

**ЧОРНИЙ ОЛЕКСАНДР**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0003-6118-0447>e-mail: [chorny\\_oleksandr@ukr.net](mailto:chorny_oleksandr@ukr.net)

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

У статті розглянуто сучасні методи та засоби діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів, які є критично важливими елементами електроенергетичних систем. Проаналізовано конструктивні особливості та режими роботи трансформаторів струму та напруги, включаючи специфіку їх ізоляційних систем. Детально розглянуто традиційні методи діагностування, зокрема вимірювання опору ізоляції, коефіцієнта абсорбції, тангенса кута діелектричних втрат та перевірку коефіцієнтів трансформації. Особливу увагу приділено хроматографічному аналізу газів, розчинених у трансформаторному маслі, як найбільш ефективному методу виявлення внутрішніх дефектів.

Ключові слова: Високовольтні вимірювальні трансформатори, діагностування, хроматографічний аналіз газів, тепловізійний контроль.

**CHORNYI OLEKSANDR**

Vinnytsia National Technical University

## METHODS AND MEANS OF DIAGNOSING HIGH-VOLTAGE MEASURING TRANSFORMERS

The article examines modern methods and tools for diagnosing high-voltage measuring transformers, which are critically important elements of electric power systems. The design features and operating modes of current and voltage transformers are analyzed, including the specifics of their insulation systems. Traditional diagnostic methods are considered in detail, including insulation resistance measurement, absorption coefficient, dielectric loss tangent, and transformation ratio verification. Special attention is paid to chromatographic analysis of gases dissolved in transformer oil as the most effective method for detecting internal defects. Rogers ratio methods and dynamic analysis of gas concentration changes for identifying defect types and intensity are examined. The possibilities of thermal imaging diagnostics for detecting local overheating and vibration diagnostics for identifying mechanical defects are analyzed. The prospects of digital technology applications are highlighted, including online monitoring systems, intelligent sensors, machine learning algorithms, and digital twins. The necessity of a comprehensive approach to diagnostics with integration of results from different methods is substantiated, and the development prospects of diagnostic technologies are considered. The research demonstrates that while traditional electrical methods remain fundamental, their effectiveness is significantly enhanced when combined with modern technologies such as dissolved gas analysis, thermal imaging, and vibration monitoring. Digital technologies open new possibilities for creating intelligent diagnostic systems capable of real-time operation and predictive maintenance, representing a promising direction for improving power equipment reliability.

Keywords: High-voltage measuring transformers, diagnostics, dissolved gas analysis, thermal imaging control, vibration diagnostics.

Стаття надійшла до редакції / Received 10.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 27.05.2025

### Постановка проблеми

Високовольтні вимірювальні трансформатори є критично важливими елементами електроенергетичних систем, які забезпечують гальванічну розв'язку та перетворення первинних струмів і напруг до стандартних значень для живлення вимірювальних приладів, пристроїв релейного захисту та автоматики. Надійність функціонування цих пристроїв безпосередньо впливає на безпеку експлуатації електроустановок і якість електропостачання споживачів.

Діагностування технічного стану високовольтних вимірювальних трансформаторів набуває особливої актуальності в умовах старіння електроенергетичного обладнання та зростаючих вимог до надійності електропостачання. Своєчасне виявлення дефектів дозволяє запобігти аварійним ситуаціям, оптимізувати витрати на технічне обслуговування та продовжити термін експлуатації обладнання.

Сучасні методи діагностування базуються на комплексному підході, який включає традиційні електричні випробування, хроматографічний аналіз газів, розчинених у трансформаторному маслі, тепловізійний контроль, вібродіагностику та інші прогресивні технології. Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для створення автоматизованих систем діагностування, здатних працювати в режимі реального часу та забезпечувати прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

### Аналіз останніх досліджень

Аналіз сучасної літератури показує активний розвиток методів діагностування високовольтного обладнання. Бржезицький В.О. та співавтори [1] детально розглянули принципи роботи електричних апаратів та основні підходи до їх діагностування, акцентуючи увагу на традиційних електричних методах контролю. Клименко Б.В. [2] дослідив специфіку електромеханічної апаратури комутації та запропонував комплексний підхід до оцінки технічного стану обладнання з урахуванням режимів експлуатації.

