

В. В. Грабко, Д. О. Березницький

**ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ
ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ТА СИСТЕМ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХИСТІВ ЕНЕРГОБЛОКА
ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Грабко, Д. О. Березницький

**ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ВЛАСНИХ
ПОТРЕБ ТА СИСТЕМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХИСТІВ
ЕНЕРГОБЛОКА ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.314

ББК 31.261.8

Г 75

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (проткол № 10 від 28.05.2009 р.)

Рецензенти:

М. В. Гребченко, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Гرابко, В. В.

Діагностування трансформаторів власних потреб та систем технологічних захистів енергоблока теплової електростанції : монографія / В. В. Грабко, Д. О. Березницький. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 124 с.

ISBN 978-966-641-345-4

В роботі розглянуто існуючі методи і засоби діагностування трансформаторів власних потреб та систем технологічних захистів теплової електростанції. Описано нові математичні моделі діагностування обладнання та побудовано на їх основі пристрої, які дозволяють визначати технічний стан об'єкта дослідження за результатами вимірювань певної сукупності параметрів.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників електротехнічної промисловості та електроенергетики, що займаються експлуатацією електричного обладнання, а також студентів та аспірантів ВНЗ.

УДК 621.314

ББК 31.261.8

ISBN 978-966-641-345-4

© В. Грабко, Д. Березницький, 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ З ПИТАНЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГО- БЛОКА.....	8
1.1. Методи і засоби діагностування силових трансфор- маторів власних потреб як допоміжного електрообладнання енер- гоблока теплової електростанції.....	11
1.2. Методи і засоби діагностування технологічних захис- тів як керуючого електрообладнання енергоблока теплової е- лектростанції	24
1.3. Класифікація методів та засобів для діагностування силових трансформаторів.....	31
1.4. Висновки та постановка задачі дослідження.....	33
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДІАГНОСТУ- ВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДОПОМІЖНОГО ТА КЕРУЮЧОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	34
2.1. Математична модель для побудови ресурсних харак- теристик силового сухого трансформатора власних потреб, що працює в режимі перевантаження	34
2.1.1. Приклад визначення тривалості роботи силового сухого трансформатора власних потреб в режимі переван- таження	40
2.2. Математична модель для діагностування силового су- хого трансформатора власних потреб.....	41
2.3. Математична модель для діагностування системи за- хисту зниження вакууму турбіни	47
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДОПОМІЖНОГО ТА КЕРУЮЧОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТ- РОСТАНЦІЇ	52
3.1. Вибір математичного апарату, придатного для розв'язання задачі синтезу структури діагностування допоміж- ного та керуючого електрообладнання теплової електростанції.....	52

3.2. Синтез структури пристрою для діагностування силового сухого трансформатора власних потреб	53
3.3. Синтез структури пристрою діагностування системи захисту зниження вакууму турбіни.....	62
РОЗДІЛ 4. МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ПОХИБКИ СИНТЕЗОВАНИХ ПРИСТРОЇВ	73
4.1. Мікропроцесорний засіб для діагностування стану ізоляції силового сухого трансформатора власних потреб з врахуванням його роботи в режимі перевантаження.....	74
4.2. Мікропроцесорний засіб для діагностування системи захисту зниження вакууму турбіни.....	78
4.2.1. Мікропроцесорний засіб для діагностування системи захисту зниження вакууму турбіни з використанням мікроконтролера фірми Atmel.....	78
4.2.2. Мікропроцесорний засіб для діагностування системи захисту зниження вакууму турбіни з використанням мікроконтролера LOGO фірми Siemens.....	80
4.3. Оцінка похибок вимірювальних каналів пристрою для діагностування стану ізоляції силового сухого трансформатора власних потреб	81
4.3.1. Вибір сенсорів температури та їх похибки	83
4.3.2. Вибір сенсорів струму та напруги і їх похибки.....	85
4.3.3. Похибка перетворювачів синусоїдального сигналу в сигнал постійного струму.....	87
4.3.4. Оцінювання похибки квантування АЦП.....	90
4.4. Оцінювання вірогідності контролю стану ізоляції обмоток силового сухого трансформатора власних потреб з помилок першого і другого роду	92
ВИСНОВКИ	96
ЛІТЕРАТУРА	98
Додаток А. Математична модель для побудови ресурсних характеристик силового сухого трансформатора власних потреб, що працює в режимі перевантаження	116

