

ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

О. Є. РУБАНЕНКО^{1*}, М. П. ЛАБЗУН², М. О. ГРИЩУК¹

¹ кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА

² Південно-західна електроенергетична система, Вінниця, УКРАЇНА

*email: rubanenkae@ukr.net

АНОТАЦІЯ Метою статті є дослідження пошкоджуваності силових трансформаторів, методів і засобів визначення їх технічного стану. Представлені результати досліджень пошкоджуваності силових трансформаторів, які показують, що значна частина таких пошкоджень є дефекти магнітопроводу та обмоток, відносно інших вузлів силового трансформатора. У статті звернено увагу на використання FRAnalyzer і на відсутність вітчизняної нормативної документації, що дозволяє аргументовано інтерпретувати результати діагностування таким обладнанням. Стаття дозволяє оцінити ефективність методів та засобів діагностування силового обладнання енергосистем.

Ключові слова: силовий трансформатор; діагностування; пошкоджуваність; частотний аналіз; магнітопровід; обмотки.

DEFINITION DEFECTS OF TRANSFORMER EQUIPMENT USING FREQUENCY DIAGNOSTIC PARAMETERS

A. RUBANENKO¹, M. LABZUN², M. HRYSHCHUK¹

¹ Department of the Electric Stations and Systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, UKRAINE

² Diagnostic department insulation and lightning protection, South-Western Electric Energy Supply System, Vinnitsa, UKRAINE

ANNOTATION The purpose of the article is to investigate the damageability of power equipment of electric power systems, methods and means of their diagnostics.

The article presents the results of studies of the damageability of power transformers, which indicate that a considerable part of such damages are defects in magnetic circuits and windings. Also, studies Defects power equipment of power systems in most cases is from 1 to 3 years of operation and one after 25 years. These are such damages as radial and axial deformations of windings, sliding of coils of windings, results of "fire in steel", etc. It is also shown that among the most frequently damaged nodes and parts of a transformer, there are windings and magnets. This indicates that monitoring of the current and the idling power of the transformer, the active insulation resistance of the windings, the short-circuit resistance and other diagnostic parameters stipulated in the regulatory and passport documentation, using diagnostic tools available for enterprises operating transformers. Some defects of these parts and assemblies, especially at an early stage of their development. Determined that the defects associated with defects in the windings and magnetic deterioration best detected by comparing the frequency characteristics. Attention is also drawn to the fact that sometimes effective use of modern diagnostic equipment is limited by the absence of domestic normative documentation that allows to interpret the results of diagnosing transformers with new methods reasonably, to assess the actual technical condition that is necessary for its account during operation, repair planning, replacement and disposal.

Keywords: power transformer; diagnostics; defect; frequency analysis; magnetic core; windings.

Вступ

Важливим завданням для електроенергетики є забезпечення надійної та безаварійної експлуатації обладнання. Аналіз літературних джерел свідчить про те що в наш час мають місце пошкодження силових трансформаторів і не лише в Україні [1], а і в інших країнах світу [2,3].

Одним з напрямків зменшення аварійних ситуацій, викликаних пошкодженнями основного та високовартісного обладнання електроенергетичних систем такого, як, наприклад, трансформаторне устаткування, є врахування результатів оцінювання його технічного стану в умовах експлуатації.

Результати аналізу пошкоджуваності трансформаторного обладнання [1-5] свідчать про необхідність вдосконалення існуючих, розробки та впровадження нових методів та засобів діагностування трансформаторного обладнання (ТО).

Для обґрунтування доцільності розробки та впровадження нових методів та засобів діагностування ТО необхідно провести аналіз статистики відмов, існуючих методів та засобів діагностування силових трансформаторів (СТ).

Мета роботи

Метою роботи є дослідити найбільш поширені дефекти силового обладнання електроенергетичних

систем. Проаналізувати, на яких термінах експлуатації, найбільш часто проявляються дефекти силового обладнання. Визначити кращі методи та засоби діагностування дефектів цього обладнання. Оцінити доцільність розробки та впровадження нових методів та засобів діагностування силового обладнання. Дослідити доцільність та можливість використання приладу FRAnalyzer в Україні.

