

ШТУЦЬ АНДРІЙ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>e-mail: shtuts1989@gmail.com**ЗОЗУЛЯК ІГОР**

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5381-3115>e-mail: ihorzozulyak@gmail.com**БАЛАБАН ДЕНИС**

Вінницький національний аграрний університет

e-mail: denys.balaban@ukr.net

АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДІАГНОСТИКИ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

У даній науковій роботі представлено комплексний аналіз методів і засобів діагностики ізоляції електроенергетичного обладнання. Актуальність дослідження зумовлена старінням ізоляції під час експлуатації обладнання, що несе за собою ризики аварійних ситуацій, перебоїв в електропостачанні та значних збитків.

Були проаналізовані різні методи та засоби діагностування їх переваги та недоліки, такі як точність, надійність, інформативність, витрати часу і ресурсів, зручність використання. На основі аналізу результатів їх практичного застосування дано оцінку ефективності методів і засобів діагностики.

У сучасному світі, що швидко розвивається, електроенергетичне обладнання відіграє ключову роль у забезпеченні стабільного постачання електроенергії для різноманітних галузей промисловості та побутових споживачів. Одним із критичних аспектів безперебійної роботи електроенергетичних систем є надійність ізоляції електрообладнання. Відсутність належного контролю та діагностики стану ізоляції може призвести до значних технічних проблем, включаючи збої в роботі системи, вихід обладнання з ладу та навіть аварії.

У роботі також розглянуто питання економічної ефективності впровадження сучасних діагностичних засобів. Визначено, що своєчасна діагностика та усунення дефектів дозволяє знизити витрати на ремонт та заміну обладнання, а також мінімізувати ризик аварійних ситуацій. У розглянутій літературі наведено приклади економічних розрахунків, що підтверджують доцільність інвестування в розвиток діагностичних систем.

Таким чином, представлена робота являє собою всебічне дослідження сучасних підходів до діагностики стану ізоляції. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про необхідність комплексного підходу до діагностики, що враховує як традиційні, так і інноваційні методи, а також впровадження сучасних технологій для підвищення точності та надійності оцінки стану ізоляції. Запропоновані у роботі рекомендації та напрями розвитку можуть бути корисними для фахівців у галузі електроенергетики, що займаються питаннями діагностики та моніторингу стану електрообладнання.

Тому дослідження методів і засобів діагностики ізоляції є надзвичайно важливим для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації електроенергетичного обладнання.

Ключові слова: електроенергетичне обладнання, ізоляція, діагностика, методи діагностики, засоби діагностики, аналіз, дослідження.

SHTUTS ANDRII, ZOZULYAK IHOR, BALABAN DENYS

Vinnytsia National Agrarian University

ANALYSIS AND RESEARCH OF METHODS AND MEANS OF DIAGNOSTIC INSULATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT

This scientific article presents a comprehensive analysis of the methods and tools for diagnosing the insulation of electrical power equipment. The relevance of the study is due to the aging of the insulation during the operation of the equipment, which carries with it the risks of emergency situations, interruptions in the power supply and significant losses. Advantages and disadvantages were analyzed for each diagnostic method and tool, such as accuracy, reliability, informativeness, time and resource consumption, ease of use. Based on the analysis of the results of their practical application, an assessment of the effectiveness of diagnostic methods and tools is given.

In today's rapidly developing world, electrical power equipment plays a key role in ensuring a stable supply of electricity for various industries and domestic consumers. One of the critical aspects of uninterrupted operation of electrical power systems is the reliability of insulation of electrical equipment. Failure to properly monitor and diagnose insulation conditions can lead to significant technical problems, including system failures, equipment failures, and even accidents.

The work also considers the question of the economic efficiency of the introduction of modern diagnostic tools. It was determined that timely diagnosis and elimination of defects allows to reduce the costs of repair and replacement of equipment, as well as to minimize the risk of emergency situations. The reviewed literature provides examples of economic calculations that confirm the feasibility of investing in the development of diagnostic systems.

Thus, the article "Comprehensive analysis of methods and means of diagnostics of insulation of electric power equipment" represents a comprehensive study of modern approaches to diagnostics of the state of insulation. The conducted analysis allows us to draw a conclusion about the need for a comprehensive approach to diagnostics, which takes into account both traditional and innovative methods, as well as the introduction of modern technologies to increase the accuracy and reliability of the assessment of the state of insulation. The recommendations and directions of development proposed in the article may be useful for specialists in the field of electric power, dealing with issues of diagnostics and monitoring of the state of electrical equipment.

Therefore, the study of methods and means of insulation diagnostics is extremely important to ensure stable and safe operation of electric power equipment.

Key words: electric power equipment, insulation, diagnostics, diagnostic methods, diagnostic tools, analysis, research.

Постановка проблеми

Складні умови експлуатації електричних мереж обумовлюють виникнення аварій, що часто стають причиною не тільки економічних втрат, але й людських жертв. В більшості випадків пошкодження відбувається не відразу, а після тривалої дії несприятливого чинника. На сьогоднішній день найбільш ефективним засобом підвищення надійності роботи енергетичного обладнання є впровадження методів і засобів оперативної діагностики.

Забезпечення надійності та безпеки електроенергетичного обладнання є однією з ключових вимог сучасного енергетичного сектору. В умовах постійного зростання навантаження та розширення мережі, діагностика стану ізоляції стає важливим завданням, оскільки недоліки у роботі ізоляції можуть призвести до серйозних аварій та виходу обладнання з ладу. Однак існуючі методи та засоби діагностики не завжди забезпечують достатню точність та ефективність в умовах сучасного електроенергетичного виробництва. Тому актуальним є пошук нових підходів та технологій для комплексної діагностики ізоляції електроенергетичного обладнання.

Комплексний аналіз методів і засобів діагностики ізоляції електроенергетичного обладнання присвячена всебічному дослідженню сучасних підходів до оцінки стану ізоляції. У роботі розглядаються як традиційні, так і інноваційні методи діагностики, а також їх ефективність у різних умовах експлуатації.

Одним із найпоширеніших методів діагностики є вимірювання часткових розрядів (ЧР). Часткові розряди є мікророзрядами, які виникають у місцях ізоляційних дефектів, і їх наявність може свідчити про деградацію ізоляційного матеріалу. Вимірювання ЧР дозволяє виявити дефекти на ранній стадії та здійснити своєчасні заходи для їх усунення. У статті детально розглянуто принципи вимірювання часткових розрядів, а також проаналізовано сучасні технології та прилади для їх діагностики.