**Метою роботи є:** комплексний аналіз сучасних методів та засобів діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів, систематизація традиційних та інноваційних

підходів до контролю їх технічного стану, а також обґрунтування перспектив розвитку цифрових технологій діагностування для підвищення надійності електроенергетичного обладнання.

### **Конструктивні особливості та режими роботи вимірювальних трансформаторів**

Високовольтні вимірювальні трансформатори за своїм призначенням поділяються на трансформатори струму та трансформатори напруги. Трансформатори струму призначені для перетворення первинного струму до стандартного значення 1А або 5А, тоді як трансформатори напруги перетворюють первинну напругу до стандартних значень 100В або  $100/\sqrt{3}$  В.

Конструктивно високовольтні трансформатори струму можуть виконуватися у вигляді опорних, прохідних або накладних конструкцій. Опорні трансформатори встановлюються на опорних ізоляторах, прохідні монтуються в стінах або перегородках розподільних пристроїв, а накладні кріпляться безпосередньо на струмопроводи [1].

Особливістю роботи трансформаторів струму є необхідність забезпечення замкненого кола вторинної обмотки. Розмикання вторинного кола призводить до різкого зростання магнітного потоку в осерді, що може спричинити перегрів і руйнування ізоляції. Цей режим роботи є одним з найбільш небезпечних для трансформаторів струму [2].

Трансформатори напруги за конструкцією поділяються на однофазні та трифазні. Для високих напруг частіше використовуються однофазні конструкції з каскадним з'єднанням обмоток. Особливістю трансформаторів напруги є робота в режимі, близькому до холостого ходу, оскільки навантаження вторинних кіл зазвичай невелике.

Ізоляційна система високовольтних вимірювальних трансформаторів включає паперово-масляну ізоляцію, фарфорові або полімерні покришки, елегазову або вакуумну ізоляцію. Кожен тип ізоляції має свої специфічні механізми старіння та відмов, що вимагає застосування відповідних методів діагностування.

### **Традиційні методи діагностування**

Традиційні методи діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів базуються на вимірюванні основних електричних параметрів та проведенні випробувань ізоляції. Ці методи є обов'язковими згідно з діючими нормативними документами та дозволяють виявляти найбільш поширені типи дефектів.

Вимірювання опору ізоляції проводиться мегаомметром при напрузі 2,5 кВ для обладнання з номінальною напругою до 35 кВ включно та при напрузі 5 кВ для обладнання з вищою номінальною напругою. Значення опору ізоляції характеризує стан об'ємної ізоляції і дозволяє виявляти наявність вологи, забруднень або механічних ушкоджень ізоляційної системи [7].

Значення опору ізоляції  $R_{із}$  визначається за формулою:

$$R_{із} = \frac{U}{I}, \quad (1)$$

де:

$U$  — прикладена випробувальна напруга, В;

$I$  — струм витоку, А.

Високе значення  $R_{із}$  свідчить про суху і чисту ізоляцію, низьке — про наявність вологи або дефектів.

Вимірювання коефіцієнта абсорбції проводиться як відношення опору ізоляції, виміряного через 60 секунд, до опору, виміряного через 15 секунд після подачі напруги. Цей параметр дозволяє оцінити однорідність ізоляції та виявити локальні дефекти.

Коефіцієнт абсорбції  $K_{abc}$  визначається як:

$$K_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}}, \quad (2)$$

де:

$R_{60}$  — опір ізоляції через 60 секунд після подачі напруги;

$R_{15}$  — опір ізоляції через 15 секунд.

Типові значення:

$K_{abc} > 1,4$  — добра ізоляція;

$1,0 \leq K_{abc} \leq 1,4$  — допустима;

$K_{abc} < 1,0$  — деградована ізоляція.