Аналіз пошкоджуваності трансформаторного обладнання

Силовий трансформатор складається з багатьох вузлів та деталей. Їх відмови в процесі експлуатації, впливають на його робоздатність, а тому і на надійність та якість функціонування електроенергетичної системи.

Результати досліджень пошкоджень вузлів та деталей СТ свідчать про те, що, як в Україні, так за кордоном (табл. 1), чимало з них припадає на пошкодження обмоток та магнітопроводів.

Це доводить необхідність врахування стану цих елементів трансформатора під час його експлуатації.

Таблиця 1 – Розподіл вузлів трансформатора за їх пошкодженнями

Пошкодження	В Україні	В Німеччині
Бак	7,6 %	3,6 %
РПН	9,5 %	33,9 %
Обмотка	9,7 %	32,1 %
Магнітопровід	5,4 %	7,1 %
Система охолодження	23,1 %	0,9 %
Вводи	15,6 %	11,6 %
Ізоляція	29,1 %	9,8 %

Основні та часті пошкодження силових трансформаторів можна поділити на:

- а) пошкодження ізоляції:
 - погіршення якості оливи;
 - різке зниження рівня оливи;
 - ненормальне підвищення температури оливи і місцеві перегріву;
 - дефекти міжлистової (паперової) ізоляції.
- б) пошкодження вводитів:
 - пробій на корпус;
 - замикання вводитів різних фаз між собою;
 - негерметичність корпусу;
 - неякісне армування;
 - нагрів фарфору;

- нагрів сталюого фланця.
- с) пошкодження обмотки:
 - виткове замикання;
 - обрив обмоток;
 - пробій на корпус;
 - міжфазне коротке замикання;
 - замикання паралельних проводів в витках гвинтовий обмотки в місці транспозиції;
 - обрив одного або декількох паралельних проводів у витку обмотки;
 - радіальна деформація витків.
- д) пошкодження магнітопроводу:
 - місцеве замикання пластин шихтованої сталі, і «пожар в сталі»;
 - місцеве пошкодження ізоляції пластин стали, що викликає замикання пластин стали;
 - підвищена вібрація;
 - обрив заземлення.
- е) пошкодження РПН:
 - оплавлення або вигорання контактних поверхонь;
 - перекриття між фазами або окремими відгалуженнями (дефект подібний міжфазному короткому замикання обмоток).
- ф) пошкодження системи охолодження:
 - механічна деформація радіатора;
 - вихід з ладу циркуляційного насосу;
 - вихід з ладу системи примусового дуття.
- г) пошкодження баку:
 - підтікання баку трансформатора (негерметичність);
 - підтікання оливи в місцях з'єднань;
 - механічне пошкодження.

На сьогодні існує багато методів та засобів діагностування силових трансформаторів, так, наприклад, використовуючи тепловізійний контроль, хроматографічний аналіз розчинених газів в трансформаторній оливі, методи онлайн контролю комплексної провідності та тангенса діелектричних втрат ізоляції та інші – визначають технічний стан СТ.

Проведені дослідження свідчать про старіння парку трансформаторів, що пояснюється відсутністю коштів на заміну трансформаторів, які відпрацювали свій ресурс, знаходяться в експлуатації понад 25 років. Відома крива пошкоджуваності обладнання [6] справедлива і для трансформаторного обладнання.

Тому, не дивлячись на велику кількість існуючих методів та засобів діагностування силового обладнання, потрібно розробляти нові та вдосконалювати відомі методи діагностування, методи аналізу статистичних даних про зміну діагностичних параметрів як в процесі експлуатації, так і під час транспортування, зберігання, ремонту, та введення в експлуатацію.