Ще одним важливим методом є вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$). Цей метод дозволяє оцінити загальний стан ізоляції, вимірюючи втрати енергії в ізоляційному матеріалі. Високі значення тангенса кута діелектричних втрат можуть свідчити про наявність вологи або інших забруднень в ізоляційному матеріалі. У роботі проаналізовано переваги та обмеження цього методу, а також розглянуто сучасні прилади для вимірювання $\text{tg } \delta$.

Сучасні технології також пропонують методи спектроскопії та термографії для діагностики стану ізоляції. Спектроскопія дозволяє вивчати хімічний склад ізоляційних матеріалів та виявляти наявність забруднень або змін у структурі матеріалу. Термографія, у свою чергу, дозволяє візуалізувати розподіл температури на поверхні обладнання та виявляти місця перегріву, що можуть свідчити про дефекти в ізоляції. У роботі наведено детальний аналіз цих методів та їх ефективність у різних умовах експлуатації [2, 3].

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає у порівняльній характеристиці та систематизації методів і засобів діагностики ізоляції, а також оцінці їх ефективності. В ході дослідження проаналізовано основні групи методів, таких як нерівноважно-компенсаційний, метод автоматизованого вимірювання $\text{tg} \delta_1$ і C_1 мостом змінного струму, метод контроль часткових розрядів, метод часткових розрядів в апаратній паперово-масляній ізоляції, метод залежності напруженості часткових розрядів від товщини ізоляції, метод часткових розрядів в ізоляції електричних машин.

Матеріал і результати дослідження

Нерівноважно-компенсаційний метод. Одним з найбільш поширених методів контролю є нерівноважно-компенсаційний метод або балансний. Він базується на тому припущенні, що характеристики ізоляції всіх трьох контрольованих об'єктів, трифазної групи не можуть змінитися одночасно і в рівній мірі [4]. При виникненні практично будь-якого дефекту в ізоляції одного або двох об'єктів 3-фазної групи, завжди виникає струм небалансу. Величина струму небалансу кількісно характеризує ступінь розвитку дефекту в ізоляції, а кут струму небалансу указує на те, в якій фазі відбулися зміни. На рисунку 1 представлені векторні діаграми, що пояснюють принцип даного методу. Практична реалізація даного методу достатньо різноманітна, від пристроїв КІВ-500 (контроль ізоляції вводів), в яких початкове балансування векторів струму виконувалося зміною числа витків первинних обмоток трансформатора струму, з трьома первинними і однією вторинною обмоткою, до сучасних електронних пристроїв, таких як R1500 [1, 2, 8] виробництва ПФВ «Вібро-Центр» автоматично приводять до похибок в розрахунках і до необґрунтованих діагностичних висновків.

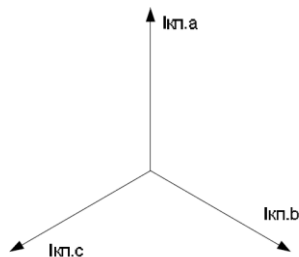


Рисунок 1. Векторна діаграма, яка пояснює принцип балансowego контролю: збалансована система струмів комплексної провідності

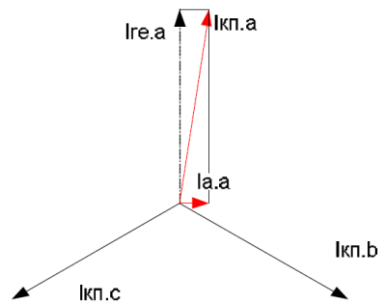


Рисунок 2. Векторна діаграма, яка пояснює принцип балансового контролю: зростання активної складової струму комплексної провідності фази «А»

На рис. 3 показані: $I_{кп.а}$, $I_{кп.б}$, $I_{кп.с}$ - струми комплексної провідності ізоляції об'єктів відповідних фаз; I_n - струм небалансу; $I_{ре.а}$, $I_{а.а}$ - реактивна і активна складові струму комплексної провідності ізоляції об'єкту фази «А» [5,6].

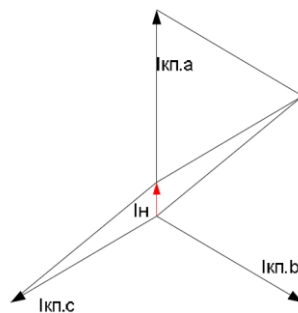


Рисунок 3. Векторна діаграма, яка пояснює принцип балансового контролю: зростання реактивної складової струму комплексної провідності фази «А» і поява вектора небалансу

Основними чинниками, що впливають на вектори фазної напруги ϵ :

- зміна опорів лінії і навантаження по фазах (при протіканні по лінії струму навантаження падіння напруги по фазах буде різним що і приведе до кутових перекосів векторів фазної напруги);
- перемикання пристрою РПН;
- деформація обмоток трансформатора після дії струмів короткого замикання;
- зміна схеми включення трансформатора у енергосистему;
- наявність у вузлах енергосистеми регульованих компенсаторів реактивної потужності (при зміні об'єму реактивної потужності, що протікає по лініях, можлива зміна падіння напруги на фазах цих ліній).
- зміна напрямку руху енергії через контрольований трансформатор, також може відбутися зміна кутів між фазними векторами живлячої мережі (наприклад, в трансформаторах, обслуговуючих ГЕС, під час переходу гідроакумуляуючої установки з режиму генератора у режим електродвигуна);
- зміна енергоспоживання по сезонах, зміна структури генеруючих потужностей в енергосистемі, вплив погодних умов на лінії електропередачі.

Другим негативним чинником балансового методу є те, що пристрої на його основі не здатні відмітити дефект ізоляції навіть в небезпечній стадії розвитку, оскільки передаварійною уставкою у таких пристроїв є 3%, а аварійною – 5–7% [10–12] від номінального струму комплексної провідності ізоляції. Нижчі значення параметрів у таких пристроях приводять до невиправданих відключень та повідомляють про помилки обладнання персоналу на підстанціях. Розглянемо трифазну групу трансформаторів струму 330 кВ з ємністю 700 пФ і початковим $\text{tg}\delta_1=0,2\%$.

