

М.О. ГРИЩУК, О.Є. РУБАНЕНКО, І.О. ГУНЬКО  
Вінницький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ФОТОВОЛЬТАІЧНІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

*Представлені результати аналізу пошкодженого та нового досліджуваних трансформаторів свідчить про те умови експлуатації цих трансформаторів не порушувались. Запропоновані схеми, місця підключення приладів, методика досліджень а також прилади FRAnalyzer фірми Omicron, FLUKE 1736 та SATEC PM 175 дозволяють швидко та якісно визначити технічний стан СТ та показники якості електричної енергії. Аналіз вимірюваних АЧХ досліджуваного СТ свідчить про справний стан досліджуваного СТ, а саме тому, що відхилення отриманих АЧХ спостерігається у межах 2%, це свідчить про те, що СТ не має пошкодження; на деяких характеристиках та на відповідних діапазонах частот, спостерігалось відхилення в межах 5%. Автори рекомендують, переглянути дату наступного планового технічного діагностування, та під час його проведення варто звернути увагу на стан його обмоток.*

*Ключові слова: діагностування; пошкодження; трансформатор; амплітудно-частотна характеристика; обмотка; магнітопровід, методика вимірювань.*

M.A. HRYSHCHUK, A. E. RUBANENKO, I.A. HUNKO  
Vinnitsa National Technical University

### INVESTIGATION OF THE DAMAGE OF THE POWER TRANSFORMER AT THE PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

*Abstract – The depletion of explored reserves of fossil fuels leads to an increase in their value and compels humanity to seek new and alternative forms of energy. Rapid growth of photovoltaic, wind, small hydro power plants, etc. led to the redistribution of electricity flows along transmission lines through high-voltage power transformers, whose passport resource has already been exhausted. The risk of accidents and power shortages is increasing. Therefore, it is necessary to investigate the damage of high-voltage equipment of power plants using renewable energy to improve the known and to develop new methods and means of monitoring the technical condition of such equipment. Therefore, the analysis of damage to the power transformer at the photovoltaic power plant, tasks and research results are relevant. The presented results of the analysis of the damaged and newly investigated transformers indicate that the operating conditions of these transformers were not violated. The proposed circuits, connection points, research methodology, and FRAnalyzer devices from Omicron, FLUKE 1736 and SATEC PM 175 allow you to quickly and qualitatively determine the technical state of the electric power and the quality of electricity. The analysis of the measured frequency response of the investigated CT indicates the proper condition of the investigated CT, namely because: the deviation of the received frequency response is observed within 2%, it indicates that the CT is free of damage; on some characteristics and on the corresponding frequency ranges, deviations were observed within 5%.*

*Keywords: diagnosis; damage; transformer; frequency analysis; windings; planning.*

### Вступ

Використання відновлюваних джерел енергії на сьогодні є важливим та перспективним напрямком розвитку електроенергетичного комплексу України. В останні роки в Україні спостерігається зростання потужностей генерування електричних станцій, що працюють на відновлюваних джерелах енергії, зокрема до таких станцій можна віднести фотовольтаїчні електричні станції (ФЕС) [1]. Оскільки кількість енергії, що виробляється з відновлюваних джерел, зростає, то це впливає на параметри нормальних режимів електроенергетичних систем (ЕЕС) та на якість електричної енергії [3]. Виробництво електроенергії електричними станціями, що використовують джерела відновлюваної енергії ставить нові завдання з безаварійної експлуатації високовольтної обладнання. Оскільки робота таких об'єктів залежить від погодних умов, режим їх роботи носить динамічний характер. ФЕС на протязі доби змінює генеровану потужність, що впливає на параметри режиму роботи, призводить до частих перехідних процесів, які ускладнюють умови експлуатації високовольтного обладнання не лише ФЕС, а і розподільних електричних мереж.