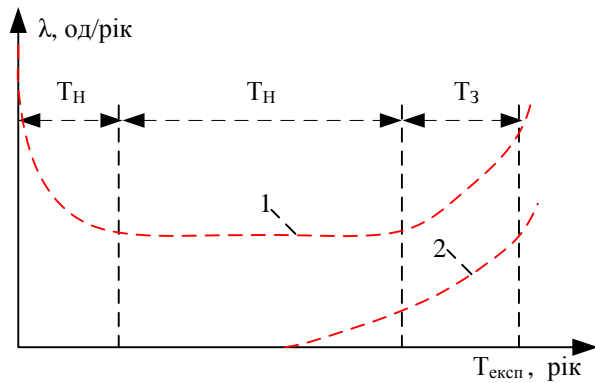


Рис. 1 – Залежність частоти відмов обладнання від часу експлуатації

1 – інтенсивність відмов; 2 – крива старіння;
 T_p – період приробітку; T_n – період нормальної роботи; T_z – період зносу; $T_{експ}$ – паспортний термін експлуатації.

Результати досліджень літературних джерел свідчать про те що найбільш широко мають місце наступні пошкодження основних вузлів СТ: ізоляція 29,1 %, система охолодження 23,1 %, високовольні вводи 15,6 %, обмотки 9,7 %, РПН 9,5 %, бак 7,6 % та магнітопровід 5,4 %. Отже, часто ТО виводиться з експлуатації внаслідок пошкоджень обмоток та магнітопроводу, тому під час експлуатації, потрібно враховувати технічний стан та зміну діагностичних параметрів цих вузлів.

Методи діагностування технічного стану обмоток та магнітопроводу

Методи діагностування ґрунтуються на результатах контролю діагностичних параметрів і передбачають визначення технічного стану, причин та місця пошкодження. Для визначення стану порівнюють виміряне значення діагностичного параметра з нормованим значенням цього показника, або з нормованим його відхиленням від результатів попередніх вимірів. Так, наприклад, опір обмоток постійному струму, в процесі експлуатації, не повинний істотно змінюватися. Виміряне значення опору не повинно відрізнитися більш ніж на 2% від даних заводських і попередніх випробувань [7,8].

Вимірювання проводяться на всіх відгалуженнях кожної фази. Значення опору на одних і тих же відгалуженнях різних фаз також не повинні відрізнитися один від іншого, якщо немає особливих застережень у паспорті трансформатора.

Опори обмоток силових трансформаторів малі. Вони вимірюються вимірювальними мостами [7], або методом падіння напруги (його називають також методом вольтметра-амперметра).

Контроль параметрів холостого ходу дозволяє визначити деякі дефекти обмотки і магнітопроводу. На заводі-виробнику, а також, за [7], під час

проведення капітального ремонту, пов'язаного з необхідністю перешихтування осердя, або його верхнього ярма, використовують параметри холостого ходу при номінальній і зниженій напрузі.

Згідно [6] практика випробувань на стійкість, під час КЗ, показала високу ефективність вимірювання напруги короткого замикання ($U_k, \%$) для діагностування стану трансформатора.

При протіканні струмів КЗ, на обмотки трансформатора діють електродинамічні сили. Під їх впливом можуть виникнути деформації обмоток.

Під час таких деформацій, особливо радіальних, змінюється розміщення та відстань витків, між собою, а також відносно магнітопроводу. Як наслідок, відбувається зміна напрямків магнітних потоків розсіювання, що призводить до зміни індуктивного опору короткого замикання (X_k), а отже, Z_k , причому в потужних трансформаторах $Z_k \approx X_k$.

У деяких випадках, під час діагностування механічного стану обмоток успішно поєднують вимірювання Z_k з методом низьковольтних імпульсів. Цей метод чутливий до виникнення дефектів обмоток на ранній стадії їх розвитку.

Однак, аналіз пошкоджуваності СТ свідчить про те, що контролюючи тільки один параметр, важко виявити дефекти, особливо на ранній стадії їх розвитку [8÷10].