Випробування ізоляції підвищеною напругою промислової частоти дозволяє виявити дефекти ізоляції, які можуть призвести до пробою в експлуатації. Випробувальна напруга зазвичай становить 80-85% від напруги, при якій проводились прийнятно-здавальні випробування на заводі-вироблювачі.

Випробувальна напруга  $U_{випр}$  задається за нормативами:

$$U_{випр} = 0,8 \dots 0,85 \cdot U_{фабр}, \quad (3)$$

де:

$U_{фабр}$  — заводське значення випробувальної напруги при прийнятно-здавальних випробуваннях.

Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат є одним з найбільш інформативних методів оцінки стану ізоляції. Збільшення тангенса кута діелектричних втрат може свідчити про зволоження ізоляції, наявність провідних включень або початок процесів старіння [1].

Тангенс кута діелектричних втрат  $\tan\delta$  визначається як:

$$\tan\delta = \frac{I_{\text{акт}}}{I_{\text{реак}}}, \quad (4)$$

де:

$I_{\text{акт}}$  — активна складова струму втрат;

$I_{\text{реак}}$  — реактивна складова струму.

Підвищене значення  $\tan\delta$  свідчить про зволоження, старіння або забруднення ізоляції.

Перевірка коефіцієнтів трансформації проводиться для виявлення міжвиткових замикань або обривів у обмотках. Відхилення коефіцієнта трансформації від номінального значення понад допустимі межі може свідчити про наявність дефектів в обмотках трансформатора.

Коефіцієнт трансформації  $k$  обчислюється як:

$$k = \frac{U_1}{U_2}, \quad (5)$$

де:

$U_1$  — напруга на первинній обмотці;

$U_2$  — напруга на вторинній обмотці.

Порівняння фактичного  $k$  з паспортним значенням дозволяє виявити дефекти, зокрема міжвиткові замикання.

На рисунку 1 наведено узагальнену схему традиційних методів діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів.

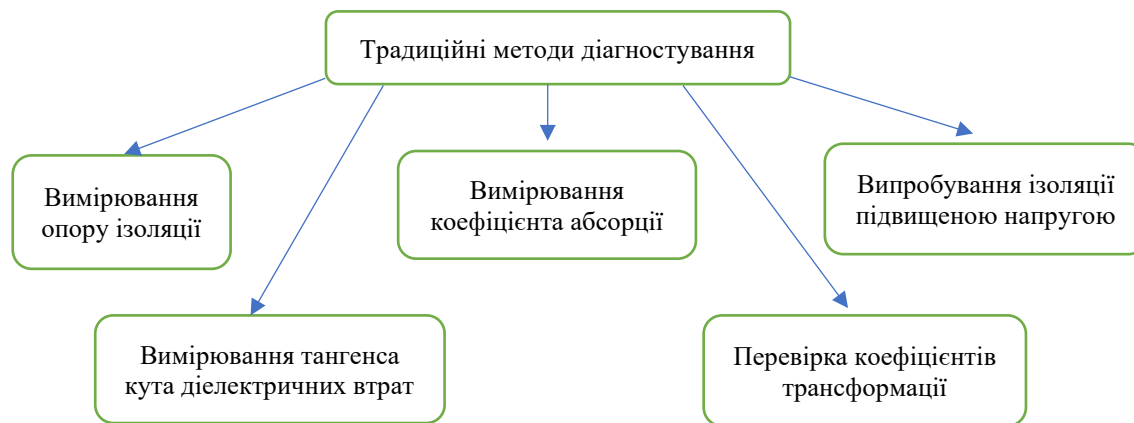


Рис. 1. Традиційні методи діагностування

У таблиці нижче наведено порівняльну характеристику традиційних методів діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів із зазначенням їх сильних та слабких сторін.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика традиційних методів діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів

| Метод діагностування                          | Переваги                                                                                              | Недоліки                                                                                  |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вимірювання опору ізоляції                    | Простота проведення, дає загальне уявлення про стан ізоляції, дозволяє виявити вологу або забруднення | Не дозволяє виявити локальні дефекти, чутливість знижується при часткових пошкодженнях    |
| Вимірювання коефіцієнта абсорбції             | Підвищена точність порівняно з простим вимірюванням опору, можливість оцінки неоднорідностей ізоляції | Потрібен точний інтервал часу для вимірювання, впливає вологість навколишнього середовища |
| Випробування ізоляції підвищеною напругою     | Виявлення слабких місць ізоляції, імітація навантаження в реальних умовах                             | Може спричинити подальше пошкодження, вимагає повного знеструмлення обладнання            |
| Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат | Висока інформативність, дозволяє виявити зволоження, старіння або наявність домішок                   | Вимагає спеціального обладнання, результати залежать від температури й частоти            |
| Перевірка коефіцієнтів трансформації          | Дозволяє виявити міжвиткові замикання або обриви, не потребує демонтажу                               | Не дає повної інформації про стан ізоляції, неефективна при ранніх стадіях дефектів       |

Аналіз порівняльної таблиці свідчить, що кожен із традиційних методів діагностування має свої специфічні переваги та недоліки, і не може забезпечити повну картину технічного стану трансформатора самостійно. Методи, що базуються на електричних вимірюваннях, дозволяють виявляти загальні та локальні дефекти ізоляції, проте мають обмежену чутливість до ранніх стадій пошкоджень. Тому для підвищення достовірності діагностики доцільно використовувати ці методи у комплексі, доповнюючи їх сучасними засобами контролю, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо технічного обслуговування та експлуатації високовольтного обладнання.

#### Хроматографічний аналіз розчинених газів

Хроматографічний аналіз газів, розчинених у трансформаторному маслі, є одним з найбільш ефективних методів діагностування внутрішніх дефектів маслонаповнених трансформаторів. Цей метод базується на тому, що різні типи дефектів призводять до утворення характерних газів розкладання ізоляційних матеріалів [2].

Основними газами, що контролюються при хроматографічному аналізі, є водень, метан, етан, етилен, ацетилен, оксид вуглецю та діоксид вуглецю. Концентрації цих газів та їх співвідношення дозволяють ідентифікувати тип дефекту: часткові розряди, перегрів ізоляції, дугові розряди тощо.

Метод співвідношень Роджерса базується на аналізі співвідношень концентрацій різних газів. Наприклад, співвідношення  $C_2H_2/C_2H_4$  характеризує наявність дугових розрядів, а співвідношення  $CN_4/H_2$  може свідчити про перегрів масла. Цей метод дозволяє не лише виявити наявність дефекту, але й визначити його тип та інтенсивність розвитку.

Ключові гази можуть використовуватися для швидкої попередньої оцінки стану трансформатора. Наприклад, підвищена концентрація ацетилену майже завжди свідчить про наявність дугових розрядів, тоді як підвищена концентрація оксиду вуглецю може вказувати на перегрів твердої ізоляції.

Динамічний аналіз зміни концентрацій газів у часі дозволяє оцінити швидкість розвитку дефекту та прийняти рішення щодо термінів виведення обладнання з експлуатації. Швидке зростання концентрацій газів може свідчити про інтенсивний розвиток дефекту та необхідність негайного втручання [6].

У практиці хроматографічного аналізу широко використовуються прилади, які забезпечують високу точність виявлення газових компонентів у маслі. Серед них варто відзначити сучасні лабораторні газові хроматографи типу Agilent 7890B (рис.2), що застосовуються для проведення детального аналізу з використанням полум'яно-іонізаційних і теплопровідних детекторів, а також обладнання для безперервного моніторингу, зокрема DGA 900 компанії General Electric (рис.3), яке дозволяє здійснювати онлайн-контроль стану трансформаторного масла.