Одним із важливих елементів таких об'єктів, як ФЕС та розподільні електричні мережі 10-35 кВ є, силові трансформатори (СТ) - це вартісні та відповідальні види високовольтного обладнання [1÷3]. Кожне несподіване відключення СТ пов'язане з неочікуваними фінансовими витратами не лише для електроенергетичного підприємства, а також і для споживачів електроенергії, які отримують електр енергію, використовуючи цей трансформатор [4]. Та зважаючи на змінний в часі режим роботи ФЕС, ресурс силових трансформаторів зменшується швидше ніж у СТ, що експлуатуються в умовах стабільних навантажень [3].

Отже, важливим під час експлуатації ФЕС є моніторинг (огляди, вимірювання показників режиму та діагностичних параметрів і т.п.) з метою підтримання належного технічного стану СТ шляхом вчасних ремонтів, або шляхом корегування умов експлуатації. Для цього варто застосовувати релейний захист, використовувати сучасні методи та засоби діагностування СТ, такі як контроль тангенса кута діелектричних втрат ізоляції tg $\delta$ , визначення опору постійному струму, проведення експериментів короткого замикання та холостого ходу, хроматографічного аналізу розчинених в трансформаторній оліві газів, тепловізійне обстеження, тощо [5]. Незважаючи на різноманітні методів та засобів діагностування СТ, мають місце пошкодження СТ при експлуатації на ФЕС, хоча термін їх експлуатації на таких об'єктах електроенергетичного комплексу, відносно малий. Тому дослідження, результати яких наведені в статті є актуальними.

**Метою** досліджень є аналіз пошкодження силового трансформатора на фотовольтаїчній електростанції

**Задачі** досліджень відповідно до мети наступні:

Аналіз об'єкту досліджень - силового трансформатора Писарівської ФЕС;

Аналіз особливостей вимірювального та діагностичного обладнання;

Розробка схеми приєднання вимірювального обладнання та алгоритму досліджень;

Аналіз вимірних АЧХ досліджуваного СТ.

Визначення поточного технічного стану СТ за результатами аналізу отриманих АЧХ.

#### Аналіз об'єкту досліджень

Як приклад, пропонується розглянути ФЕС «ПИСАРІВКА», що розташована в Хмельницькій області, Старокостянтинівського району (селище Писарівка). На ФЕС пошкодився СТ (рис.1) типу ТМГ 1000/10 У1 (рис. 36). У трансформатора виявлено пошкодження обмоток. Вид пошкодження - сповзання та замкнення витків обмотки.

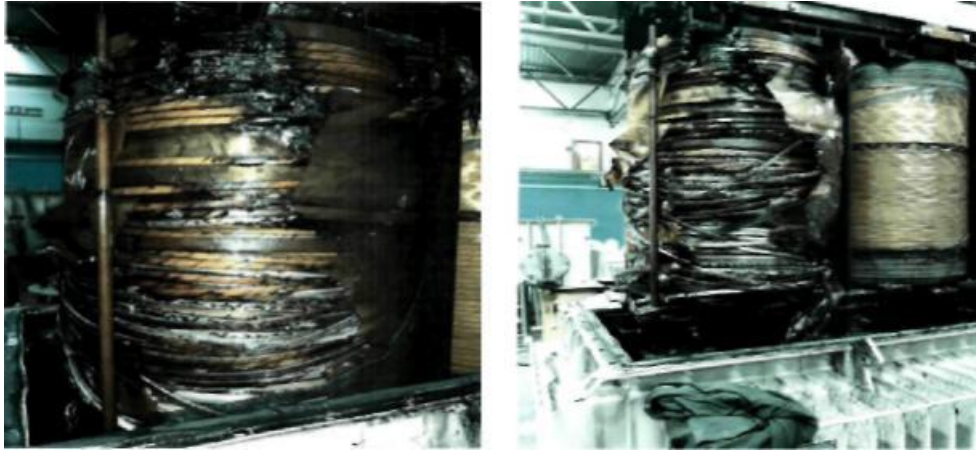


Рис. 1. Пошкодження СТ ТМГ 1000/10 У1

Враховуючи вартість такого обладнання, пропонується періодично контролювати технічний стан СТ, який експлуатується на ФЕС.