Аналогічним недоліком володіє і другий по поширеністю метод -вимірювання комплексної провідності. Норми ГКД 34.20.302- 2002 і СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301-2006 дозволяють виконувати контроль двома методами: вимірюванням комплексної провідності Y або вимірюванням $\text{tg}\delta_1$ і C_1 [5–8]. Не можна погодитися з тим, що пропонувані методи рівноцінні, оскільки контроль комплексної провідності придатний для відстежування зміни ємності, проте не придатний для контролю зміни $\text{tg}\delta_1$, оскільки зміна $\text{tg}\delta_1$ %, призведе до збільшення струму комплексної провідності всього на 1,4 мкА для трансформатора струму 330 кВ з ємністю 700 пФ. Контроль такої зміни струму комплексної провідності вимагає високоточного обладнання, а тому неможливий в реальних умовах експлуатації із-за впливів характеристик елементів самої вимірювальної схеми (зволоження поверхні і корозія резисторів, розрядників і інших елементів, а також температурна нестабільність елементів вимірювальної схеми), а також перешкод і різної дії наведеної напруги [8, 9].

Метод автоматизованого вимірювання $\text{tg}\delta_1$ і C_1 мостом змінного струму. Наступним методом є автоматизоване вимірювання $\text{tg}\delta_1$ і C_1 мостом змінного струму. Даний метод вимагає наявності еталонного об'єкту, наприклад, об'єкт з однойменної фази з відомим $\text{tg}\delta_1$ і C_1 (трансформатор струму, вводи, конденсатор зв'язку) або трансформатор напруги. Точні результати при вимірюваннях тангенса кута

діелектричних втрат під робочою напругою можна отримати, тільки застосовуючи мостову схему із заземленням екранів проводів в одній точці, на пристрої приєднання до вимірювальної обкладки. Також необхідно мати на увазі, що екрани проводів не повинні мати спільних точок в схемі моста, інакше міст вимірюватиме різницю потенціалів точок заземлення еталонного і контрольованого об'єктів. Для того, щоб виключити температурні перерахунки краще брати однотипний об'єкт, що має близьку по величині температуру.

Недоліком даного методу є достатньо великий час, необхідний для врівноваження моста. До переваг даного методу відноситься висока точність вимірювань (0,01%).

Тому пропоную вдосконалити відомий метод визначення комплексної провідності шляхом векторного порівняння струмів комплексної провідності різних об'єктів приєднаних до однієї фази. Цей метод є більш прогресивним порівняно з мостовим методом і передбачає використання еталонного та контрольованого об'єктів. Для визначення $\text{tg}\delta_1$ ізоляції пропоную використовувати синхронний запис струмів комплексної провідності еталонного і контрольованого об'єктів, з подальшим обчисленням різниці початкових фаз перших гармонік [4].

Векторна діаграма, що пояснює принцип обчислення абсолютного значення $\text{tg}\delta_1$ об'єкту представлена на рисунку 4.

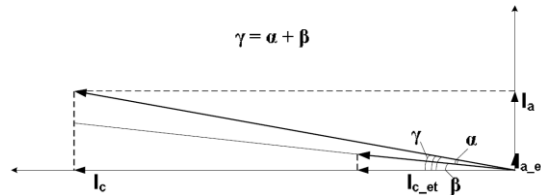


Рисунок 4. Векторна діаграма обчислення кута діелектричних втрат
 α - вимірний кут між двома векторами струмів комплексної провідності;
 β - кут діелектричних втрат еталонного об'єкту
 γ - дійсний кут діелектричних втрат контрольованого об'єкту

Основною проблемою для даного методу є необхідність достовірного опорного об'єкту. В якості такого об'єкта пропоную вибирати інший ТС і ВВ відповідної фази або напруга з вимірювальної обмотки ТН відповідної фази. Для підвищення точності вимірювань і контролю за зміною стану опорних об'єктів, в запропонованому методі і пристрої, що використовують метод векторного порівняння як і в мостових пристроях, пропонуємо використовувати алгоритм перехресного вимірювання який полягає в використанні кожного об'єкту однойменної фази як для еталонного так і для контрольованого об'єкту. У результаті такого алгоритму виходить N^2 величин відносних $\text{tg}\delta$ (де N - кількість об'єктів контролю, приєднаних до однієї фази). Після обробки цих даних обчислюються істинні значення $\text{tg}\delta_1$ кожного об'єкту. При цьому точність отриманих результатів зростає із зростанням кількості об'єктів [8–10].

Такий пристрій має використовувати синхронні багатоканальні АЦП (аналогоцифрові перетворювачі), які дозволяють вимірювати відносний $\text{tg}\delta$ з абсолютною похибкою не більше 0,01-0,02%, що дає можливість своєчасно реагувати на зміни ізоляції об'єктів.

Для реалізації запропонованого методу необхідна наявність мінімум 3-трифазних груп об'єктів, в будь-якій комбінації, або ж необхідна еталонна напруга від вимірювальної обмотки ТН, тоді можливий контроль і однієї трифазної групи.

При використанні напруги від ТН, можлива реалізація комбінованого пристрою з контролем виткових замикань ($3U_0$) для трансформатора напруги.

Для підвищення точності і контролю за зміною стану опорних об'єктів необхідно використовувати алгоритм перехресного вимірювання, який має на увазі використання кожного об'єкту однойменної фази, як еталонний, так і в якості контрольованого об'єкту. В результаті такого алгоритму виходить N^2 величин відносних $\text{tg}\delta_1$ (де N - кількість об'єктів контролю приєднаних до однієї фази). На рис. 5 представлена матриця результатів вимірювання, де номери рядків (другий індекс) позначають контрольовані об'єкти, а номери стовпців (перший індекс) еталонні. Наприклад $\text{tg}\delta_{34}$ -еталонним виступав ТС 3-ї групи, а ТС 4-ї групи як контрольований [1–3].

