

ШПАЧУК ОЛЕКСАНДР

ВП «Хмельницька атомна електростанція»

<https://orcid.org/0000-0001-6946-2551>e-mail: shpachuk2@gmail.com

КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ОДНОФАЗНИХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В БЛОЦІ З ГЕНЕРАТОРОМ

Впровадження стратегії ремонту обладнання за технічним станом, старіння основних виробничих фондів теплових та атомних електричних станцій та реалізація програм строків продовження експлуатації даних енергетичних об'єктів обумовлюють актуальність питань розробки та впровадження контролю технічного стану електрообладнання загалом та ізоляції електрообладнання, як одного з ключових компонентів його ефективної та безаварійної роботи.

Сучасні системи діагностування технічного стану електрообладнання та інформаційно-вимірювальні системи, що експлуатуються в даний час не реалізують можливості контролю таких електричних параметрів ізоляції електрообладнання як опір та ємність ізоляції відносно землі та кута діелектричних втрат, що унеможлиблює виявлення дефектів в ізоляції на ранній стадії їх розвитку та ускладнює планування обсягів ремонтних та відновлювальних операцій на обладнанні.

В роботі запропоновано метод контролю технічного стану ізоляції силових однофазних трансформаторів, що працюють в блоці «генератор-трансформатор», що ґрунтується на накладанні змінного струму з частотою, що менша за промислову, та контролі розтікання змінного струму за допомогою вбудованих у силовий трансформатор трансформаторів струму та кіл контролю ізоляції високовольтних вводів.

Ключові слова: блочний трансформатор, струмопровід, блок «генератор-трансформатор», ізоляція, інформаційно-вимірювальна система.

SHPACHUK OLEKSANDR

Khmelnitskyi Nuclear Power Plant

ORCID ID: 0000-0001-6946-2551

e-mail: shpachuk2@gmail.com

CONTROL OF ELECTRICAL INSULATION PARAMETERS OF SINGLE-PHASE POWER TRANSFORMERS WORKING IN A UNIT WITH A GENERATOR

The implementation of the strategy of equipment repair according to its technical condition, the aging of the main production assets of thermal and nuclear power plants, and the implementation of programs for the continuation of the operation of these energy facilities determine the urgency of issues of development and implementation of control of the technical condition of insulation of electrical equipment, as one of the key components of its effective and trouble-free operation.

Modern systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment do not realize the possibility of monitoring such electrical parameters of electrical equipment insulation as resistance and insulation capacity relative to the ground and the angle of dielectric loss, which makes it impossible to detect defects in the insulation at an early stage of their development and makes it difficult to plan the scope of repair and restoration operations on the equipment.

The paper proposes a method of monitoring the technical condition of the isolation of single-phase power transformers operating in the "generator-transformer" unit, which is based on the application of an alternating current with a frequency lower than the industrial one and the control of the spreading of the alternating current with the help of current transformers built into the power transformer and insulation control circuits of high-voltage inputs. With a gradual decrease in the electrical characteristics of the controlled section of the insulation of the block transformer, the current with a frequency of 20 Hz, which flows through the insulation to the ground, increases. This change in current is captured by built-in current transformers on the linear and neutral terminals of the high voltage winding, or by current transformers located at the beginning and at the end of the low voltage winding of the block transformer and through filter units and signal processing units transmits information to the control unit.

The calculated values of the electrical parameters of the insulation of the block transformer, namely the insulation resistance of the equipment with respect to earth, the insulation capacity with respect to earth and the tangent of the dielectric loss angle, in combination with other methods of monitoring the technical condition, such as monitoring the concentration of gases dissolved in the transformer oil, will provide operational and repair personnel power plant with all the necessary information to make a reasoned decision regarding the possibility of further operation of the transformer. In addition, the obtained data will make it possible to detect potential problems with the insulation of the transformer and to plan in advance additional volumes of repair work and early removal of the equipment for repair without damaging it.

Keywords: block transformer, current line, "generator-transformer" block, insulation, information and measurement system.

