УДК 620.179.16

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ПРИ КОНТРОЛІ ПОРЦЕЛЯНОВИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Р.М. Галаган[1)], В.С. Єременко[2)]

1) Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03065, тел. (044) 454-95-47, e-mail: psnk@kpi.ua

2) Національний авіаційний університет України, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03058, тел. (044) 406-74-35, e-mail: nau_307@ukr.net

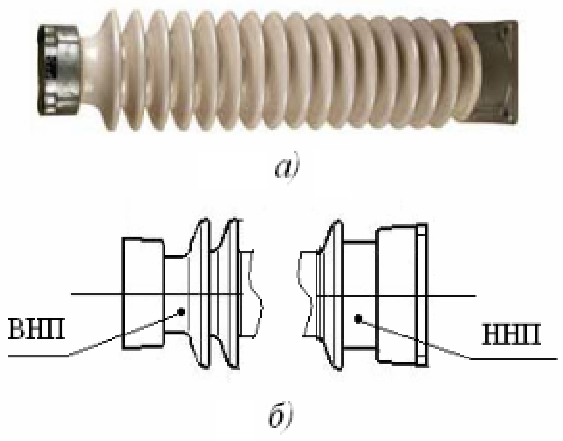
Проаналізовані похибки, що виникають при проведенні ультразвукової структуроскопії фарфорових високовольтних ізоляторів. Дані рекомендації по зменшенню впливу похибок на результат контролю.
Ключові слова: порцеляновий ізолятор, швидкість ультразвуку, контроль, дефект, пористість, тіньовий метод, оператор, акустичний контакт.

Проанализированы погрешности, возникающие при проведении ультразвуковой структуроскопии фарфоровых высоковольтных изоляторов. Даны рекомендации по уменьшению влияния погрешностей на результат контроля.
Ключевые слова: фарфоровый изолятор, скорость ультразвуку, контроль, дефект, пористость, теневой метод, оператор, акустический контакт.

Errors, arising up during realization of ultrasonic defectoscopy of porcelain high-voltage insulators, are analysed. Recommendations on reduction of their influence by result of the control are given.
Keywords: porcelain insulator, speed to the ultrasound, control, defect, porosity, shadow method, operator, acoustic contact.

Одним з найбільш розповсюджених внутрішніх дефектів виробів, виготовлених з високовольтної електропорцеляни, наприклад, опорних стрижневих ізоляторів (рис.1*а*), є відкрита мікроскопічна пористість (ВМІП) [1]. Це дефект виробничого походження, що пов'язаний з порушенням основних технологічних режимів заводом-виробником. Волога, що потрапляє на межу зони ВМІП, за рахунок капілярних сил проникає вглиб зони. В результаті цього можливе як механічне пошкодження опорних стрижневих ізоляторів (поява та ріст макроскопічних тріщин за рахунок розширення льоду при замерзанні), так і втрата ізоляційних властивостей.

Основним неруйнівним методом виявлення ВМІП є ультразвукова структуроскопія (УЗС), що базується на визначенні швидкості розповсюдження ультразвукових коливань (УЗК) в об'єкті контролю (ОК). Виріб контролюється або перед монтажем, або на змонтованому обладнанні при відключеній напрузі. Методикою проведення УЗС опорних стрижневих ізоляторів (ОСІ) передбачається прозвучування ультразвуковими перетворювачами (УЗП) об'єкту в радіальному напрямку у верхньому (ВНП) та нижньому (ННП) небезпечних перетинах (рис.1*б*). Проведення контролю саме у ВНП/ННП важливо тому, що вірогідність виходу ВМІП на поверхню ізолятору з-під фланців в цих перетинах є значною.



а)- зовнішній вид ізолятор ИОС-110-400 УХЛ1; б) - позначення ВНП та ННП

Рисунок 1 – Опорний стрижневий ізолятор

При проведенні УЗС визначається часовий зсув між випроміненим та прийнятим сигналами [2]. При цьому механічним способом (наприклад, за допомогою штангенциркуля) вимірюється лінійний розмір бази прозвучування. Тоді швидкість розраховується за наступними формулами:

- для луна-методу

$$C = \frac{2H}{T + \Delta T}, \qquad (1)$$

- для методу проходження (тіньовий)

$$C = \frac{H}{T + \Delta T}, \qquad (2)$$

де H – довжина бази вимірювання (м), T – часовий інтервал між випроміненим та прийнятим сигналом; ΔT – поправка, що визначається розрахунково-експериментальним шляхом.