	$\text{tg}\delta_{10}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-2)0}$	$\text{tg}\delta_{(n-1)0}$
$\text{tg}\delta_{01}$		...	$\text{tg}\delta_{(n-2)1}$	$\text{tg}\delta_{(n-1)1}$
$\text{tg}\delta_{02}$	$\text{tg}\delta_{12}$		$\text{tg}\delta_{(n-2)2}$	$\text{tg}\delta_{(n-1)2}$
...	...	...		$\text{tg}\delta_{(n-1)-(n-2)}$
$\text{tg}\delta_{0(n-1)}$	$\text{tg}\delta_{1(n-1)}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-2)(n-1)}$	

Рисунок 5. Матриця результатів вимірювання відносних $\text{tg}\delta_1$ об'єктів

Вимірювання відносних кутів між векторами струмів повинно проводитися швидкодіючим синхронним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Теоретично встановлено і підтверджено на практиці, що достатнім є частота дискретизації АЦП 30 кГц, для отримання середній погрішності вимірювань кута не більше 0,0002 рад. На рис. 6 представлений графік розрахункової середньої погрішності

вимірювання $\text{tg}\delta_1$, а крапками на ньому нанесені результати практичного вимірювання $\text{tg}\delta_1$ з різною кількістю точок дискретизації на період струму промислової частоти 50 Гц.



Рисунок 6. Графік залежності розрахункової погрішності вимірювання $\text{tg}\delta_1$ від числа точок дискретизації на період промислової частоти 50 Гц з нанесеними точками результатів вимірювань отриманих дослідним шляхом середньої похибки (за наслідками 50 вимірювань)

Таким чином, для отримання міжвекторного кута з погрішністю не більше 0,05 град, необхідно аналізувати не менше 50 періодів струму провідності ізоляції для виключення випадкових похибок.

Точність і розрядність АЦП, грають важливу роль при вимірюванні кута. Досвідченим шляхом було встановлено вплив розрядності АЦП на величину погрішності при вимірюванні, результати з розрядністю 14-16 битий. Менш чутливі АЦП вноситимуть до результату достатньо велику погрішність (20 % і більш). АЦП з розрядністю 24 біта мають велику вартість [8, 9].

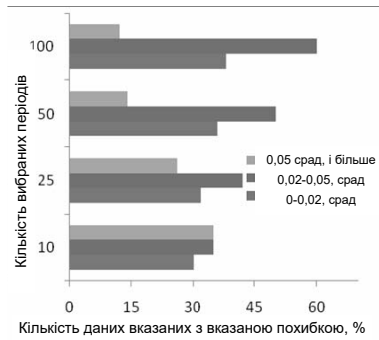


Рисунок 7. Гістограма розподілу похибок вимірювання кута між векторами струмів провідності ізоляції два об'єктів при використанні різної кількості аналізованих періодів струму промислової частоти 50 Гц

Порівняння результатів взаємних вимірювань, тобто значення $\text{tg}\delta_{01}$ і $\text{tg}\delta_{10}$ по модулю, із заданою погрішністю, і відрізнятися по знаку. Якщо результати не проходять таку перевірку, то їх місця в матриці заповнюються нулями оскільки вважається, що при даному вимірюванні результати були схильні до впливу сторонніх чинників і не можуть бути враховані при діагностиці.

В результаті отримуємо матрицю абсолютних значень, що має вид рис. 8, де стовпець значень відповідає одному об'єкту діелектричних втрат основної ізоляції об'єктів [3–5].

$\text{tg}\delta_{0-0}$	$\text{tg}\delta_{1-0}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-1)-0}$
$\text{tg}\delta_{0-1}$	$\text{tg}\delta_{1-1}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-1)-1}$
...
$\text{tg}\delta_{0-(n-1)}$	$\text{tg}\delta_{1-(n-1)}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-1)-(n-1)}$

Рисунок 8. Матриця абсолютних значень тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції об'єктів

Після отримання достовірних даних необхідно здійснювати основне завдання СНК стану ізоляції. На даному етапі необхідно визначити і відсіяти вплив на результати вимірювання різних чинників, наприклад, таких як забруднена поверхня ізолятора апарату або розгерметизація вимірювального датчика. Далі застосовуються алгоритми виявлення температурних залежностей, швидкостей і значень зміни діагностичних параметрів і формування висновку про стан основної ізоляції апарату [4].

На рис. 9 видно, що дані отримані перехресним методом стабільніші і відповідають результатам перевірочних вимірювань випробувальною установкою УВПГ-250. Дані отримані перехресним методом придатні для подальшої діагностики устаткування. Наприклад, для даного ТС встановлений коефіцієнт температурній залежності 0,81, що свідчить про погіршення стану основної ізоляції, хоча зростання діелектричних втрат поки не спостерігається. Проведення такого аналізу, за даними «еталонного» методу є

доволі непростим завданням. Перехресний метод виключає можливість систематичної погрішності вимірювань, при зміні характеристик еталонної групи.

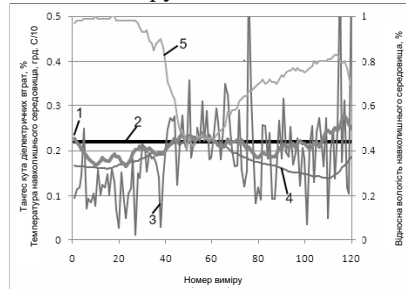


Рисунок 9. Графіки результатів вимірювань $\text{tg}\delta_1$ ТС типу ТФУМ-330: 1 – результати вимірів перехресним методом; 2 – результат виміру мостом змінного струму Р5026 з використанням установки УВПГ-250; 3 – результати вимірювань класичним («еталонним») методом; 4 – температура навколишнього середовища; 5 – відносна вологість навколишнього середовища

Контроль часткових розрядів. У силових високовольтних трансформаторах застосовується, головним чином, маслобар'єрна ізоляція, що складається із шарів електрокартону і нафтового масла, що чергуються [9–11]. З цих двох компонентів при впливі змінної й імпульсної напруг найбільш навантажені масляні канали. Так, наприклад, в області рівномірного поля співвідношення між напруженостями в маслі E_M і в електрокартоні E_K дорівнює:

$$\frac{E_M}{E_K} = \frac{\epsilon_K}{\epsilon_M} \approx 2. \quad (1)$$

Так як електрична міцність масла в 3-4 рази менше міцності просоченого електрокартону, то ЧР виникають насамперед у прошарках масла. Ескіз виконання ізоляції у внутрішньої поверхні обмотки (а) і картина електричного поля в масляному каналі поблизу обмотки (б) показаний на рис. 10.