Тому потрібно використовувати додаткові діагностичні параметри, наприклад: передатна функція тестового сигналу; залежність залишкового опору тестового сигналу від частоти; відхилення початкового графіку залежності фазного тестового сигналу, від частоти для поточних та передостанніх вимірювань.

Результати діагностування методом частотного аналізу

Статистика пошкоджуваності силового обладнання спонукає підприємства енергетичної галузі використовувати сучасні прилади та діагностичні системи, такі, наприклад, як FRAnalyzer. Однак, ефективне використання таких приладів, як наприклад, FRAnalyzer, часто обмежене відсутністю бази дефектів для вітчизняних трансформаторів та їх зв'язку із значенням діагностичного параметру.

Тому, потрібно проводити дослідження діагностичних частотних параметрів для різних типів вітчизняних трансформаторів. З метою накопичення інформації про частотні характеристики авторами обстежено ряд трансформаторів на такі класи напруг 110 кВ, 35 кВ, 10 кВ таких типів, як ТДТН, ТМ, ТОМА.

В результаті діагностичного дослідження, за допомогою приладу FRAnalyzer, отримані залежності, одна з яких представлена на рисунку 2. Також в таблиці 2 представлений фрагмент даних протоколу трансформатора вимірювань діагностичних параметрів трансформатора ТМ – 6300/110, перед

виконанням частотного діагностування. Як видно у досліджуваного трансформатора такий діагностичний параметр, як потужність холостого ходу (P_{XX}) під час експлуатації змінилась на 9,8 % (порівняно з

результатами заводський випробовувань), що свідчить про те, що значення цього діагностичного параметра наближається до критичного [6].

Таблиця 2 – Фрагмент протоколу вимірювань і випробувань параметрів трансформатора ТМ – 6300/110

Тип	Рік випуску	Потужність S, кВА	Номинальна напруга ВН/НН	Виміряні втрати ХХ під час діагностування	Паспортна величина втрат ХХ
ТМ – 6300/110	1966	6300	110/35	9,02	10

Тому такий трансформатор потребує подальших поглиблених обстежень з метою обґрунтування умов подальшої експлуатації та обслуговування.



Рис. 2 – Графіки залежності діагностичних частотних параметрів трансформатора ТМ – 6300/110 від частоти (отримані шляхом використання приладу FRAnalyzer)

Як видно, з рисунку 2 в діапазоні частоти від 0,1 кГц до 2 кГц, має місце відхилення графіку залежності передатної функції тестового синусоїдального сигналу від частоти фази А від подібного графіку, але фази С [9,11]. Що і підтверджено подальшими вимірюваннями значень такого діагностичного параметру, як потужність холостого ходу, які показали, що відхилення P_{XX} від паспортного значення для цього трансформатора складає 9,8 %.

Отже, відхилення графіку залежності передатної функції від частоти фази А від подібного графіку, але фази С не менше ніж на 2% (в діапазоні частоти тестового сигналу від 0,1 кГц до 2 кГц) свідчить про дефекти в магнітопроводі [10 - 12].

Висновки

Досліджено пошкоджуваність силового обладнання електроенергетичних систем, які показали, що більшість пошкоджень виявляється з 1-го по 3-тій роки експлуатації та після 25 років. Результати досліджень пошкоджуваності силових трансформаторів, які свідчать про те, що чимала частина таких ушкоджень - це дефекти магнітопроводів і обмоток.

Потрібно вдосконалювати, методи та засоби діагностування новими більш інформативними, які дозволяють виявляти дефекти силового обладнання на ранній стадії їх розвитку, оскільки контроль струму і потужності холостого ходу трансформатора, активного опору ізоляції обмоток, опору короткого замикання та інших, обумовлених в нормативної та в паспортної документації діагностичних параметрів при використанні наявних у підприємств, що експлуатують трансформатори, діагностичних засобів, не завжди дозволяє виявляти деякі дефекти цих деталей і вузлів, особливо на ранній стадії їх розвитку.

Дефекти пов'язані з дефектами обмоток та погіршенням стану магнітопроводу краще виявляються шляхом порівняння частотних характеристик.