Постановка проблеми

Інформаційно-вимірювальні системи, що експлуатуються в даний час на енергоблоках електричних станцій забезпечують контроль значного переліку параметрів, що характеризують режим роботи силових маслонаповнених трансформаторів, а саме струми у фазах, лінійні чи фазні напруги на виводах, потужність, що протікає через трансформатор, рівень часткових розрядів в ізоляції, концентрації газів, що розчинені в трансформаторному маслі, температуру трансформатора в найбільш нагрітих точках, а також температури масла та охолоджуючої води в системі маслоохолодження. Проте такі інформаційно-вимірювальні системи не дають можливості відстежувати зміну таких електричних параметрів ізоляції блочного трансформатора як опір та ємність ізоляції обладнання відносно землі, а також тангенс кута діелектричних втрат, що унеможлиблює виявлення погіршення технічного стану ізоляції на ранній стадії його розвитку в процесі

експлуатації.

Сучасні пристрої релейного захисту надають захист від усіх видів пошкоджень електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» і ненормальних режимів їх роботи, забезпечують високий рівень селективності, чутливості та, завдяки мікропроцесорній елементній базі, швидкодії. Проте вони позбавлені можливості виявлення погіршення стану ізоляції на ранній стадії розвитку дефектів.

Виходячи з описаного вище існує актуальна науково-практична задача з розробки та впровадження системи контролю електричних параметрів ізоляції блочного трансформатора, вирішення якої дозволить підвищити ефективність експлуатації енергоблоків завдяки забезпеченню оперативного та ремонтного персоналу достовірною інформацією про технічний стан ізоляції електрообладнання.

В даній роботі об'єктом дослідження є процеси зміни технічного стану ізоляції силових однофазних трансформаторів, що працюють у блоці з генератором. Предметом дослідження є методи і засоби контролю технічного стану електричних параметрів ізоляції силових однофазних трансформаторів, що працюють у блоці з генератором.

Метою дослідження є розширення функціональних можливостей системи контролю технічного стану ізоляції шляхом застосування накладання змінного струму з частотою, що менша за промислову, та реалізації контролю розтікання змінного струму за допомогою вбудованих у силовий трансформатор трансформаторів струму та кіл контролю ізоляції високовольтних вводів.

Аналіз останніх досліджень

У роботах [1, 2] розглянуто основні принципи побудови релейного захисту електрообладнання енергосистем загалом та електрообладнання блоків «генератор-трансформатор» та електричних систем з ізолюваною нейтраллю. Також розглянуто принципи побудови релейного захисту з використанням методу накладання на контрольоване коло змінного струму.

В роботах [3, 4, 5] розглянуто загальні питання побудови системи контролю ізоляції та релейного захисту обладнання блоку «генератор-трансформатор» на основі комбінованого методу накладання постійного струму та змінного струму з частотою, що нижча за промислову, та контролю протікання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, в обладнанні блоку «генератор-трансформатор» за допомогою сенсорів типу котушок Роговського.

Компанія Qualitrol (США) пропонує для цілей контролю технічного стану трансформаторів використовувати: системи контролю газів розчинених у трансформаторному маслі типу Serveron TM3 та Serveron TM8 для контролю концентрації відповідно 3-х чи 8-ми характерних газів в трансформаторному маслі; систему моніторингу температури обмоток трансформатора типу Qualitrol 509 ITM та систему контролю часткових розрядів Qualitrol QPDM. Компанія Megger для контролю часткових розрядів у трансформаторах пропонує використовувати системи типу Megger IMCmonitor, а компанія OMICRON для вирішення цієї ж задачі пропонує використовувати систему MONTESTO 200. Компанія Doble для неперервного контролю газів розчинених в трансформаторному маслі а також вмісту вологи у трансформаторному маслі пропонує використовувати модифікації системи Calisto.