У силових трансформаторах локальні підвищення напруженості електричного поля, достатні для виникнення ЧР, можуть виникати в різних місцях, причому небезпека ЧР визначеної інтенсивності значно залежить від місця їхнього виникнення. Так, інтенсивні ЧР у виді стременної корони в чисто масляному проміжку (наприклад, із фланця прохідного ізолятора) при впливі робочої напруги чи перенапруг представляють значно меншу небезпеку, чим аналогічні ЧР у маслобар'єрної ізоляції (наприклад, пробій масляного каналу), тому що в останньому випадку ці ЧР приводять до необоротних руйнувань твердої ізоляції. Крім того, ЧР однакової інтенсивності, що виникають у різних місцях по довжині обмотки, приводять до різних реєструючих значень явного розряду внаслідок загасання сигналу при його проходженні по обмотці. Ці обставини значно погіршують установлення небезпечних рівнів ЧР при різних впливах [5, 6, 7, 9].

Пробій масляного каналу найчастіше приводить до місцевих необоротних ушкоджень твердої ізоляції (обвуглені сліди на поверхні чи в товщі твердої ізоляції – електрокартону чи паперу) і можливому подальшому розвитку цих ушкоджень. Для ізоляції трансформатора важливо не тільки збереження її ізолюючих властивостей у момент пробою масляного каналу, але і збереження її тривалої міцності в процесі подальшої експлуатації. Тому напруга, що приводить до пробою масляного каналу, прийнято ототожнювати з пробивною напругою маслобар'єрної ізоляції, що визначає її короточасна електрична міцність [6, 7].

У головній ізоляції трансформаторів висока напруженість виникає в поверхні проводу обмотки $E_{max} = (2 \div 2,5) E_M$, де E_M – напруженість у середині масляного каналу, що визначається за формулою:

$$E_M = \frac{U}{r_{cp} \epsilon_M \sum_{i=1}^n \frac{1}{\epsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}, \quad (2)$$

де r_{cp} – радіус поверхні, що проходить через середину масляного каналу; r_i – радіус граничної поверхні i -го шару; ϵ_i – діелектрична проникність i -го шару. У зв'язку з значним зсувом поля в першому масляному каналі, як правило, пробію наслідують насамперед у цьому каналі, що розділяє обмотку і перший бар'єр з картону [4].

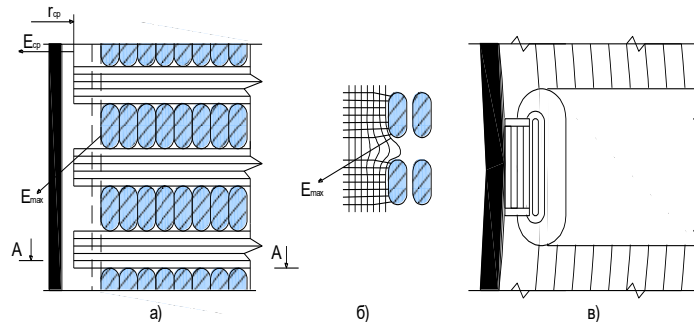


Рисунок 10. Ескіз виконання ізоляції у внутрішньої поверхні обмотки (а) і картина електричного поля в масляному каналі поблизу обмотки (б)

Характерними рисами умов роботи маслобар'єрної ізоляції в трансформаторах і реакторах є відсутність відкритих металевих поверхонь електродів у місцях найбільшої напруженості поля і відсутність

гострих точок і кутів на електродах. Тому початкові ЧР локалізуються не в поверхні металу, а в поверхнях ізоляції, у першу чергу, в місцях стиків ізоляційних деталей. Іншим джерелом початкових ЧР є місця торкання бар'єрів і ізольованого проводу обмотки в переходах і перемичках.

Дослідження часткових розрядів в апаратній паперово-масляній ізоляції

Апаратна паперово-масляна ізоляція є неоднорідним шаровим діелектриком. Її макроскопічну структуру складають шари просоченої нафтовим маслом кабельного паперу і масляні прошарки, що заповнюють зазори між шарами паперу [8–10].

У залежності від призначення в конструкціях з паперово-масляною ізоляцією застосовуються два варіанти виконання ізоляційного шару: 1) листовий, чи рулонний, коли шар ізоляції виконується з суцільних аркушів (рулонів) паперу; 2) стрічковий, коли шар ізоляції складається з стрічок чи смуг паперу.

Листова, чи рулонна ізоляція найчастіше застосовується в прохідних ізоляторах, довжина яких не перевищує ширини паперових рулонів.

Стрічкова ізоляція застосовується для накладення на ізолюючі елементи складної конфігурації, особливо в місцях вигинів з малими радіусами, а також, коли розміри ізолюючих елементів перевищують ширину паперових рулонів, що випускаються промисловістю. Зокрема, вона застосовується в деяких типах трансформаторів струму і прохідних ізоляторів.

Ряд конструкцій апаратів і прохідних ізоляторів має негерметичне виконання, при якому внутрішня ізоляція захищена від впливу навколишньої атмосфери тільки за допомогою розширювачів, масло яке має контакт із повітрям. Унаслідок цього відбувається поступове зволоження ізоляції з постійною часу 3-5 років. Рівноважна вологомисткість ізоляції (просоченої маслом паперу) через 10-15 років експлуатації досягає 4-5% по масі. При порушенні технологічного режиму [12] ізоляція може мати підвищену (до 1-1,5%) вологомисткість у стані постачання.

Збільшення вологості ізоляції призводить до погіршення ряду її електричних характеристик. Відбувається зниження пробивної напруженості, ріст $\tan \delta$, погіршення фізико-хімічних характеристик масла, зв'язаних з інтенсифікацією окисних процесів, особливо при температурі 80-90° С в нормальному робочому режимі. Вологість ізоляції помітно позначається на зниженні напруженості початкових і критичних ЧР, а також на збільшенні їхньої інтенсивності при заданій напруженості електричного поля. Температура не робить значного впливу на характеристики ЧР.

Залежність напруженості часткових розрядів від товщини ізоляції. Для ізоляції з різко нерівномірним полем, виникнення початкових і критичних ЧР визначається процесами, що відбуваються на кінці електроду. Це підтверджується структурою відповідних емпіричних формул, у яких показник ступеня при d близький до 0,5. За даними експериментів залежність середніх значень E_H (на рівні $3 \cdot 10^{-12}$ - 10^{-14} Кл) від товщини діелектрика може бути представлена у вигляді:

$$E_H = 3,6d^{0,5} \quad (3)$$

де d – товщина ізоляції в мм ($0,05 \leq d \leq 10$ мм); E_H – в кВ/мм. Розкид значень E_H характеризується коефіцієнтом варіації σ_H / E_H , рівним 10%.