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АГП	автомат гасіння поля
АСУ ТП	автоматизована система управління технологічним процесом
АЦП	аналого-цифровий перетворювач
ЖЕН	живильний електронасос
ЖТН	живильний турбонасос
МНК	метод найменших квадратів
ПВЗ	пристрій вибірки-зберігання
ПЗП	постійно запам'ятовуючий пристрій
ПЗП1	ПЗП для зберігання комбінацій тестових сигналів
ПЗП2	ПЗП комбінацій прогнозованих результатів тесту
пристрій РПН	пристрій регулювання під навантаженням
ЦВТ	циліндр високого тиску
ЦСТ	циліндр середнього тиску

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах економічного розвитку нашої держави однією із основних задач господарювання постає питання продовження експлуатації понад встановлений термін служби обладнання та устаткування, зокрема електроенергетичного, із забезпеченням надійності роботи. Ті капіталовкладення, що здійснюються на цей час в електроенергетичну галузь, є незначними і не вирішують загальної проблеми надійної експлуатації електрообладнання, яке в переважній більшості було введено в роботу ще у 70–80 роках минулого століття.

Саме тому за умови обмеженого фінансування здійснюється перехід на експлуатацію обладнання за технічним станом. Це особливо актуально, коли нормативний термін експлуатації вже вичерпано, а обладнання знаходиться ще у робочому стані. Але такий підхід вимагає застосування надійних засобів діагностування, ігнорування яких може мати важкі наслідки при виникненні аварійних ситуацій.

Як відомо, не існує єдиних підходів до визначення технічного стану різних видів електрообладнання, а тому для виявлення діагностичних ознак адаптуються відомі рішення. Слід зазначити, що в деяких випадках необхідна інформація подається в технічному паспорті на відповідне обладнання, що частково спрощує аналіз його функціонування та можливість автоматизації процесу діагностування.

До електрообладнання та устаткування теплової електростанції ставляться особливі вимоги з надійності роботи. Нормою стало виведення всіх параметрів режиму та технічного стану обладнання на екран комп'ютера автоматизованої системи керування технологічним процесом. Якщо параметри режиму роботи вимірювати та передавати порівняно просто, то інформацію про технічний стан обладнання в багатьох випадках отримати дуже складно. Важливу роль в генеруванні електроенергії має не тільки основне обладнання, але і допоміжне та керує, яке забезпечує надійність функціонування основного.

Так, до силових трансформаторів власних потреб електростанції (в тому числі і сухих трансформаторів) ставляться високі вимоги з надійності роботи. Їх особливістю є короткотривала робота в режимі пе-

ревантаження, що пов'язано з частими пусками енергоблоків теплових електростанцій. Але якщо з питань діагностування силових трансформаторів в нормальному режимі роботи є багато публікацій, то підходи до визначення ступеня спрацювання технічного ресурсу ізоляції обмоток силових трансформаторів в режимі перевантаження розроблені недостатньо.

Не менша відповідальність за функціонування обладнання теплової електростанції покладається на засоби автоматизації. Наприклад, турбіна енергоблока містить дев'ять основних систем захисту і вихід будь-якої з них з ладу призводить до її аварійної зупинки. Тому діагностування технологічних систем автоматики займає одне з чільних місць в плані надійного функціонування компонент енергоблока.

Вказані проблеми обумовлюють актуальність наукової задачі – підвищення надійності функціонування елементів допоміжного та керуючого електрообладнання енергоблока теплової електростанції шляхом їх діагностування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ З ПИТАНЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОБЛОКА

Відомо, що роботоздатність електрообладнання визначається його технічним станом і пов'язана із залишковим робочим ресурсом.

В сучасних умовах в експлуатації електрообладнання здійснено перехід від системи планово-попереджувальних ремонтів, яка передбачала технічне обслуговування і ремонт електричного обладнання через визначені терміни, до системи обслуговування за технічним станом електрообладнання [1].