Рис. 2. Газовий хроматограф Agilent 7890B



Рис. 3. Система онлайн-моніторингу розчинених газів Kelman DGA 900

#### Тепловізійне діагностування

Тепловізійне діагностування базується на реєстрації інфрачервоного випромінювання від поверхні обладнання та дозволяє виявляти локальні перегріви, які можуть свідчити про наявність дефектів. Цей метод особливо ефективний для діагностування контактних з'єднань, елементів комутаційної апаратури та зовнішньої ізоляції.

Переваги тепловізійного контролю включають можливість діагностування обладнання під напругою без зняття його з експлуатації, високу швидкість обстеження великих об'єктів, наочність результатів. Метод дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях розвитку, коли температурні аномалії ще не призвели до серйозних ушкоджень [3].

Особливості застосування тепловізійного контролю для вимірювальних трансформаторів включають необхідність врахування умов навколишнього середовища, навантаження обладнання, конструктивних особливостей. Інтерпретація результатів вимагає досвіду та знання конструкції діагностованого обладнання [1].

Сучасні тепловізійні камери мають високу чутливість та дозволяють виявляти температурні аномалії з точністю до десятих часток градуса. Це дозволяє виявляти дефекти на дуже ранніх стадіях розвитку, коли їх усунення вимагає мінімальних витрат.

### Вібродіагностика

Вібродіагностика дозволяє виявляти механічні дефекти в трансформаторах: ослаблення кріплення обмоток, дефекти магнітопроводу, проблеми з системою охолодження. Метод базується на аналізі вібрацій, що виникають при роботі трансформатора під навантаженням [2].

Основними джерелами вібрацій у трансформаторах є магнітострикція сталі магнітопроводу, електродинамічні сили в обмотках, робота системи охолодження. Кожен тип дефекту створює характерний спектр вібрацій, що дозволяє ідентифікувати його природу.

Аналіз спектра вібрацій проводиться з використанням методів цифрової обробки сигналів. Зміна амплітуд гармонік на подвійній частоті мережі може свідчити про ослаблення кріплення обмоток, поява субгармонік може вказувати на насичення магнітопроводу.

Порогові значення рівнів вібрацій встановлюються на основі статистичних даних для обладнання аналогічного типу та потужності. Перевищення цих значень може свідчити про наявність дефектів або необхідності проведення додаткових досліджень.

### Цифрові технології діагностування

Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів. Системи он-лайн моніторингу дозволяють здійснювати безперервний контроль стану обладнання та виявляти дефекти на ранніх стадіях розвитку [5].

Інтелектуальні датчики можуть вбудовуватися безпосередньо в конструкцію трансформаторів та забезпечувати моніторинг різних параметрів: температури, тиску, вологості, концентрації газів у маслі. Бездротові технології передачі даних дозволяють створювати розподілені системи моніторингу з централізованою обробкою інформації.

Алгоритми машинного навчання дозволяють створювати інтелектуальні системи діагностування, здатні навчатися на основі накопиченого досвіду експлуатації та підвищувати точність діагностування. Такі системи можуть виявляти складні залежності між різними параметрами та прогнозувати розвиток дефектів.

Цифрові двійники трансформаторів являють собою віртуальні моделі реального обладнання, які дозволяють моделювати різні сценарії експлуатації та оптимізувати стратегії технічного обслуговування. Інтеграція з системами управління активами дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо заміни або модернізації обладнання [7].

### Комплексні системи діагностування

Ефективне діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів вимагає комплексного підходу, який включає використання кількох методів одночасно. Комбінування різних методів дозволяє підвищити достовірність діагностування та зменшити ймовірність помилкових рішень.

Інтеграція результатів діагностування різними методами може здійснюватися з використанням експертних систем або алгоритмів нечіткої логіки. Такі системи дозволяють враховувати невизначеності, притаманні окремим методам діагностування, та приймати рішення на основі комплексного аналізу всієї доступної інформації [4].

Система управління ризиками дозволяє оцінювати ймовірність відмов обладнання та їх можливі наслідки. На основі такої оцінки можна приймати рішення щодо пріоритетності проведення діагностичних заходів та планування ремонтних робіт.