Виклад основного матеріалу

Для виконання поставленої задачі пропонується використати метод накладання змінного струму з частотою, що менша за промислову, та реалізації контролю розтікання змінного струму за допомогою вбудованих у силовий трансформатор трансформаторів струму та кіл контролю ізоляції високовольтних вбудованих вводи. Накладання змінного струму з частотою, що нижча за промислову, та реалізація контролю розтікання даного струму за допомогою вбудованих у силовий трансформатор трансформаторів струму та кіл контролю ізоляції високовольтних вбудованих вводи забезпечить визначення та контроль зміни активного опору та ємності ізоляції силового однофазного трансформатора, що працює в блоці з генератором при поступовій зміні стану ізоляції. Контроль змінного струму з частотою, що нижча за номінальну, не потребуватиме встановлення додаткових сенсорів, оскільки потужні однофазні силові трансформатори, що розроблені для роботи в блоці з генератором, уже мають вмонтовані трансформатори струму на лінійних та нульових виводах, а високовольтні вводи оснащені вимірювальним виводом для реалізації контролю їх ізоляції. Структурна схема реалізації контролю електричних параметрів ізоляції однофазних силових трансформаторів, що працюють в блоці з генератором показана на рисунку 1.

На рисунку 1 використано такі умовні позначення: G – електрорушійна сила фази генератора, R_{GA} – активний опір обмотки фази генератора, L_{GA} – індуктивність обмотки фази генератора, R_{iGA} – опір ізоляції обмотки фази генератора відносно землі, C_{iGA} – ємність ізоляції обмотки фази генератора відносно землі, R_{CCA} – активний опір фази струмопроводу, R_{iCCA} – опір ізоляції фази струмопроводу відносно землі, C_{iCCA} – ємність ізоляції фази струмопроводу відносно землі, R_p – опір підступової ізоляції фази струмопроводу, R_{GTA} – активний опір фази обмотки низької напруги блочного трансформатора, L_{GTA} – індуктивність фази обмотки низької напруги блочного трансформатора, R_{iGTA} – опір ізоляції відносно землі фази обмотки низької напруги блочного трансформатора, C_{iGTA} – ємність ізоляції відносно землі фази обмотки низької напруги блочного трансформатора, R_{GTA} – активний опір фази обмотки високої напруги блочного трансформатора, L_{GTA} – індуктивність фази обмотки високої напруги блочного трансформатора, R_{iGTA} – опір ізоляції відносно землі фази обмотки високої напруги блочного трансформатора, C_{iGTA} – ємність ізоляції відносно землі фази обмотки високої напруги блочного трансформатора, R_{H1A} – активний опір основної ізоляції високовольтного вводу, C_{H1A} – ємність основної ізоляції високовольтного вводу, R_{H2A} – активний опір останніх шарів ізоляції