Переваги такого підходу очевидні, оскільки відпадає необхідність виконання комплексу профілактичних робіт на обладнанні, яке має задовільний технічний стан. Відомо, що будь-яке втручання в електрообладнання, проведене навіть фахівцями високого рівня, призводить до зниження надійності і зменшення терміну служби, оскільки при цьому порушуються з'єднання і відбувається нова приробка деталей, що супроводжується інтенсивним спрацюванням елементів конструкції. Крім того, в процесі виконання робіт можливе ушкодження окремих деталей та вузлів.

Експлуатація електрообладнання за технічним станом вимагає отримання додаткової інформації, з якої можливо з'ясувати реальний технічний стан електрообладнання та прогнозувати можливість і час його подальшої експлуатації в умовах зміни інтенсивності зовнішніх впливів. Такий підхід передбачає встановлення на обладнання додаткових сенсорів, за інформацією з яких можливе пряме або опосередковане визначення залишкового робочого ресурсу, що і передбачається в процесі діагностування електрообладнання.

Метою технічного діагностування електрообладнання є забезпечення найбільш економічної його експлуатації при заданому рівні надійності і скороченні до мінімуму витрат на технічне обслуговування і ремонт. Ця мета досягається шляхом відслідковування технічного стану електрообладнання в процесі експлуатації, що дозволяє своєчасно запобігати відмовам, скорочувати простой через пошкодження, проводити комплекс заходів для підтримки його роботоздатності відповідно до даних діагностування [2, 3].

Задачі технічної діагностики в системі експлуатації електрообладнання полягають у встановленні необхідності заміни змінних деталей і вузлів, проведенні регулювання, виконанні поточних та капітальних ремонтів, якості їх виконання, встановленні причин можливих відмов електрообладнання [4].

Очевидно, що будь-яка відмова електрообладнання, що викликає створення аварійної ситуації, призводить до значних втрат, пов'язаних із призупиненням електропостачання, псуванням обладнання та продукції тощо. Особливо ця проблема гостро стосується електростанцій, аварія на якій призводить до недовідпуску електричної або теплової енергії з усіма можливими наслідками.

Відомо, що високі вимоги з надійності роботи ставляться до силових трансформаторів електростанцій, які забезпечують перетворення та передачу електроенергії від генераторів до споживачів. Не менш високі вимоги ставляться і до трансформаторів власних потреб електростанцій, які забезпечують надійну роботу допоміжного електрообладнання і працюють не тільки в режимі великих навантажень, але й і в режимі перевантаження, особливо в моменти запусків потужних електродвигунів, в періоди живлення власних потреб інших енергоблоків тощо.

Особливої уваги у живленні власних потреб заслуговують силові трансформатори сухого виконання, які хоч і не дешевші від маслonaповнених, але мають переваги з позицій пожежобезпеки та впливу на навколишнє середовище.

Не менш важливою є проблема надійної роботи систем автоматичної теплової електростанції. Наявне устаткування, складні технологічні схеми при великому обсязі автоматизації й теплотехнічного контролю ускладнюють проведення персоналом виконання правильних і своєчасних операцій у моменти аварій. В той же час характер протікання ряду процесів такий, що найменша затримка у відключенні устаткування приводить до серйозних його ушкоджень.

В зв'язку з цим виникає необхідність виконання цілого ряду операцій з управління обладнанням за допомогою автоматичних пристроїв, які діють при порушенні режиму роботи чи виникненні несправності технологічного обладнання. Автоматичне керування в таких режимах здійснюється пристроями технологічних захистів та блокувань.

Однією з найбільш важливих вимог до пристроїв технологічних захистів та блокувань є забезпечення надійної дії в аварійних випадках. При цьому надійність пристроїв визначається як кількістю відмов при своєчасному спрацюванні, так і кількістю хибних спрацювань. Тому показники надійності кожного з захистів значною мірою визначаються схемою ввімкнення й надійністю приладів, що в ній використовуються.

Наприклад, на Ладижинській ТЕС енергоблок містить 27 різноманітних систем захистів, що забезпечують його роботоздатність. Перед введенням енергоблока в роботу тривалість перевірки роботоздатності систем захистів складає понад 9 годин [5]. Це пов'язано з великою кількістю захистів, значною кількістю сигналів з сенсорів технологічного обладнання, великою кількістю виконавчих механізмів та складністю технологічних схем. Як правило, перевірка роботоздатності кожної із систем захистів в процесі роботи енергоблока не здійснюється.