Стандартизація методів діагностування та критеріїв оцінки стану обладнання є важливою для забезпечення порівняльності результатів та можливості обміну досвідом між різними експлуатуючими організаціями.

### Висновки

Діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів є комплексною задачею, що потребує поєднання традиційних методів з сучасними технологіями контролю. Традиційні електричні методи — такі як вимірювання опору ізоляції, коефіцієнта абсорбції, тангенса кута діелектричних втрат та перевірка коефіцієнтів трансформації — залишаються базовими засобами оцінки технічного стану обладнання. Однак, як показано в порівняльній таблиці, кожен з них має обмежену діагностичну чутливість та специфіку, що потребує їх комплексного застосування.

Хроматографічний аналіз розчинених газів, зокрема із застосуванням приладів *Agilent 7890B* та систем онлайн-моніторингу *Kelman DGA 900*, є найбільш інформативним методом виявлення внутрішніх дефектів в маслонаповнених трансформаторах. Його поєднання з тепловізійним діагностуванням та вібродіагностикою дозволяє виявляти специфічні відхилення — від локальних перегрівів до механічних ушкоджень конструкції, які не виявляються іншими методами.

Отже, ефективність діагностування трансформаторів значно підвищується за умов застосування багаторівневого підходу з інтеграцією результатів з різних методик, що є запорукою підвищення надійності та безпеки енергетичного обладнання.

**Література**

1. Бржезицький, В. О., Зелінський, В. Ц., Лежнюк, П. Д., & Рубаненко, О. Є. (2016). *Електричні апарати: підручник*. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС.
2. Клименко, Б. В. (2012). *Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник*. Харків: Точка.
3. Гобрей, Р. М., Рубаненко, О. Є., та ін. (2008). *Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 1*. Київ: ДП НТУКЦ.
4. Голота, А. Д. (2006). *Автоматика в електроенергетичних системах: навчальний посібник*. Київ: Вища школа.
5. Лежнюк, П. Д., Рубаненко, О. Є., & Пиріжок, М. І. (2005). Діагностування РПН силових трансформаторів з використанням нечітких множин. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, (15), 64–69.
6. Матвійчук, В. А., Рубаненко, О. Є., & Гунько, І. О. (2020). *Діагностування електрообладнання: навчальний посібник*. Вінниця: ВНАУ.
7. Рубаненко, О. Є., Лабзун, М. П., & Гришук, М. О. (2017). Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, (23(1245)), 41–46.

**References**

1. Brzhezyskiy, V. O., Zelinskyi, V. Ts., Lezhniuk, P. D., & Rubanenko, O. Ye. (2016). *Elektrychni aparaty: pidruchnyk*. Kherson: OLDI-PLIUS.
2. Klymenko, B. V. (2012). *Elektrychni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs: navchalnyi posibnyk*. Kharkiv: Tochka.
3. Hobrei, R. M., Rubanenko, O. Ye., ta in. (2008). *Tekhnichne diahnostuvannia, vyprobuvannia ta vymiriuvannia elektroobladnannia v umovakh montazhu, nalahodzhuvannia i v ekspluatatsii. Chastyna 1*. Kyiv: DP NTUKTs.
4. Holota, A. D. (2006). *Avtomatyka v elektroenerhetychnykh systemakh: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: Vyshcha shkola.
5. Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ye., & Pyrizhok, M. I. (2005). *Diahnostuvannia RPN sylovykh transformatoriv z vykorystanniam nechitkykh mnozhyn*. Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, (15), 64–69.
6. Matviichuk, V. A., Rubanenko, O. Ye., & Hunko, I. O. (2020). *Diahnostuvannia elektroobladnannia: navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia: VNAU.
7. Rubanenko, O. Ye., Labzun, M. P., & Hryshchuk, M. O. (2017). *Vyznachennia defektiv transformatornoho obladnannia z vykorystanniam chastotnykh diahnostychnykh parametriv*. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh, (23(1245)), 41–46.