Правильний вибір діагностичної процедури та правильна інтерпретація результатів, отриманих при різних схемах вимірювань, покликані забезпечити більш надійну роботу не лише ФЕС, а і енергопостачальної компанії.

Відомо [1-6], що аналіз зміни напруги сигналу відгуку на тестовий сигнал, що прикладається до СТ приладом FRAnalyzer фірми AMICRON вважається ефективним методом визначення технічного стану обмотки та магнітопроводу СТ. Тестовий сигнал автоматично змінювався приладом FRAnalyzer. Така зміна частоти викликала зміну напруги сигналу відгуку. Цей метод дозволяє виявити деформації обмоток, пошкодження бандажу, пошкодження магнітопроводу та багато інших порушень. Як правило, як амплітудно-частотні, так і фазові частотні сигнатури отримуються за допомогою FRAnalyzer. Метод визначення технічного стану СТ за результатами аналізу амплітудно-частотних характеристик (АЧХ), це недорогий, точний та неруйнівний метод. Методика проведення такого аналізу не вимагає відкриття баку СТ. Враховуючи це, пропонується дослідити АЧХ СТ Писарівської ФЕС.

#### Методика досліджень стану СТ

Для проведення досліджень технічного стану нового СТ (розташованого на місці експлуатації пошкодженого) ФЕС «Писарівка» та з метою визначення можливих причин пошкодження СТ застосовувалось наступне вимірювальне та діагностичне обладнання: FRAnalyzer - для вимірювання параметрів АЧХ; FLUKE 1736 та SATEC PM 175 - для вимірювання показників якості електроенергії.

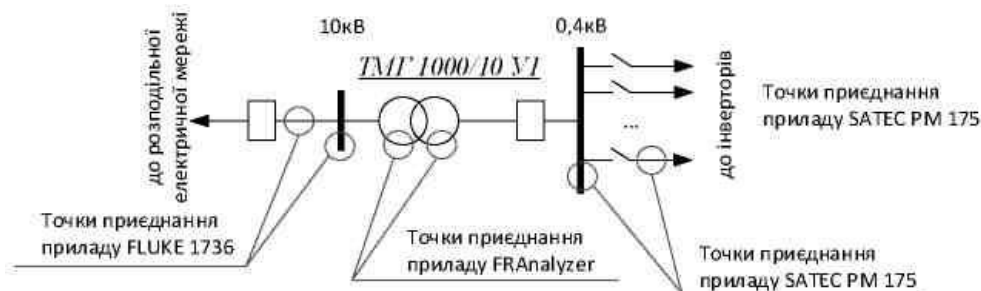


Рис. 2. Місця приєднання діагностуючого обладнання

Програма досліджень передбачала контроль показників якості електроенергії під час генерування ФЕС електричної енергії, а також контроль АЧХ СТ, що експлуатується на ФЕС.

Точки приєднання приладів контролю якості електроенергії FLUKE 1736 та SATEC PM 175 показані на рис. 2.

Результати вимірювань показників якості електричної енергії свідчать про те, що відхилень порушень вимог нормативних документів з якості електричної енергії виявлено **не було**. Розташування обладнання під час вимірювання показників якості електричної енергії показано на рис. 3.



а

б

в

Рис. 3. Розташування приладів FLUKE 1736 та SATEC PM 175 для одночасного контролю показників якості електричної енергії

Фото обладнання під час підключення та вимірювань АЧХ трансформатора показані на рис. 4.



а)

б)

в)

г)

Рис. 4. Фото з місця проведення вимірювань АЧХ СТ

Параметри використовуваного приладу FRAnalyzer фірми Omicron та його технічні характеристики приведені в табл. 1 [7].