Дослідження, зроблені на зразках великої ємності з гострим краєм електроду при схемі реєстрації ЧР з чутливістю $\sim 10^{-12}$ Кл, призвели до наступних залежностей для стрічкової ізоляції з кабельного паперу К-12:

$$E_H = 10 d^{0,58} \quad (4)$$

$$E_{KP} = 18 d^{0,58} \quad (5)$$

де d – товщина ізоляції в мм; E – середня напруженість електричного поля в кВ/мм.

Розкид напруженості початкових ЧР на рівні 10^{-12} Кл для окремих зразків характеризується коефіцієнтом варіації σ_H / E_H , рівним 25-30%, а критичних ч. д. σ_{KP} / E_{KP} , рівним 7-10%.

Для ізоляції із сильно нерівномірним полем на кінці електродів підвищення напруженості (напруги) ЧР можна досягти шляхом ослаблення крайового ефекту електродів.

Для ізоляції з рівномірним чи слабо нерівномірним полем і з усунутих крайовим ефектом напруженості початкових і критичних ЧР, розраховані по максимальній напруженості на електроді з меншим радіусом кривизни, не залежать від товщини діелектрика. Так, наприклад, для стрічкової ізоляції з кабельного паперу К-12, у якій крайовий ефект був усунутий за допомогою конусних оброблень, $E_H = 12$ кВ/мм і $E_{KP} = 30$ кВ/мм. Коефіцієнт варіації для цих величин складає відповідно 30 і 10% [3, 4].

Часткові розряди в ізоляції електричних машин. Вплив кожного з цих факторів є досить істотним. У зв'язку з цим вибір товщини ізоляції і робочої напруженості ґрунтується головним чином на експлуатаційному досвіді. При цьому встановлений зв'язок між товщиною ізоляції d і номінальною напругою машини $U_{НОМ}$ [1], зображено на рисунку 11, що може бути апроксимована формулою [2–4]:

$$d = 1,45 + 0,24 U_{НОМ}, \quad (6)$$

де d у мм, а $U_{НОМ}$ у кВ.

Останнім часом були зроблені розробки, що дозволили зменшити товщину ізоляції і збільшити припустимі напруженості (рис. 12).

Розглянемо можливість виникнення ЧР:

$$d = d_B + d_D, \quad (7)$$

$$E_B = \frac{U_m}{d_B + \frac{\epsilon_B d_D}{\epsilon_D}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{НОМ}}{\sqrt{3} \left(d_B + \frac{\epsilon_B d_D}{\epsilon_D} \right)}. \quad (8)$$

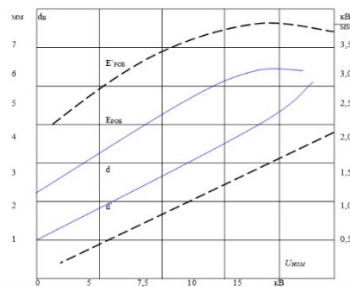


Рисунок 11. Залежність товщини ізоляції d і робочої напругності $E_{роб}$ від номінальної напруги машини для нормальної (d , $E_{роб}$) і більш тонкої ізоляції (d , $E'_{роб}$)

З (8) (9) можна знайти вираз, що зв'язує $U_{НОМ}$ та E_B .

$$\text{ПРИ } \epsilon_d/\epsilon_B = 5 \text{ МАЄМО: } U_{НОМ} = \frac{E_B(4d_B+1,45)}{4,1-0,24E_B}, \quad (9)$$

де d_B - в мм, E_B - в кВ/мм, $U_{НОМ}$ - в кВ.

Підставивши замість E_B значення пробивної напругності газового включення товщиною d_B , визначимо зв'язок між номінальною напругою машини і товщиною повітряних включень, у яких виникають ЧР. Отримана в такий спосіб залежність наведена на рисунку 12. З рисунку бачимо, що ЧР можуть мати місце тільки в машинах з номінальною напругою 6 кВ та вище [4].

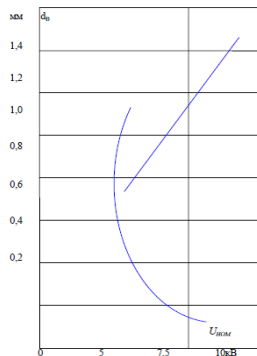


Рисунок 12. Залежність товщини d_B повітряних включень, в яких виникають ЧР при номінальній напрузі, від номінальної напруги $U_{НОМ}$ для випадку одного включення де d_B – товщина повітряного включення і d_d – товщина твердої ізоляції [4]

Застосування пристрою визначення параметрів ізоляції «СА-7100»

Мости призначені для вимірювання електричної ємкості (далі – ємкості) і тангенса кута діелектричних втрат (далі – тангенса кута втрат), опори ізоляції постійному струму (далі – опори), електричної напруги і частоти змінного струму [3–5].

Мости випускаються в трьох виконаннях:

- СА7100-1 (без вбудованого еталонного конденсатора);
- СА7100-2 (з вбудованим еталонним конденсатром);
- СА7100-3 (з вбудованим еталонним конденсатором і модулем мегаомметра).

Область і умови застосування: мости застосовуються для контролю ізоляції і вимірювання параметрів електротехнічного, електронного устаткування і їх компонентів при виробництві і експлуатації, а також для проведення перевірки, калібрування, метрологічної атестації і випробувань засобів вимірювальної техніки. Мости можуть експлуатуватися у виробничих цехах, стаціонарних і пересувних лабораторіях.

Мости відносяться до ремонтних і відновлюваних виробів.

Нормальні умови застосування мостів:

- температура навколишнього повітря – від 15 до 25 °С;
- відносна вологість повітря – до 80 % при температурі 25 °С;
- атмосферний тиск – від 84 до 106 кПа.

Робочі умови застосування мостів:

- температура навколишнього повітря – від мінус 10 до плюс 40 °С;
- відносна вологість повітря – до 80 % при температурі 25 ±С;
- атмосферний тиск – від 84 до 106 кПа.

Кліматичні умови при транспортуванні Мостів:

- температура навколишнього повітря – від мінус 20 до плюс 50 °С;
- відносна вологість – 80 % при температурі 35°С.

Кліматичні умови при зберіганні мостів:

- температура навколишнього повітря – від мінус 20 до плюс 50 °С;
- відносна вологість – 80 % при температурі 35 °С.