Для ефективного використання приладів контролю частотних характеристик бажано розробити вітчизняну нормативну базу, яка б дозволила експлуатаційним організаціям обґрунтовано враховувати погіршення стану обмоток та магнітопроводу під час подальшої експлуатації або виведення з експлуатації.

Список літератури

1. Матусевич, О. О. Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць: [препринт] / О. О. Матусевич // Гірничі електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 92. – С. 31-36.

2. **Tenbohlen, S.** Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungs transformatoren" (em inglês) / **S. Tenbohlen, F. Vahidi, P. Müller, J. Gebauer, M. Krüger** // *Proc. Stuttgarter Hochspannungs symposium*. – 2012. – P. 61-70.
3. **Tenbohlen, S.** Diagnostic measurements for power transformers / **S. Tenbohlen**, et al. // *Energies*. – 2016. – 9. – №. 5. – P. 347. – doi:10.3390/en9050347.
4. **Coenen, S.** Location of PD sources in power transformers by UHF and acoustic measurements / **S. Coenen, S. Tenbohlen** // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 2012. – 19. – P. 1934–1940. – doi: 10.1109/TDEI.2012.6396950.
5. **Лежнюк, П. Д.** Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС з урахуванням технічного стану трансформаторів із РПН / **П. Д. Лежнюк, О. С. Рубаненко, О. І. Казьмірук** // *Наукові праці ВНТУ*. – 2012. – №4. – 9 с.
6. **Матусевич, О. О.** Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія / **О. О. Матусевич**; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. В. Лазаряна. - 2015. - 295. - с. 278-293.
7. Галузевий керівний документ. Норми випробовування електрообладнання: затверджено і введено в дію наказом Міністерства палива та енергетики України № 13 від 15 січня 2007 р. / ДП «ДонОРГРЕС», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС»; розробники : Г. Шкуринський, В. Боcharов, В. Сприса – К.: Державний стандарт України, 2007. – 262 с.
8. IEC 60076-7. Power Transformers—Part 7: Loading Guide for Oil Immersed Power Transformers; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland. – 2005.
9. **Wang, S.** Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic-Structural Coupling Model / **S. Wang** et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2016. – Т. 26. – №. 7. – С.1-5. – doi: 10.1109/TASC.2016.2584984.
10. **Jalal, M. A.** Using the frequency response analysis (FRA) in transformers internal faults detection / **M. A. Jalal** // *WSEAS transaction on Power systems*. – 2009. – 9. – 4. – P. 297-306.
11. **Reykerdt, A. A.** Case studies of factors influencing frequency response analysis measurements and power transformer diagnostics / **A. A. Reykerdt, V. Davydov** // *IEEE Electr. Insul. Mag.* – 2011. – 27. – P. 22–30. – doi: 10.1109/MEI.2011.5699444.
12. **Zhang, Z. W.** Experimental investigation of localized axial winding displacement in a high frequency range for power transformers / **Z. W. Zhang** et al. // *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), International Conference on IEEE*. – 2016. – P. 388-391. – doi: 10.1109/CMD.2016.7757841.
1. **Matusevich, A.** Improvement of diagnostics of power transformers traction substations of electrified railways. *Mining electrical engineering and automation, nauk. Tech. Coll. - Dnepropetrovsk*, 2014, **92**, 31-36.
2. **Tenbohlen, S., Vahidi, F., Müller, P., Gebauer, J., Krüger, M.** Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungs transformatoren" (em inglês), *Proc. Stuttgarter Hochspannungs symposium*, 2012, 61-70.
3. **Tenbohlen, S.** et al. Diagnostic measurements for power transformers. *Energies*, 2016, **9**, 5, 347, doi: 10.3390 / en9050347.
4. **Coenen, S., Tenbohlen, S.** Location of PD sources in power transformers by UHF and acoustic measurements. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, **19**, 1934-1940, doi: 10.1109 / TDEI.2012.6396950.
5. **Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ye., Kazmiruk, O. I.** Optimal control normal modes of EPS based technical condition of transformers from RPN, *Proceedings NTB*, 2012, **4**, 9 p.
6. **Matusevich, A.** Improving the System of maintenance of traction substations: Monograph; Dniepropetrovsk. nat. University of Railway. transp. them. V. Lazaryan, 2015, 295, P. 278-293.
7. Industry guidance document. Norms Electrical test approved and commissioned by the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine № 13 dated January 15, 2007 / SE "DONORGRES", JSC "Lviv ORGRES"; developers G. Shkurinskaya, V. Bocharov, VA Sprysa - K. : State Standard of Ukraine, 2007, 262 p.
8. IEC 60076-7. Power Transformers-Part 7: Loading Guide for Oil Immersed Power Transformers; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2005.
9. **Wang, S.** et al. Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic-Structural Coupling Model, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, **26**, 7, 1-5, doi: 10.1109 / TASC.2016.2584984.
10. **Jalal, M. A.** Using the frequency response analysis (FRA) in transformers internal faults detection, *WSEAS transaction on Power systems*, 2009, **9**, 4, 297-306.
11. **Reykerdt, A., Davydov, V.** Case studies of factors influencing frequency response analysis measurements and power transformer diagnostics, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2011, **27**, 22-30, doi: 10.1109 / MEI.2011.5699444.
12. **Zhang Z. W.** et al. Experimental investigation of localized axial winding displacement in a high frequency range for power transformers, *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016 International Conference on IEEE*, 2016, 388-391, doi: 10.1109 / CMD.2016.7757841.