Таблиця 1

Технічні характеристики приладу FRAnalyzer

Діапазон частотного сигналу	10 Гц - 20 МГц
Шкала побудови графіку АЧХ	- логарифмічна; - лінійна; - обидві.
Операційна система	- Windows 7, 64 bit
Вхідний опір	- не менше 1 МОм
Джерело живлення	- від 100 до 240 В, 50 Гц
Похибка приладу	< 0.1 дБ (вище -50 дБ) та ±1 дБ (від -50 дБ до -80 дБ)

Для аналізу умов експлуатації та технічного стану досліджуваного СТ проведені наступні дослідження: у відповідності до наступної послідовності:

- візуальний огляд СТ;
- контроль параметрів ізоляції СТ, з допомогою омметра;
- контроль параметрів захисного заземлення;
- вимірювання АЧХ, для виключення випадкової похибки вимірювання за однією і тією ж схемою проводились декілька разів;
- порівняння отриманих результатів із попередньо отриманими типовими характеристиками;
- визначення технічного стану СТ шляхом аналізу отриманих АЧХ та порівняння їх з АЧХ інших, справних однотипних СТ.

Як видно, з табл. 1, такий прилад може забезпечити точні результати вимірювань, та дати адекватні результати для оцінки стану СТ. Під час вимірювань FRAnalyzer розташовувався в автомобілі або на попередньо місці (рис. 4 а та рис. 4 в). Схема підключення приладу до досліджуваного трансформатора показана на рис. 5. Потрібно зауважити, що хоча метод дослідження стану СТ за допомогою вимірювання його АЧХ, дає точні результати та дозволяє визначити дефекти обмоток та магнітопроводу навіть на ранній стадії їх розвитку, алгоритм проведення таких вимірювань вимагає відключення СТ від мережі [7-9] , тому вимірювання проводились в час доби коли ФЕС не генерувала електричну енергію.

Коефіцієнт передачі тестового сигналу вимірюється в децибелах і є результатом ділення значення напруги відгуку на напругу тестового сигналу для поточного значення частоти. Передатна функція по напрузі  $k_U(f)$  визначається за виразом (1)

$$k_U(f) = 20 \cdot \log_{10} [U_2(f) / U_1(f)], \text{ dB.} \quad (1)$$

Значення  $k_U(f)$  залежить від напруги вхідного тестового сигналу та напруги вихідного тестового сигналу. Спад напруги тестового сигналу залежить від фізичних властивостей досліджуваного силового обладнання (активний опір обмоток, індуктивний опір обмоток, ємність обмоток, та феромагнітні властивості силового трансформатора).

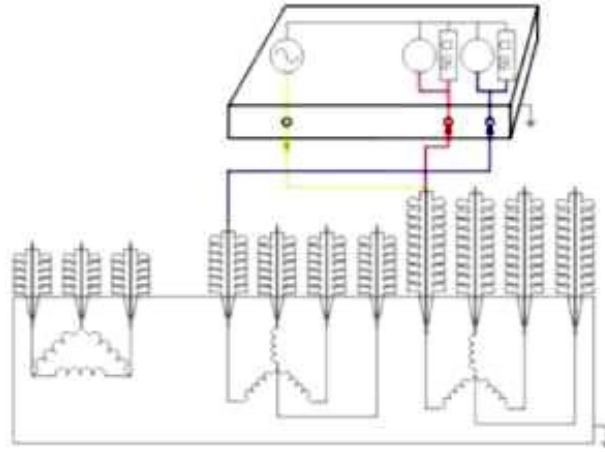


Рис. 5. Схема присіднання приладу FRAnalyzer до СТ

Вимірювання проводились за схемою підключення яка показана на рис. 5, враховуючи те що трансформатор трифазний і те, що вимірювання проводились за різними схемами підключення приладу FRAnalyzer до СТ. Частина отриманих результатів показана на рис. 6.