Впровадження нових методів, які дозволяють діагностувати системи захистів в процесі їх експлуатації за допомогою сучасних засобів автоматизації та прийняття рішень і відповідних їм технічних засобів, створює можливість переходу до більш економічної і ефективної стратегії технічного обслуговування систем захистів за їх станом.

Останнім часом в енергогосподарствах проводиться заміна застарілого обладнання сучасним, створеним з використанням новітніх досягнень науки і техніки, наприклад, використанням елегазового обладнання [6, 7]. Але такий підхід вимагає значних капіталовкладень і тривалого часу для здійснення повного переоснащення підприємств.

Тому постає питання пошуку нових шляхів для визначення та прогнозування технічного стану електрообладнання з метою підвищення надійності його експлуатації.

Очевидно, що в межах однієї роботи неможливо приділити увагу всім видам обладнання енергоблока, а тому ми зосередимо зусилля на питаннях підвищення надійності роботи силових трансформаторів власних потреб та систем технологічного захисту.

1.1. Методи і засоби діагностування силових трансформаторів власних потреб як допоміжного електрообладнання енергоблока теплової електростанції

Силові трансформатори займають ключову позицію в плані забезпечення генерування, передачі та розподілу електричної енергії, а тому до них ставляться високі вимоги щодо надійності функціонування. Слід підкреслити, що з питань підвищення надійності роботи силових трансформаторів існує багато робіт, в тому числі і з напрямку їхнього діагностування в процесі роботи.

Не менш важлива роль в плані генерації електроенергії відводиться трансформаторам власних потреб електростанції, які забезпечують роботу допоміжного електрообладнання.

Задачі, які розв'язуються в процесі діагностування, можна сформулювати так [8]:

- виявлення факту дефектного стану трансформатора;
- визначення характеру дефекту та його локалізація при найбільшій можливій глибині діагностування;
- оцінка роботоздатності трансформатора, прогноз його залишкового ресурсу та визначення обсягів необхідного ремонту.

Статистика пошкоджень, що виникають в потужних силових трансформаторах, свідчить, що 48 % з них викликані пробоем внутрішньої ізоляції ввідів, 14 % – недостатньою стійкістю при коротких замиканнях, 12 % – через спрацювання ізоляції обмоток, 7 % – через пошкодження ізоляції обмоток, 5 % – через пошкодження пристрою регулювання під навантаженням (РПН) [9, 10]. Тому енергосистеми ставлять вимоги до укомплектування силових трансформаторів діагностичними системами [9].

Режими роботи блочних трансформаторів відрізняються від режимів роботи мережевих трансформаторів по навантаженню, струмах короткого замикання, участі в регулюванні активної потужності тощо. Оскільки завантаження таких трансформаторів підвищене, то і старіння їх ізоляції протікає інтенсивніше, ніж у мережевих трансформаторів. 24 % виниклих внутрішніх коротких замикань обумовлені спрацюванням ізоляції обмоток [11].

В роботі [12] зазначається, що старіння ізоляції суттєво залежить від режимів роботи трансформатора. Ключова роль при цьому відводиться зволоженню ізоляції.

Спеціалісти закордонних енергетичних компаній вважають економічно доцільним проведення неперервного контролю стану силових трансформаторів, а, отже, і створення різноманітних діагностичних та експертних систем [13].

Згідно з [14] в теперішній час для силових трансформаторів застосовується 21 вид випробувань та контролю. В роботі [15] зазначається про необхідність розширених випробувань силових трансформаторів, враховуючи новітні досягнення в області науки.

З аналізу літератури випливає, що діагностування силових трансформаторів здійснюється в різних ракурсах, тобто різні підходи передбачають перевірку та прогнозування терміну роботоздатності різних складових об'єкта дослідження.

Так, в роботі [16] охарактеризовано набір традиційних типових процедур перевірки роботоздатності силових трансформаторів. Підкреслюється, що відомі підходи не виключають необхідності створення нових методів та засобів діагностування електрообладнання, в т. ч. трансформаторів.

