – №. 5, тем. вип. – С. 88–93.

Здобувачем виконано порівняльний аналіз статистичних критеріїв, для виявлення нестационарних часових рядів показників масел. Сформовано підмножини показників з однаковою швидкістю старіння. Виконано аналіз інформаційної значущості ізоляційних показників масел. Доведена достовірність отриманих результатів за рахунок аналізу моделі множинної регресії.

8. Шутенко О.В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний / О.В. Шутенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 4. – С. 42–50.

9. Шутенко О.В. Сравнительный анализ эффективности традиционной и вероятностной систем оценки состояния жидкой изоляции высоковольтных трансформаторов на примере действующего оборудования / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко, В.В. Черкашина // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – №28. – С. 7–18.

Здобувачем запропоновано використання варіативних граничних значень показників масел. Розроблено метод оцінки стану масел на основі множинної регресії. Виконано порівняльний аналіз існуючого та запропонованого методів оцінки стану масел.

10. Шутенко О.В. Обучение модели для прогнозирования ожидаемых значений показателей качества трансформаторного масла / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко, В.В. Черкашина // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – №1 – С. 232 – 238.

Здобувачем запропоновано використання залежностей між тривалістю експлуатації та ізоляційними показниками масел для прогнозування їх значень. Розроблені регресійні моделі доведено їх адекватність.

11. Шутенко О.В. Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течении длительной эксплуатации / О.В. Шутенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 4. – С. 26 – 30.

12. Шутенко О.В. Оценка статистической однородности временных рядов показателей качества трансформаторного масла / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко, Н.В. Аулова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №21. – С. 12–19.

Здобувачем виконано повне дисперсійне розкладення, та встановлено наявність адитивного та мультиплікативного зсуву між часовими залежностями показників. Встановлено наявність впливу сорту та якості масел, що заливаються в бак трансформаторів, а також режимів експлуатації на інтенсивність їх старіння.

13. Шутенко О.В. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів / О.В. Шутенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків. – 2008. – Том 1, випуск 73. – С. 45–48.

14. Шутенко О.В. Исследование влияния режимов работы трансформаторов на интенсивность старения масла / О. В. Шутенко // Энергетика та електрифікація. – Київ. – 2008 – №8. – С. 54–59.

15. Шутенко О.В. Комплексный корреляционный анализ показателей качества трансформаторного масла / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №45. – С. 156 – 167.

16. Шутенко О.В. Формирование процедуры нечеткого вывода для обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов / О.В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 44. – С. – 162–177.

17. Шутенко О.В. Прогнозирование значений показателей качества трансформаторного масла с помощью нейро-нечеткой системы ANFIS / О.В. Шутенко // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: «ХНАМГ». – 2008. – №4 – С. 49–56.

18. Шутенко О.В. Усовершенствование процедуры принятия решений при оценке степени старения трансформаторных масел / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – Москва – 2009. – №1. – С. 17 –21.

Здобувачем отримано зв'язок між завантаженням трансформаторів та інтенсивністю старіння масел. Встановлено нелінійний характер зміни ізоляційних параметрів масел у часі. Розроблено метод що дозволяє виявляти трансформатори з прискореним старінням масел.

19. Шутенко О.В. Регрессионная модель старения трансформаторных масел при многопараметровом контроле их технического состояния / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко // Тезисы докладов третьей промышленной конференции с международным участием «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях» (с. Славське, Львівської обл., 24-28 лютого 2003 р.). – Київ: УІЦ «Наука, Техніка, Технологія» – 2003. – С. 53.

Здобувачем досліджені залежності між тривалістю експлуатації та ізоляційними показниками масел. Запропоновано використовувати час експлуатації

для оцінки стану масел. Побудована модель множинної регресії для оцінки ступеня старіння трансформаторних масел.

20. Шутенко О.В. Совершенствование методики интерпретации результатов ХАРГ при обнаружении дефектов высоковольтных трансформаторов / В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко // Сб. тезисов IX симпозиума «Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики» (Истра, Московская обл. 29-31 мая 2007 р.) – Москва. – ТРАВЭК, 2007. – С. – 206 – 207.

Здобувачем встановлено взаємозв'язок між станом високовольтних трансформаторів та характером часових залежностей розчинених у маслі газів. Розроблено метод інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів.

21. Шутенко О.В. Анализ влияния аварийных режимов работы электрической сети на изменение концентраций растворенных в масле газов: інформація по XVII міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (Харків, 20-22 травня 2009 р.) / О.В. Шутенко. Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 550 с.

АНОТАЦІЇ

Шутенко О. В. Удосконалення діагностики силових високовольтних трансформаторів на основі аналізу закономірностей тривалого старіння масел. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – Техніка сильних електричних і магнітних полів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків. – 2010.