Реалізація луна-методу ефективна при строгій геометрії ізолятора. Для використання тіньового методу необхідно забезпечити співвісне встановлення випромінюючого та приймаючого перетворювачів. Як правило, при прозвучуванні ОК в основному використовується луна-метод [3].

Для наочності аналізу похибок, що виникають при контролі ОСІ, використано діаграму Ісікави (причинно-наслідкова діаграма), що є графічним зображенням, яке в стислій формі та логічній послідовності розподіляє причини, що зумовлюють наслідок (рис. 2).

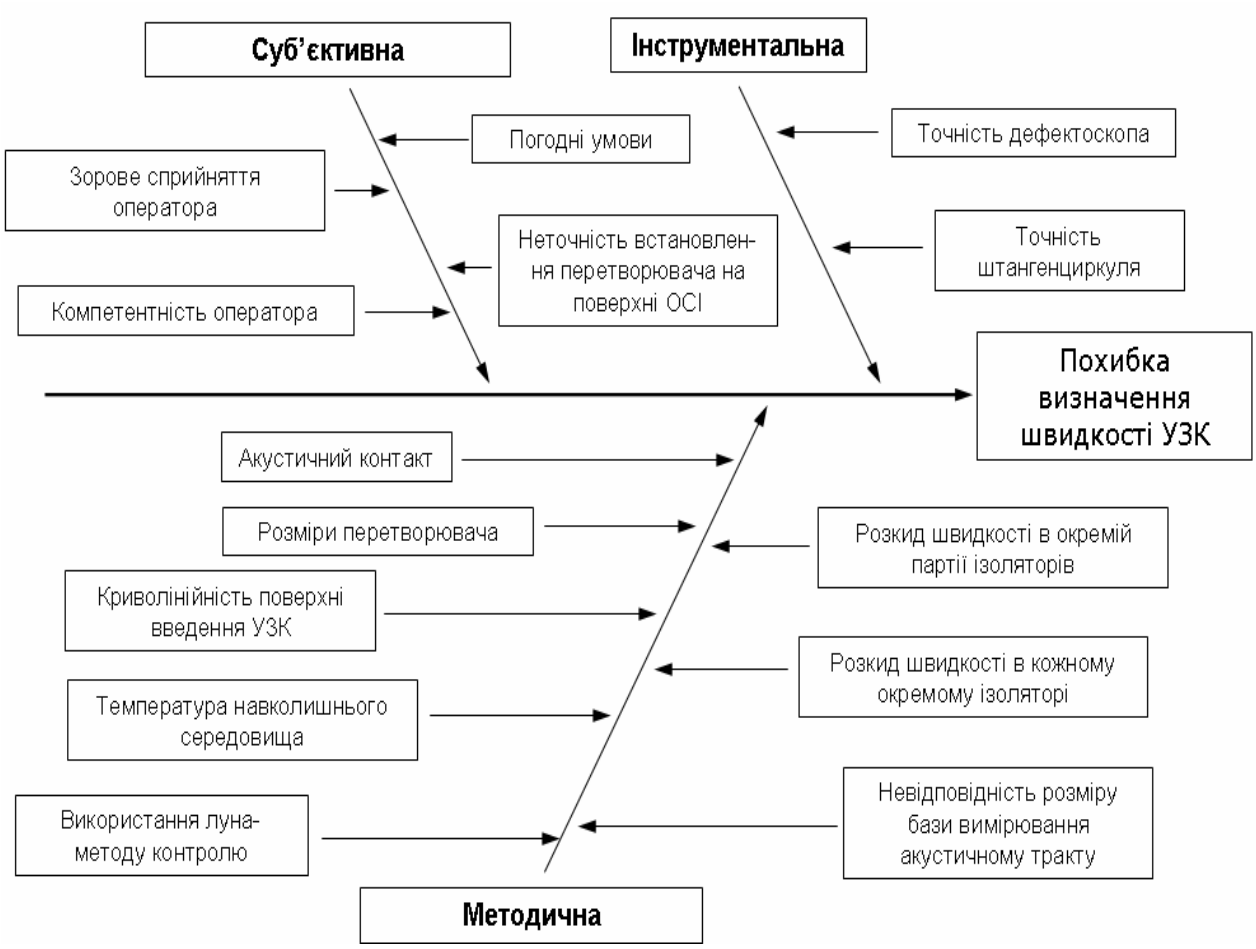


Рисунок 2 – Фактори, що впливають на точність визначення швидкості УЗК в ОСІ

Проаналізуємо похибки, що виникають при проведенні УЗС ОСІ:

1) інструментальну похибку, яка визначається точністю приладу, що використовується для вимірювання часового зсуву між випроміненим та прийнятим ультразвуковими сигналами.

2) суб'єктивну похибу, що вноситься оператором при вимірюванні штангенциркулем лінійного розміру бази прозвучування у ВНП/ННП;

3) методичну похибку, на яку впливає геометрія ОК та тип УЗП, що використовуються при контролі луна-методом.

Для визначення часового зсуву між випроміненим та прийнятим сигналами УЗК використовуються дефектоскопи з часовою розгорткою по екрану відображення, такі як УД2-12 [3] та УДС2ВФ-ЦИВОМ-ЭП. Дефектоскоп ручного контролю УД2-12 є досить старою моделлю, однак цілком задовольняє споживача. Причому під нього розроблені й випробувані часом методики контролю й технологічні інструкції. Основні недоліки УД2-12 – це відсутність можливості паспортизації результатів контролю, малий екран, мала яскравість розгортки, особливо із «підсівною» електронно-променевою трубкою (ЕПТ), значні габарити та вага. Заявлена межа допустимої основної абсолютної похибки вимірювання дефектоскопом УД2-12 часового інтервалу – не більше $\pm(0{,}2+0{,}01T)$мкс, де T – інтервал часу. Межа значення похибки вимірювання часового інтервалу спеціалізованим приладом УДС2ВФ-ЦИВОМ-ЭП складає $\pm(0{,}2+0{,}001T)$мкс.