Зокрема в роботах [17–19] пропонуються методи, які передбачають виявлення залишкової деформації обмоток трансформатора внаслідок впливу електродинамічних зусиль, що виникають в обмотках під дією струмів короткого замикання. В статті [17] пропонується залишкову деформацію обмоток трансформатора виявляти методом низьковольтних імпульсів. Цей метод передбачає вимірювання нормограм при введенні в роботу нового трансформатора (або після проведення капітального чи відновлювального ремонтів) та їх порівняння з дефектограмами, знятими після протікання струмів короткого замикання в трансформаторі. Зі спектрального аналізу робляться висновки щодо появи нових гармонічних складових, з яких з'ясовують ступінь деформації обмоток. В ряді робіт [20–22] показано, що поява деформацій не перешкоджає подальшій експлуатації трансформатора, але в місці деформацій виникають процеси розвитку часткових розрядів і, як наслідок, погіршуються результати хроматографічного аналізу ма-

сла. В разі появи чергового короткого замикання з аперіодичною складовою можливий аварійний вихід з ладу трансформатора з важкими можливими наслідками.

В роботі [18] пропонується оцінювати рівень ослаблення опресованих обмоток з вібраційного портрету працюючого трансформатора з подальшим порівнянням амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик до і після виникнення аварійної ситуації.

Аналіз появи показників погіршення стану ізоляції на основі фізико-хімічних процесів, що протікають в ній, зроблено в роботі [19]. Показано, що внаслідок погіршення стану ізоляції можливе виникнення внутрішніх коротких замикань. До причин, що погіршують стан ізоляції, відносяться: підвищення вологості трансформаторного масла, наявність домішок в твердій та рідкій ізоляціях, розвиток іонізаційних процесів в ізоляції тощо. Як виявлено [23], негативний вплив вологи в ізоляції трансформатора пов'язаний з утворенням газових та парових кульок, що виділяються з ізоляції в трансформаторне масло при перегріванні ізоляції від струмів навантаження в обмотках.

Вказані методи є ефективними, але вони мають великий рівень складності для здійснення дослідження об'єкта, який до того ж необхідно виводити з експлуатації. Крім того, зазначений підхід передбачає наявність бази даних щодо технічного стану трансформаторів в різних режимах роботи.

В ряді робіт опубліковані результати наукових досліджень, пов'язані з перевіркою роботоздатності силових трансформаторів, обмотки яких мають підвищений рівень вмісту вологи. В роботі [24] показано, що надійність роботи трансформатора визначається станом його ізоляції, значна частина пошкоджень якої залежить від вологовмісту. Вважається, що для нових трансформаторів та трансформаторів після капітального ремонту допускається зволоження ізоляції до 2 %, а для трансформаторів, що знаходяться в експлуатації – до 4 % [14]. Тому для визначення вмісту вологи в ізоляції найчастіше використовують метод вимірювання відновлювальної на ізоляції напруги після її заряду та короткочасного розряду, аналіз кривих струму заряду та розряду ізоляції або аналіз залежностей ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції від частоти, на якій здійснюються вимірюван-

ня. Для підвищення достовірності досліджень застосовують композиції зазначених методів.

Як показано в [25], процеси деградації целюлозної ізоляції обмоток викликають зниження міцності паперу та розвиток дегідратації. З рівня полімерізації паперової ізоляції обмоток, що викликає виникнення виткових замикань при зниженні механічної міцності паперу та місцевого підвищення концентрації вологи, можна зробити висновок про рівень роботоздатності ізоляції обмоток трансформатора, а отже таким чином відслідковувати спрацювання робочого ресурсу [26].

Слід зазначити, що останнім часом для продовження терміну експлуатації запроваджується підхід, який передбачає регенерацію целюлозної ізоляції обмоток шляхом її відмивання із застосуванням поверхнево-активних речовин [27]. Аналогічним чином в закордонній практиці застосовують періодичні очищення трансформаторного масла від кислих та окислених продуктів старіння паперово-масляної ізоляції, а також використовують спеціальні регенераційні масла для очищення ізоляції від продуктів старіння, що прискорюють шлакоутворення та дегідратацію целюлозної ізоляції обмоток [28, 29].

Широко застосовується в теперішній час хроматографічний аналіз розчинених в трансформаторному маслі газів, який є ефективним засобом діагностування силових трансформаторів [30], але через високу чутливість методу можуть бути хибні оцінки діагностування при наявності внутрішніх термічних дефектів трансформатора, наприклад, пошкодження ізоляції остова трансформатора, пошкодження магнітопроводу тощо.