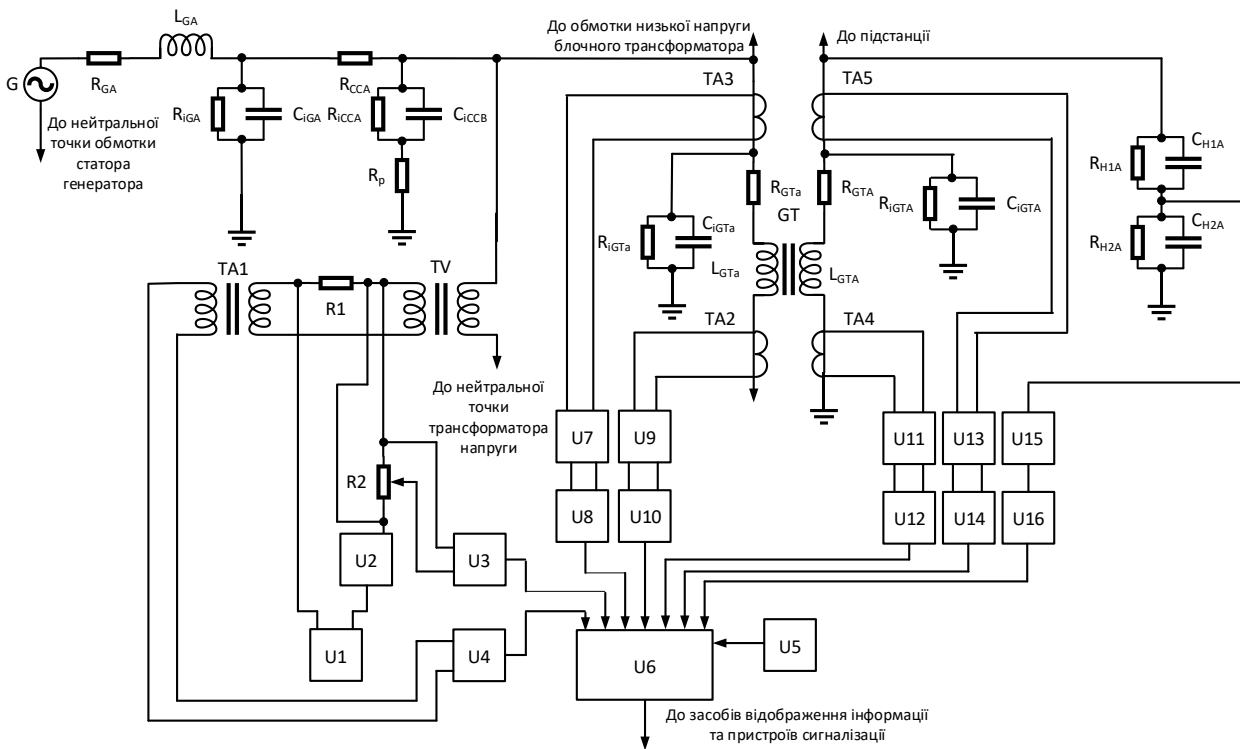


Рис. 1. Структурна схема реалізації контролю електричних параметрів ізоляції однофазних силових трансформаторів, що працюють в блоці з генератором

високовольтного вводу, C_{H2A} – ємність останніх шарів ізоляції високовольтного вводу, U1 - блок накладання змінного струму, U2 – смуговий фільтр змінної напруги частотою 20 Гц, що накладається на контрольоване коло, U3 – блок обробки сигналу напруги частотою 20 Гц, що накладається на контрольоване коло, U4 – блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що накладається на контрольоване коло, U5 – загальний блок живлення, U6 – блок керування, обробки сигналів та сигналізації, U7 – смуговий фільтр сигналу змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора струму ТА3, що влаштований на початку обмотки низької напруги, U8 – блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор струму ТА3, що влаштований на початку обмотки низької напруги, U9 – смуговий фільтр сигналу змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора струму ТА2, що влаштований на кінці обмотки низької напруги, U10 – блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор струму, ТА2, що влаштований на кінці обмотки низької напруги, U11 - смуговий фільтр сигналу змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора струму ТА4, що влаштований на нейтральному виводі обмотки високої напруги, U12 – блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор струму, ТА4, що влаштований на нейтральному виводі обмотки високої напруги, U13 – смуговий фільтр сигналу змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора струму ТА5, що влаштований на лінійному виводі обмотки високої напруги, U14 – блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор струму, ТА4, що влаштований на лінійному виводі обмотки високої напруги, U15 - смуговий фільтр сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через основну ізоляцію високовольтного вводу, U16 – блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через основну ізоляцію високовольтного вводу, ТА1 – трансформатор струму для вимірювання змінного струму, що накладається на контрольоване коло, ТА2, ТА3 – вбудовані трансформатори струму обмотки низької напруги, ТА4, ТА5 – вбудовані трансформатори струму обмотки високої напруги, TV – вбудований у струмопровід трансформатор напруги.

Запропонована система контролю ізоляції працює наступним чином. Загальний блок живлення U5 забезпечує живлення блоку накладання змінного струму U1, блоку керування, обробки сигналів та сигналізації U6, блоку обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор струму, що влаштований на початку обмотки низької напруги U8, блоку обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор струму, що влаштований на кінці обмотки низької напруги U10, блоку обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор змінного струму, що влаштований на нульовому виводі обмотки високої напруги U12, блоку обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор змінного струму, що влаштований на лінійному виводі обмотки високої напруги U14 та обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через основну ізоляцію високовольтного вводу U16.