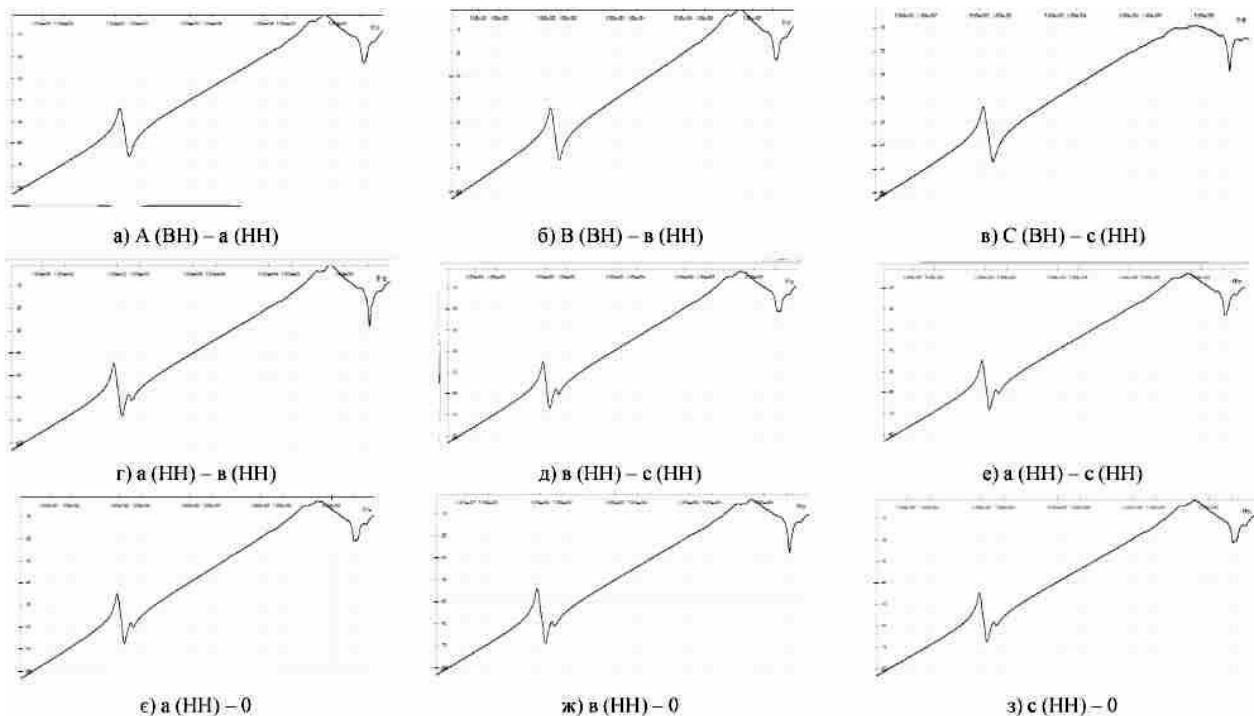
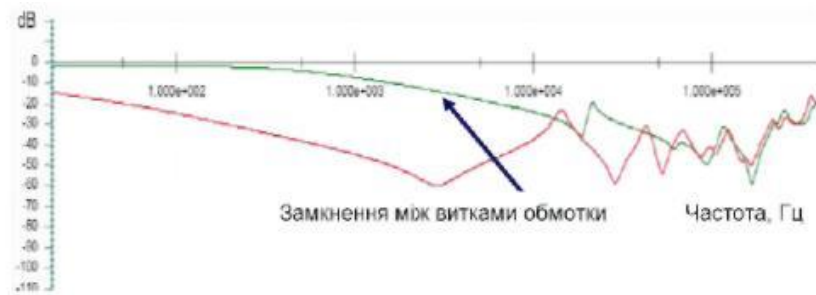
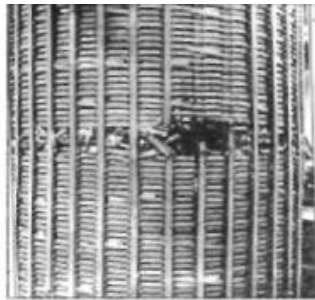