Міст одночасно автоматично вимірює: ємність по двоелементній паралельній схемі заміщення і тангенс кута втрат; робоча напруга (значення першої гармоніки, що діє); частоту робочої напруги; температуру навколишнього повітря[5]. Структурна схема моста приведена на рис. 13.

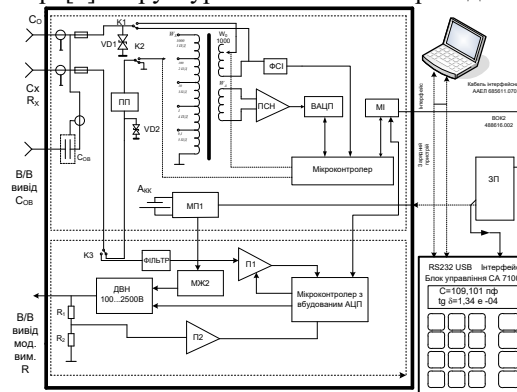


Рис.13. Схема моста

КС - компаратор струмів; ФСІ - формувач синхроімпульсів; ПСН - підсилювач сигналу нерівноваги; ВАЦП - вектор-вимірювальний аналого-цифровий перетворювач; ПП - пороговий пристрій; МІ - модуль інтерфейсу; МЖ1 - модуль живлення 1; СКАН - свинцево-кислотний акумуляторний накопичувач; ЗП - зарядний пристрій; П1 - підсилювач 1 зі змінним коефіцієнтом підсилення; П2 - підсилювач 2; МЖ2 - модуль живлення 2; ДВН - джерело високої напруги; В/в - вивід С0; ВОК - волоконно-оптичний кабель БК (Блок керування) призначений для управління процесом вимірювання, а також для діалогу оператора з мостом

ЗП (Зарядний пристрій) забезпечує формування живильної напруги БК, перетворення електричних сигналів в оптичних, а також використовується для заряду акумулятора. БК і ЗП розміщуються на робочому місці оператора, а Блок вимірювання розташовується в захищеній високовольтній зоні. Зв'язок БК і Блоку вимірювача здійснюється через повністю діелектричний волоконно-оптичний кабель, що дозволяє забезпечити безпеку персоналу. У БК передбачені послідовні інтерфейсні порти для зв'язку з ПК (RS232 і USB). При використанні Моста з ПК розширюються діалогові можливості приладу, а також можливості по збереженню і подальшій обробці результатів вимірювань стандартними програмами. МІ (модуль інтерфейсу) здійснює функцію перетворення оптичних сигналів в електричні. МЖ 1 (модуль живлення) служить для формування живлячої напруги модуля вимірювання С, tg, а також забезпечує контроль заряду акумулятора. КС (компаратор струмів), вбудований еталонний конденсатор (С₀) (або зовнішній еталонний конденсатор С_{0в}) і вимірюваний конденсатор (СХ) створюють мостову схему вимірювання. УСН (підсилювач сигналу нерівноваги) підсилює сигнал нерівноваги до рівня, необхідного для ефективної роботи ВАЦП. ВАЦП (вектормерний аналого-цифровий перетворювач) є комбінацією двох синхронних детекторів з взаємно квадратурними опорними коливаннями і два АЦП, підключених до їх виходів. Значення коду, що прочитуються мікроконтролером з вказаних АЦП, пропорційні відповідним квадратурним складовим сигналу нерівноваги. Мікроконтролер здійснює перетворення команд, що поступають з БК, в сигнали управління вузлами модуля вимірювання С, tgδ, а також передає в БК через ВОК (волоконно-оптичний кабель) значення коду, АЦП, що виробляються, інформацію про перевантаження вхідних ланцюгів по струму і про розряд акумулятора. КТ містить обмотки W_x і W₀, через які протікають порівнювані струми (струм вбудованого еталонного конденсатора і струм об'єкту вимірювання) і обмотку W_N, яка служить для виділення сигналу нерівноваги. Залежно від вибраного піддіапазону вимірювання, струм об'єкту вимірювання (з 1 п/д до 5 п/д) подається на один з виводів обмотки W_x (на рисунку показано положення перемикача піддіапазонів, яке відповідає 2 п/д вимірювання). 5 п/д реалізовано за допомогою додаткового двоступінчастого трансформатора струму який не показаний на схемі [2, 4, 5, 6]. Схема під'єднання моста змінного струму показана на рисунку 14.

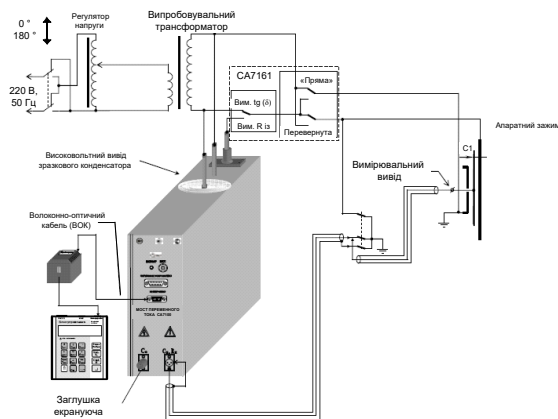


Рисунок 14. Схема під'єднання моста змінного струму

Число витків обмотки W_0 може мінятися від 1 до 1000. Зміною кількості витків цієї обмотки здійснюється врівноваження мостового кола в межах піддіапазону вимірювання. ФСІ (формував синхроімпульсів) виробляє імпульси, синхронні з вимірювальним сигналом. Період даних імпульсів вимірюється за допомогою мікроконтролера. Завдяки цьому формовані ім опорні коливання для синхронних детекторів. Цей пристрій як і КІВ-500 не може бути використаний для безперервного контролю зміни значень $\text{tg}\delta$ [3].