Сигнал змінного струму з частотою 20 Гц, від блоку накладання змінного струму U1 через смуговий фільтр змінної напруги частотою 20 Гц, що накладається на контрольоване коло, U2 резистори R2 та R1 вводиться в схему блока генератор-трансформатор через трансформатор напруги TV. До блока обробки сигналу напруги частотою 20 Гц, що накладається на контрольоване коло, U3 через резистор R₂ від смугового фільтра U2 підводиться напруга, що пропорційна напрузі частотою 20 Гц, яка накладається на контрольоване коло. До блоку обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що накладається на контрольоване коло, U4 через трансформатор струму ТА1 підводиться струм, що пропорційний струму, в колі з джерелом наведеної напруги змінного струму частотою 20 Гц. Накладений струм частотою 20 Гц трансформується блочним трансформатором GT і таким чином індукується в обмотці високої напруги блочного трансформатора.

При протіканні даного струму через обмотки блочного трансформатора GT можна зафіксувати частину струму, що протікає крізь ізоляцію обмоток на землю, як різницю струмів, що фіксують трансформатори струму на початку ТА3 та кінці ТА2 обмотки низької напруги та нульовому ТА4 та лінійному ТА5 виводах обмотки високої напруги трансформатора. Сигнал змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора змінного струму ТА3, що влаштований на початку обмотки низької напруги, через смуговий фільтр U7 та блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор змінного струму, що влаштований на нульовому виводі обмотки високої напруги, U8 надходить до блоку керування, обробки сигналів та сигналізації U6. Аналогічним чином до блоку керування, обробки сигналів та сигналізації U6 через смуговий фільтр U9 та блок обробки сигналу змінного струму U10 надходить сигнал змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора змінного струму, що влаштований в кінці обмотки низької напруги ТА2.

Сигнал змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора змінного струму ТА4, що влаштований на нульовому виводі обмотки високої напруги, через смуговий фільтр U11 та блок обробки сигналу змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через вбудований трансформатор змінного струму, що влаштований на нульовому виводі обмотки високої напруги, U12 надходить до блоку керування, обробки сигналів та сигналізації U6. Аналогічним чином до блоку керування, обробки сигналів та сигналізації U6 через смуговий фільтр U13 та блок обробки сигналу змінного струму U14 надходить сигнал змінного струму частотою 20 Гц від вбудованого трансформатора змінного струму, що влаштований на лінійному виводі обмотки високої напруги ТА5.

Сигнал змінного струму частотою 20 Гц, що протікає через основну ізоляцію високовольтного вводу потрапляє до блоку керування, обробки сигналів та сигналізації U6 через смуговий фільтр U15 та блок обробки сигналу змінного струму U16.

При поступовому зниженні опору контрольованої ділянки ізоляції блочного трансформатора збільшується струм частотою 20 Гц, що стікає через ізоляцію на землю. Дану зміну струму фіксують вбудовані трансформатори струму на лінійних та нульових виводах обмотки високої напруги, або трансформатори струму, що розташовані на початку та на кінці обмотки низької напруги блочного трансформатора та через блоки фільтрів та блоки обробки сигналів передають інформацію до блоку керування, обробки сигналів та сигналізації.