Рис. 6. Отримані АЧХ СТ

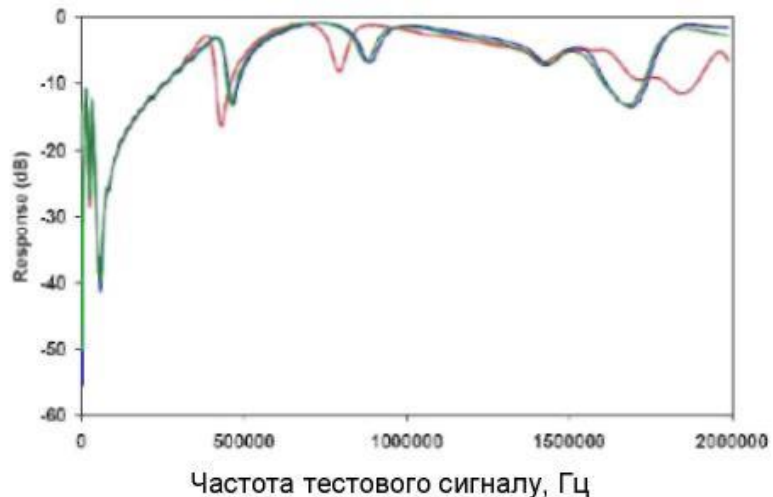
На рис. 5 зображено отримані АЧХ трансформатора, за різних схем підключення приладу до досліджуваного СТ. Вимірювання АЧХ відбувалося так: подавався тестовий сигнал на обмотки СТ. Частота тестового сигналу автоматично змінювалась від 0 до 2 МГц. Спочатку тестовий сигнал подавався на обмотку високої напруги (ВН) фази А. Одночасно контролювалась напруга сигналу відгуку на виводі вторинної обмотки низької напруги (НН) фази а, рис. 5.а. За таким же принципом отримані інші АЧХ досліджуваного СТ, які показані на рис.5. Виміряні значення параметрів АЧХ за використані для побудови графіків залежності передатної функції трансформатора (за напругою) від частоти тестового сигналу допомогою програмного комплексу фірми Omicron.

Далі виконано порівняння отриманих АЧХ із попередньо вимірними для інших подібних досліджуваному трансформаторах. Отримані результати перевірки, у відповідності до [4-5], свідчать про відсутність пошкоджень обмотки та магнітопроводу СТ, оскільки відхилення, отриманої характеристики від попередньої, складає <math><2\%</math>. На нижньому у графіку зображено сигнал у Гц. З даного графіку видно що фізичні параметри СТ, в межах норми, що свідчить про справний стан обмоток. Хоча, на деяких графіках на відповідних діапазонах частот, за [4], спостерігалось відхилення в межах 5%. Як описано в [4-5], це свідчить про справний стан СТ, та варто зазначити, що ймовірно мають місце і мікро зрушення. Такі як, наприклад, зменшення натягу кріплення бандажу чи зміна ємнісного опору між витками СТ.

Для порівняння на рис. 7 а показана АЧХ трансформатора у якого пошкодження витків обмотки, а на рис. 7 б - сповзання витків [2].



а) — А (ВН) — 0, — В (ВН) — 0



б) — А (ВН) — а (НН), — В (ВН) — в (НН), — С (ВН) — с (НН)

Рис. 7. АЧХ пошкоджених трансформаторів

### Висновки

Аналіз пошкодженого та нового досліджуваних трансформаторів свідчить про те умови експлуатації цих трансформаторів не порушувались;

Прилади FRAnalyzer фірми Omicron, FLUKE 1736 та SATEC PM 175 дозволяють швидко та якісно визначати технічний стан СТ та показники якості електричної енергії;

Запропоновані схеми, місця підключення приладів, методика досліджень дозволяють визначати якість генерованої ФЕС електричної енергії та технічний стан СТ.