В теперішній час вологовміст твердої ізоляції силових трансформаторів визначається перед введенням їх в експлуатацію за зразками використовуваної ізоляції. В процесі експлуатації трансформатора допускається оцінка вологовмісту ізоляції розрахунковим шляхом, але в системі нормативних документів відсутня методика визначення вологості твердої ізоляції з результатів діелектричних характеристик [31]. Ця методика пропонується у вказаній роботі, але вона має певні обмеження, що характеризуються специфікою умов проведення вимірювань.

Значна увага в плані дослідження роботоздатності обмоток силового трансформатора приділяється питанням визначення впливу часткових розрядів. В роботі [32] викладені основні підходи, які передбачають можливість виявлення та контролювання інтенсивності часткових розрядів, які мають місце при роботі електрообладнання і викликані впливом багатьох факторів. В теперішній час для виявлення часткових розрядів в ізоляції найбільше поширення отримали електричний та акустичний методи.

Відомий підхід [33], який передбачає відслідковування зміни індуктивного опору трансформатора, за яким прогнозується поява пошкоджень в обмотках силового трансформатора. Для його реалізації необхідно проведення висококваліфікованих вимірювань на виведеному з експлуатації обладнанні при наявності статистики зміни контрольованого параметра.

Важливим елементом силових трансформаторів є пристрої РПН, надійність роботи яких також суттєво впливає на роботоздатність трансформаторів в цілому. В роботі [34] запропоновано спосіб оцінки параметрів перемикачів контактів пристрою РПН без часткового розбирання трансформатора. Цей спосіб передбачає осцилографування сигналів по кожному каналу керування з подальшим аналізом цих осцилограм по характерних точках. Підкреслимо, що такий підхід можливий для застосування лише при виведенні об'єкта дослідження з експлуатації.

Іншим відомим підходом до діагностування пристрою РПН силового трансформатора є застосування нейро-нечіткої моделі для перевірки його роботоздатності в процесі експлуатації силового трансформатора [35].

Для підвищення надійності роботи пристрою РПН силового трансформатора застосовують складні автоматизовані контрольні-діагностичні системи [36, 37].

В ряді випадків доцільним є застосування методів та засобів тепловізійного дослідження технічного стану електрообладнання [38–41], проте таким чином можливо виявлення лише пошкоджень, що розвиваються, або на ранній стадії, або в передаварійному стані експлуатації і зовсім не дозволяють прогнозувати вичерпання робочого ресурсу

ізоляції або вузлів трансформатора в процесі експлуатації під дією різноманітних чинників.

Не менш ефективним є тепловізійне діагностування систем охолодження силових трансформаторів. Тільки такий підхід дозволяє виявляти на працюючому обладнанні неефективність охолодження через забруднення ребер радіаторів, дефект циркуляційного маслососа, внаслідок чого температура підвищується, та ступінь забруднення фільтрів і патрубків, що призводить до перекосу в теплових полях системи охолодження [42–44].

Значна увага приділяється технічному стану високовольтних вводів силових трансформаторів. Охарактеризуємо основні методи діагностування високовольтних вводів [45].

1. Метод контролю стану вводів, що ґрунтується на вимірюванні опору ізоляції [46], дозволяє сформувавши загальну уяву про стан ізоляції вводів.

2. Метод контролю якості ущільнень вводів лише дозволяє запобігти витіканню масла.

3. Метод індикації часткових розрядів забезпечує виявлення появи часткових розрядів.

4. Метод контролю вводів, що базується на вимірюванні тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$) і ємності ізоляції. Вимірювання $\text{tg } \delta$ дозволяє відслідковувати погіршення ізоляції за винятком локальних дефектних місць.

За вимірними значеннями $\text{tg } \delta$ ізоляції можливе виявлення дефектів на ранній стадії розвитку з кривих іонізації [47].

Вимірювання ємності ізоляції сприяє виявленню місцевих дефектів, наприклад, пробій частини ізоляції.

5. Методом дослідження трансформаторного масла визначаються в лабораторних умовах електрична міцність, тангенс кута діелектричних втрат, колір масла, механічні домішки, температура спалаху, кислотне число, вологовміст [48].