Висновки

У результаті проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Сучасні методи діагностики ізоляції електроустановок обладнання, такі як вимірювання часткових розрядів, вимірювання тангенса кута діелектричних втрат, методи індукованих напруг, спектроскопія та термографія, є ефективними інструментами для виявлення дефектів в ізоляції.
2. Ефективність діагностики ізоляції залежить від ретельного аналізу умов експлуатації та врахування впливу зовнішніх чинників на її стан.
3. Для забезпечення безперебійної роботи електроенергетичного обладнання рекомендується поєднання різних методів діагностики та використання комплексних систем моніторингу.
4. Системи безперервного контролю ізоляції ТС і ВВ повинні забезпечити зниження аварійності в енергосистемах, а також накопичення даних, необхідних для вдосконалення системи діагностики, автоматизацію вимірювань і аналізу, зменшення об'єму робіт персоналу зниження впливу людського чинника, автоматичного запису і збереження даних вимірювань, виявлення тенденцій і швидкості зміни параметрів і своєчасного отримання сигналів про відхилення як черговим персоналом підстанції, так і службами діагностики енергокомпаній і магістральних мереж.
5. Проте забезпечити такі високі вимоги здатні пристрої, що базуються на методах що дозволяють з необхідною точністю вимірювати основні характеристики ізоляції $\text{tg}\delta_1$ і C_1 . Такими методами, на даний момент, є мостовий метод і метод векторного порівняння.
6. Отже, подальший розвиток та вдосконалення методів та засобів діагностики ізоляції електроенергетичного обладнання є важливим напрямком для підвищення надійності та безпеки електромережі.

Література

1. Лабзун М.П., Рубаненко О.Є., Кутін В.М. Методи та засоби діагностування опорно-стрижневих ізоляторів. Вінниця : ВНТУ, 2010. 323 с.
2. Рубаненко О. Є. Вдосконалення методів і засобів діагностування високовольтних вимикачів. Вінниця : ВНТУ, 2012. 188 с.
3. Смагло І. І., Рубаненко І.О. Дослідження результатів моніторингу результатів паперово-оливної ізоляції конденсаторного типу високовольтного обладнання електропідстанції 750 кВ «Вінницька». Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 09-11 квітня 2013 р. Кременчук, 2013. С. 188–190.
4. Стаднік М. І., Видмиш А. А., Штуць А. А., Колісник М. А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика : навч. посіб. Вінниця : ТОВ "ТВОРИ", 2020. 332 с.
5. Бардик Є.І., Болотний М.П., Коваль Я.С. Визначення «слабких» за надійністю силових трансформаторів енергосистем за результатами оцінки відмови через збурення в електричній мережі. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Київ, 2021. № 2. 132 с.
6. Возняк О. М., Штуць А. А. Розрахунок нестандартних W-параметрів чотириполюсника на біполярному транзисторі. Техніка, енергетика, транспорт. 2020. № 2 (109). С. 122-128.
7. Возняк О. М., Штуць А.А. Дослідження системи контролю температури природного газу. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 3 (110). С. 34-50
8. Возняк О. М., Штуць А.А., Наавгуст О.П. Аналіз комплексної моделі моніторингу параметрів якості електроенергетики. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. № 4 (115). С. 148-159.
9. Шевченко А. В., Видмиш А. А., Штуць А. А. Геометричне моделювання в задачі трасування лінійних інженерних споруд Вісник ХНУ. Серія Технічні науки. 2020. №1 (281). С. 279-285.
10. Сапожніков С. В. Основи енергетичного менеджменту : конспект лекцій ; укладач Суми. 2015. 163 с.
11. Бакалін Ю. І. Енергозбереження та енергетичний менеджмент : навчальний посібник. Харків, 2006. 320 с.
12. Закладний О. М., Дешко В. І., Іншеков Є. М. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України. Луганськ : Видавництво «Місячне сяйво» 2009. 696 с.
13. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. Key Engineering Materials. 2020.

Vol. 844. P. 168-181. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.844.168.

14. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. № 66 (1). P. 51–58. doi:10.3311/PPme.18659.

References

1. Labzun M.P., Rubanenko O.E., Kutin V.M. Methods and means of diagnosing support-rod insulators: VNTU, 2010. 323 p.
2. Rubanenko O. E. Improvement of methods and tools for diagnosing high-voltage circuit breakers: Vinnytsia: VNTU, 2012.-188 p.
3. Smaglo I.I., Rubanenko I.O. Study of the results of monitoring the performance of paper-oil insulation of capacitor-type high-voltage equipment of the 750 kV Vinnytsia electrical substation. *Electromechanical and energy systems, modeling and optimization methods. Collection of scientific papers of the 11th International scientific and technical conference of young scientists and specialists in the city of Kremenichuk, April 9-11, 2013*. Kremenichuk. 2013. P. 188 -190.
4. Stadnik M. I., Vydmysh A. A., Shtuts A. A., Kolisnyk M. A. Intelligent systems in electric power. Theory and practice: education. manual Vinnytsia: TVORY LLC, 2020. 332 p.
5. Bardyk E.I., Bolotny M.P., Koval J.S. Determination of "weak" in terms of reliability power transformers of energy systems based on the results of assessment of failure due to disturbances in the electrical network // Scientific news of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv, 2021. No. 2 132 P.
6. Calculation of non-standard W-parameters of a quadrupole on a bipolar transistor. Vozniak O. M., Stuts A. A. *Technology, energy, transport*. 2020. No. 2 (109). P. 122-128.
7. Wozniak O.M., Shtuts A.A. Study of the natural gas temperature control system. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. 2020. No. 3 (110). P. 34-50
8. Wozniak O.M., Shtuts A.A., Naaugust O.P. Analysis of a comprehensive model of monitoring of power quality parameters. *Technology, energy, transport, agricultural industry*. 2021. No. 4 (115). P. 148-159.
9. Shevchenko A. V., Vydmysh A. A., Shtuts A. A. Geometric modeling in the problem of tracing linear engineering structures *Visnyk KhNU*. Series Technical sciences. 2020. No. 1 (281). P. 279-285.
10. Sapozhnikov S. V. Fundamentals of energy management: summary of lectures compiled by Sumy. 2015. 163 p.
11. Bakalin Yu. I. Energy conservation and energy management study guide. Kharkiv. 2006. 320 p.
12. Zakladny O. M., Dshko V. I., Inshkov E. M. Practical manual on energy saving for objects of industry, construction and housing and communal services of Ukraine. Luhansk: Moonlight Publishing House, 2009. 696 p.
13. A. Shtuts, M. Kolisnyk, A. Vydmysh, O. Voznyak, S. Baraban, P. Kulakov. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 844. P. 168-181. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.844.168.
14. V. Matvijchuk, A. Shtuts, M. Kolisnyk, I. Kupchuk, I. Derevenko. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. № 66 (1). P. 51–58. doi:10.3311/PPme.18659