Bibliography (transliterated)

Відомості про авторів (About authors)

Рубаненко Олександр Євгенійович – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри електричних станцій та підстанцій, м. Вінниця, Україна; e-mail: rubanenkoae@ukr.net.

Alexander Rubanenko - Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Chair of Electric Stations and Systems, Chair of Electric Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: rubanenkoae@ukr.net.

Лабзун Михайло Павлович – кандидат технічних наук, Південно-західна електроенергетична система, начальник відділу діагностики, м. Вінниця, Україна; e-mail: labzun.mp@rdcm.sw.energy.gov.ua.

Mikhail Labzun – Candidate of Science (Engineering), Southwest Power System, Head diagnosis of Vinnitsa, e-mail: labzun.mp@rdcm.sw.energy.gov.ua.

Гришук Максим Олександрович – аспірант, Вінницький національний технічний університет, аспірант кафедри електричних станцій та підстанцій, м. Вінниця, Україна; e-mail grishuk.maksim.93@ukr.net.

Maksim Hryshchuk - postgraduate, postgraduate of the Chair of Electric Stations and Systems, Chair of Electric Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, e-mail: grishuk.maksim.93@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Рубаненко, О. Є. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів / **О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. О. Гришук** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 23 (1245). – С. 41-46. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07.

Please cite this article as:

Rubanenko, A., Labzun, M., Hryshchuk, M. Definition defects of transformer equipment using frequency diagnostic parameters. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **23** (1245), 41–46, doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Рубаненко, А. Е. Определение дефектов трансформаторного оборудования с использованием частотных диагностических параметров / **А. Е. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. А. Гришук** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2017. - № 23 (1245). – С. 41-46. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07

АННОТАЦИЯ Целью статьи является исследование повреждаемости силовых трансформаторов, методов и средств определения их технического состояния. Представлены результаты исследований повреждаемости силовых трансформаторов, которые показывают, что значительную часть таких повреждений занимают дефекты магнитопровода и обмоток, относительно других узлов силового трансформатора. В статье обращено внимание на использование FRAnalyzer и отсутствия отечественной нормативной документации, которая позволяет аргументированно интерпретировать результаты диагностирования таким оборудованием. Статья позволяет оценить эффективность методов и средств диагностирования силового оборудования энергосистем.

Ключевые слова: силовой трансформатор; диагностирования; повреждаемость; частотный анализ; магнитопровод; обмотки.

Надійшла (received) 30.05.2017