6. Метод дефектоскопії, оснований на хроматографічному аналізі розчинених в маслі газів, дозволяє за певними концентраціями розчинених газів спрогнозувати розвиток дефекту [49]. Для підвищення до-

стовірності виявлення дефектів доцільно контролювати вміст іонулу в трансформаторному маслі [50] та вміст фуранових речовин [51].

Вказаний метод передбачає високу кваліфікацію працівників та наявність спеціального обладнання.

7. Метод постійного контролю ізоляції вводів [52] полягає у вимірюванні ємнісного струму (струму небалансу) у нульовому проводі зірки, яка утворена з'єднанням вимірювальних відводів усіх трьох вводів силового трансформатора.

Відомі інші методи діагностування стану ізоляції маслонаповненого електрообладнання, які базуються на різних явищах, – фіксація струму і імпульсів розряду, акустичний шум і електромагнітне випромінювання, вимірювання магнітної індукції на стінках баку трансформатора тощо [53–57].

Разом з тим існує широке різноманіття засобів контролю технічного стану силових трансформаторів.

В роботі [58] запропоновано пристрій для вимірювання опору постійного струму обмоток силового трифазного трансформатора, який застосовується при пусканалагоджувальних, профілактичних та періодичних випробуваннях, а також при комплексних обстеженнях трансформаторів. Пристрій дозволяє автоматизувати з високою точністю режим вимірювання опору постійному струму обмоток трифазних силових трансформаторів.

Подібний підхід до вимірювання опору обмоток трифазного трансформатора викладено в роботі [59].

Для вимірювання струму та втрат холостого ходу силових трансформаторів на стадії досліджень застосовується пристрій, в якому, за рахунок одночасної фіксації значень струму, напруги, частоти та потужності втрат холостого ходу з автоматичним виключенням впливу похибок втрат вимірювальної схеми, а також за рахунок виключення впливу складових струму та напруги кратних частот основної гармоніки, підвищується точність вимірювань [60].

Відомий пристрій для діагностування замикань в трансформаторі, принцип роботи якого полягає у подачі у вимірювальний контур високочастотного синусоїдального сигналу з наступним порівнянням виміряного сигналу з еталонним [61].

Подібну функцію виконує пристрій для випробування виткової ізоляції електричних обмоток, в якому формується випробувальна напруга у вигляді суми гармонічних складових, реакція об'єкта дослідження на яку, у вигляді амплітуди сигналу певної частоти, порівнюється з еталонним значенням [62].

В роботах [63, 64] описано пристрої для контролю технічного стану обмоток трансформатора, що дозволяють діагностувати пошкодження обмоток, викликані впливом струмів короткого замикання. Принцип їх роботи полягає у вимірюванні частотних характеристик струму в обмотках трансформатора, які є реакцією на тестовий сигнал.

Відомий спосіб для контролю технічного стану обмоток трансформатора [65], що передбачає поточні вимірювання напруг та струмів обмоток, а також частоти напруги електричної мережі та температури навколишнього середовища з подальшим порівнянням значень параметрів контролю з еталонними значеннями. Спосіб передбачає контроль роботоздатності трансформатора в нормальному режимі роботи.

Пристрій для контролю і захисту силових трансформаторів від деформацій обмоток при коротких замиканнях в процесі експлуатації опубліковано в [66]. Неперервний контроль стану обмоток досліджуваного силового трансформатора забезпечується постійним визначенням значення відхилення індуктивності від базової.

Відключення силового трансформатора від електричної мережі в разі виникнення режиму його роботи, що може призвести до появи деформації обмоток, запропоновано в пристрої, який опубліковано в [67].

В роботі [68] запропонований пристрій неперервного контролю стану обмоток силового трансформатора, принцип роботи якого полягає в наступному. Вимірюється струм в нейтралі силового трансформатора, напруга нульової послідовності на шинах, до якої підключена обмотка із заземленою нейтраллю. За допомогою виміряної напруги нульової послідовності формується струм, пропорційний струму нульової послідовності трансформатора в початковому стані, який віднімається від струму нейтралі трансформатора. Отримана різниця являє собою струм нульової послідовності від подовжньої несиметрії,

обумовленої різними опорами короткого замикання обмоток фаз трансформатора. Якщо при протіканні зовнішнього струму короткого замикання виникла деформація обмотки однієї з фаз трансформатора, то змінюється опір короткого замикання та струм нульової послідовності обмотки із заземленою нейтраллю, а, отже, з'являється результуючий струм, який по фазі колінеарний зі струмом деформованої обмотки, що є ознакою для виявлення фази трансформатора з деформованою обмоткою. Значення результуючого струму пропорційне відхиленню опору короткого замикання від початкового, а тому діленням модуля результуючого струму на модуль струму деформованої фази знаходиться відносно відхилення опору обмотки.