Аналіз вимірних АЧХ досліджуваного СТ свідчить про справний стан досліджуваного СТ, а саме тому, що відхилення отриманих АЧХ спостерігається у межах 2%, це свідчить про те, що СТ не має пошкоджень; на деяких характеристиках та на відповідних діапазонах частот, спостерігалось відхилення в межах 5%.

### Література

1. Лежнюк П.Д. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії: монографія / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гулько – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 164 с. – ISBN 978-966-641-717-9.

2. Доля О. Е. Практический опыт использования метода FRA при измерении трансформаторного оборудования: презентация доклада / О. Е. Доля // Запорожье. - ПАО «Запорожтрансформатор». - Сервисный центр. - 36 с.

3. Vaisnys J. et al. Power transformer working regime analysis in photovoltaic power stations //2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – IEEE, 2018. – С. 1-4.
4. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Гришук М. О. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. – 2017.
5. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Гришук М. О. Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2017. – №. 186. – С. 103-106.
6. Nurmanova V. et al. A New Transformer FRA Measurement Technique to Reach Smart Interpretation for Inter-disk Faults //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019.
7. OMICRON, FRAnalyzer, ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA DE BARRIDO PARA EL DIAGNÓSTICO DE LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA. Manual del usuario.
8. Zhao Z. et al. Diagnosing Transformer Winding Deformation Faults Based on the Analysis of Binary Image Obtained From FRA Signature //IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – С. 463-474.
9. Samimi M. H. et al. Detection of transformer mechanical deformations by comparing different FRA connections //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – Т. 86. – С. 53-60.

#### References

1. Lezhnyuk P.D. Optimizacziya rezhimiv elektrichnikh meshch z vidnovlyuvanimi dzherelami elektroenergiyi: monografiya / P.D. Lezhnyuk, O.Ye. Rubanenko, Г.О. Gunko – Vinniczya: VNTU, 2017. – 164 s. – ISBN 978-966-641-717-9.
2. Dolya O. E. Prakticheskij opyt ispolzovaniya metoda FRA pri izmerenii transformatornogo oborudovaniya: prezentacziya doklada / O. E. Dolya // Zaporozhe. - PAO «Zaporozhtransformator». - Servisnyj cenztr.-36 s.
3. Vaisnys J. et al. Power transformer working regime analysis in photovoltaic power stations //2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – IEEE, 2018. – С. 1-4.
4. Rubanenko O. Ye., Labzun M. P., Grishhuk M. O. Viznachennya defektiv transformatornogo obladnannya z vikoristannyam chastotnikh diagnostichnikh parametriv. – 2017.
5. Rubanenko O. Ye., Labzun M. P., Grishhuk M. O. Obg`runtuvannya mozhlivosti viyavlennya defektiv deformacziyi obmotok silovogo transformatora za rezultatami vimiryuvan` FRA //Visnik Kharkivskogo naczionalnogo tekhnichnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. – 2017. – № 186. – S. 103-106.
6. Nurmanova V. et al. A New Transformer FRA Measurement Technique to Reach Smart Interpretation for Inter-disk Faults //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019.
7. OMICRON, FRAnalyzer, ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA DE BARRIDO PARA EL DIAGNÓSTICO DE LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA. Manual del usuario.
8. Zhao Z. et al. Diagnosing Transformer Winding Deformation Faults Based on the Analysis of Binary Image Obtained From FRA Signature //IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – S. 463-474.
9. Samimi M. H. et al. Detection of transformer mechanical deformations by comparing different FRA connections //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – Т. 86. – S. 53-60.

Рецензія/Peer review : 20.12.2019 р.

Надрукована/Printed : 02.01.2020  
Рецензент: д.т.н., проф. Кутін В. М.