Дисертація присвячена дослідженню процесів старіння трансформаторних масел в умовах тривалих впливів сильних електричних полів та великих струмів, з метою удосконалення діагностики стану високовольтних силових трансформаторів. Досліджені залежності 20 ізоляційних показників трансформаторних масел від часу експлуатації в умовах дії факторів, що притаманні експлуатації високовольтного електроенергетичного обладнання. Виконана оцінка впливу струмів завантаження трансформаторів на інтенсивність дрейфу показників масел. Проаналізовано вплив коротких замикань, перенапруг та інших аварійних режимів роботи електричної мережі на зміну концентрації розчинених в маслі газів. Досліджено статистичний зв'язок між ізоляційними показниками масел. Розроблено метод оцінки ступеня старіння масел з урахуванням тривалості і режимів експлуатації. Запропоновано метод інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів для виявлення розрядних процесів та процесів термічної деструкції, на ранніх стадіях їх розвитку. Розроблені моделі для прогнозування значень ізоляційних показників масел.

Ключові слова: електроенергетичне обладнання, сильні електричні поля, великі струми, електророзрядні процеси, трансформаторне масло, теплове та іонізаційне старіння, часткові розряди, завантаження трансформаторів, коротке зами-

кання, перенапряги.

Шутенко О.В. Усовершенствование диагностики силовых высоковольтных трансформаторов на основе анализа закономерностей длительного старения масел. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – Техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Харьков. – 2010.

Диссертация посвящена исследованию процессов старения трансформаторных масел в условиях длительных воздействий сильных электрических полей и больших токов с целью усовершенствования диагностики состояния высоковольтных трансформаторов.

Рассмотрены причины повреждаемости высоковольтных силовых трансформаторов. Выполнен сравнительный анализ норм и методов оценки состояния трансформаторных масел, которые используются как в Украине, так и за ее пределами, что позволило установить основные недостатки существующих методов и обосновать необходимость поиска решений в этой области.

Проанализированы основные процессы, приводящие к ухудшению изоляционных свойств трансформаторных масел в течение длительного воздействия сильных электрических полей и больших токов. Обоснована необходимость статистического подхода к исследованию закономерностей старения масел. Исследованы зависимости 20 показателей трансформаторных масел от времени эксплуатации в условиях воздействия факторов, характерных для эксплуатации высоковольтного электроэнергетического оборудования. Установлены значимые различия в характере зависимостей изоляционных показателей и растворенных в масле газов. Сформированы подмножества показателей с одинаковой скоростью дрейфа.

Установлен нелинейный характер зависимостей показателей масел от времени эксплуатации под действием сильных электрических полей и токов загрузки. Выделены характерные участки, дана их физическая интерпретация. Выполнена оценка влияния токов загрузки трансформаторов на интенсивность дрейфа показателей масел. Получены зависимости между значениями загрузки трансформаторов и скоростью старения масел. Проанализировано влияние коротких замыканий, перенапряжений и других аварийных режимов работы электрической сети на изменение концентраций растворенных в масле газов. Установлено, что при наличии таких режимов, рост концентраций газов наблюдается во всех трансформаторах подстанции, что позволяет распознать внутренние и внешние причины газовыделения. Получены зависимости между значениями токов короткого замыкания и приращением концентраций растворенных в масле газов. Исследована статистическая связь между изоляционными показателями масел. Установлены показатели статистически связанные между собой.

Разработан метод оценки степени старения масел с учетом длительности эксплуатации и загрузки трансформаторов, который позволяет выявить транс-

форматоры с ускоренным старением масел еще на ранней стадии эксплуатации. Уровень распознавания метода составляет 95 – 99 %. Предложен метод интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов для выявления электроразрядных процессов и процессов термической деструкции, как масел, так и основной изоляции трансформаторов. Данный метод реализован с помощью аппарата нечеткой логики. Разработаны нечеткие нейронные сети, которые позволяют прогнозировать значения изоляционных параметров масел, на основе информации о длительности эксплуатации, загрузках трансформаторов и корреляционных связях между показателями.

Ключевые слова: электроэнергетическое оборудование, сильные электрические поля, большие токи, электроразрядные процессы, трансформаторное масло, тепловое и ионизационное старение, частичные разряды, загрузка трансформаторов, короткое замыкание, перенапряжение.

Shutenko O. V. Improvement of Diagnostics of Power High-voltage Transformers on the Basis of the Analysis of Laws of Long Ageing Oils. – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of engineering sciences on specialty 05.09.13 – Technique strong electric and magnetic fields. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute». Kharkov. – 2010.

The dissertation is devoted to research of processes of ageing of transformer oils in conditions of long influences of strong electric fields and currents, the purpose of improvement of diagnostics of a condition of high-voltage transformers. Dependences of 20 parameters of transformer oils on time of operation in conditions of influence of factors, characteristic for operation of the high-voltage electropower equipment are investigated. The estimation of influence of currents of loading of transformers on intensity of drift of parameters of oils is executed. Influence of short circuits, overstrain and other emergency operation of work of an electric network on change of concentration of the gases dissolved of oil is analysed. Statistical communication between insulation parameters of oils is investigated. The method of an estimation of a degree of ageing of oils is developed in view of duration of operation and loading of transformers. The method of interpretation of results chromatographic the analysis of the gases dissolved of oil for revealing electrodigit processes and processes thermal distruction, at an early stage of their development is offered. Models for forecasting values insulation parameters of oils are developed.

Key words: electropower equipment, strong electric fields, high currents, electrodigit processes, transformer oil, thermal and ionization ageing, partial categories, loading of transformers, short circuit, overstrain.