Аналогічним чином здійснюється контроль деформації обмоток силового трансформатора за допомогою пристрою, викладеного в [69].

Шляхом порівняння виміряного опосередковано фактичного значення опору короткого замикання обмоток трансформатора з еталонним в пристрої, що опублікований [70], реалізується висновок про ступінь деформації обмоток досліджуваного силового трансформатора.

В роботі [71] реалізовано спосіб виявлення короткозамкнутих витків електричної обмотки, яким передбачається підключення до обмоток напруги змінної частоти з наступним вимірюванням параметрів резонансного контуру обмоток. З частотного максимуму вимірюваного параметра приймається рішення про наявність коротких замикань.

Відомий переносний пристрій для контролю ізоляції силових трансформаторів [72], принцип роботи якого базується на явищі, що при погіршенні стану ізоляції обмоток трансформатора нелінійні частотні характеристики зміщуються в напрямку зменшення частоти. За допомогою ширококутового генератора синусоїдальних імпульсів сигнали подаються на обмотки трансформатора і з відклику, опрацьованому за математичною моделлю, робиться висновок про динаміку стану ізоляції.

В роботах [73, 74] викладені матеріали щодо пристроїв контролю стану ізоляції силових трансформаторів в процесі їх роботи. Особливістю реалізації зазначених пристроїв є відслідковування зміни число-

вих величин ємнісних та активних провідностей схеми заміщення контролюваного трансформатора, за якими формується висновок про передаварійну стадію експлуатації об'єкта дослідження, обумовлену, наприклад, зволоженням ізоляції. Додаткова функція оцінювання рівня інтенсивності часткових розрядів в ізоляції силового трансформатора реалізована в пристрої [74].

Для діагностування несправностей пристрою РПН силових трансформаторів використовується підхід, яким передбачається вимірювання по кривій струму тривалості процесу перемикачання та визначення тривалості знаходження в замкнутому та розімкнутому положеннях основних контактів контактора. Матеріали щодо реалізації пристрою опубліковані в роботі [75].

В іншій роботі [76] пропонується контролювати роботоздатність пристрою РПН шляхом вимірювання опору контактів в кожному положенні перемикача. При відхиленні виміряного значення опору від нормованого приймається рішення про можливу несправність. Така процедура здійснюється на стадії ремонту силових трансформаторів.

В ряді робіт передбачається здійснення діагностування стану силового трансформатора шляхом відслідковування зміни ряду параметрів, які визначаються опосередковано через вимірювання інших параметрів. Так, в роботі [77] визначається динамічна стійкість обмоток трансформатора з вимірюваних значень напруги та струму трансформатора. В іншій публікації [78] запропоновано вимірювати діючі значення та фази векторів струмів та напруги в обмотках в різні моменти часу, за якими визначається опір та втрати короткого замикання, а також значення струму та втрат холостого ходу. Формування підходів до визначення опору та втрат короткого замикання, струму та втрат холостого ходу, активних та індуктивних опорів кожної обмотки, коефіцієнта трансформації трансформатора, опору нульової послідовності розглядаються в роботі [79].

Крім того, існує підхід, який передбачає діагностування опресування обмоток трансформатора за спектральною густиною потужності наведеної в обмотках електроорушійної сили внаслідок появи вібраційних процесів при механічних впливах на трансформатор [80].

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-345-4>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-345-4>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-345-4>

Наукове видання

**Грабко Володимир Віталійович
Березницький Дмитро Олександрович**

**ДІАГНОСТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ
ТА СИСТЕМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХИСТІВ ЕНЕРГОБЛОКА
ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Монографія

Редактор С. Малишевська

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до друку 9.03.2010 р.
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний Ум. др. арк. 7,16
Наклад 100 прим. Зам № 2010-039

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.