Повний опір ізоляції фази обмотки високої напруги блочного трансформатора можна визначити за допомогою розрахунку різниці струмів частотою 20 Гц на лінійних виводах та виводах нульової точки фази блочного трансформатора з врахуванням напруги сигналу частотою 20 Гц та кутів між ними за такими співвідношеннями:

$$Z_{iz} = (k \cdot \underline{U}) / (I_{UL} \cdot e^{j\omega t + \varphi_L} - I_{UN} \cdot e^{j\omega t + \varphi_N}), \quad (1)$$

де Z_{iz} – повний опір ізоляції фази електрообладнання відносно землі; k – коефіцієнт трансформації трансформатора напруги; \underline{U} – напруга, що пропорційна напрузі частотою 20 Гц, яка накладається на контрольоване коло; I_{UL} – струм частотою 20 Гц на лінійних виводах обладнання; I_{UN} – струм частотою 20 Гц на виводах нульової точки обладнання; ω – кутова частота; φ_L – кут зсуву фази струму на лінійних виводах обладнання; φ_N – кут зсуву фази струму на виводах нейтральної точки обладнання.

Активний опір ізоляції фази електрообладнання відносно землі є дійсною частиною Z_{iz}

$$R_{iz} = \operatorname{Re}(Z_{iz}), \quad (2)$$

де R_{iz} – активний опір ізоляції електрообладнання відносно землі, а реактивний опір, в свою чергу, є уявною частиною Z_{iz}

$$X_{iz} = \operatorname{Im}(Z_{iz}), \quad (3)$$

де X_{iz} – реактивний опір ізоляції електрообладнання відносно землі.

Ємність ізоляції фази відносно землі а також тангенс кута діелектричних втрат розраховуються за відомими співвідношеннями

$$C_{iz} = 1 / (\omega \cdot X_{iz}), \quad (4)$$

де C_{iz} – ємність ізоляції електрообладнання відносно землі

$$\operatorname{tg} \delta = 1 / (C_{iz} \cdot \omega \cdot R_{iz}), \quad (5)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат ізоляції [5].

Аналогічно розраховуватимуться параметри ізоляції обмотки низької напруги.

Висновки

Розраховані значення електричних параметрів ізоляції блочного трансформатора, а саме опір ізоляції обладнання відносно землі, ємність ізоляції відносно землі та тангенс кута діелектричних втрат, в сукупності з іншими методами контролю технічного стану, як-то контроль концентрації газів розчинених в трансформаторному маслі, забезпечать оперативний та ремонтний персонал електричної станції усією необхідною інформацією для прийняття обґрунтованого рішення, щодо можливості подальшої експлуатації трансформатора. Крім того, отримані дані дозволять виявляти потенційні проблеми з ізоляцією трансформатора та завчасно планувати додаткові обсяги ремонтних робіт та завчасне виведення обладнання в ремонт без його пошкодження.

Література

1. Sleva A. M. Protective Relay Principles. CRC Press, 2009. 368 p.
2. Reimert D. Protective Relaying for Power Generation Systems. Boca Raton, Florida, USA, Taylor&Francis Group CRC Press, 2005. 592 p.
3. Кутін В. М. Вдосконалення методу контролю ізоляції блока «генератор-трансформатор» / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2020 – № 1. – С. 39-44.
4. Кутін В. М. Оцінювання вірогідності контролю параметрів ізоляції обмотки статора блока «генератор-трансформатор» / В. М. Кутін, О. О. Шпачук, М. В. Кутіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2021 – № 2. – С. 63-67.
5. Кутін В. М. Метод контролю технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератор-трансформатор» / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 3(309). – С. 138-142.

References

1. Sleva A. M. Protective Relay Principles. CRC Press, 2009. 368 p.
2. Reimert D. Protective Relaying for Power Generation Systems. Boca Raton, Florida, USA, Taylor&Francis Group CRC Press, 2005. 592 p.
3. Kutin V. M., Shpachuk O. O. Improvement of method of control of insulation of generator-transformer unit. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. 2020. No. 1. S. 39-44.
4. Kutin. V. M., Shpachuk O. O., Kutina M. V. Evaluation of the probability parameters of insulation control of the stator windings of the "generator-transformer" unit. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. 2021. No. 2. S. 63-67.
5. Kutin V. M., Shpachuk O. O. Method of control the technical condition of the insulation of electrical equipment of the generator-transformer unit. Herald of Khmelnytskyi National University. 2022. No. 3(309). S. 138- 142.