Суб'єктивна похибка виникає при вимірюванні лінійного розміру бази прозвучування штангенциркулем із-за зорового сприйняття оператором ноніусної шкали (ціна поділки шкали по ноніусу 0,05мм). Складність вимірювань штангенциркулем при контролі ізоляторів полягає в тому, що ОСІ не демонтують при проведенні діагностики. Доводиться проводити всі контрольно-вимірювальні операції на відкритому просторі в досить незручних положеннях (на висоті до 10м), що не сприяє точному визначенню геометричного розміру по ноніусу штангенциркуля.

Варто зазначити, що методика контролю передбачає проведення УЗС ОСІ двома операторами [3], один з яких знаходиться безпосередньо поблизу від виробу, вимірює штангенциркулем лінійний розмір бази прозвучування і встановлює перетворювач на ОК, а інший по команді першого виконує вимірювання часу розповсюдження УЗК в ОК. Такий підхід не дозволяє зменшити загальну суб'єктивну похибку.

Методична похибка може бути домінуючою при такому методі вимірювань. Лінійний розмір бази прозвучування, як було зазначено раніше, визначається за допомогою штангенциркуля. Форма ВНП/ННП порцелянових ізоляторів в результаті їх виготовлення не є ідеальним циліндром, тому визначений штангенциркулем розмір, строго кажучи, не є діаметром, а лише являє собою відстань між двома точками, до яких дотикаються губки штангенциркуля (рис. 3).

Саме в одну з цих точок необхідно встановити перетворювач, щоб визначити часовий зсув. Так як поверхня введення УЗК найчастіше є досить криволінійною і нерівною, тому перетворювач, що має певні геометричні розміри, дотикається до поверхні введення УЗК не по всій контактній площі, а лише частково в точці (рис. 4).

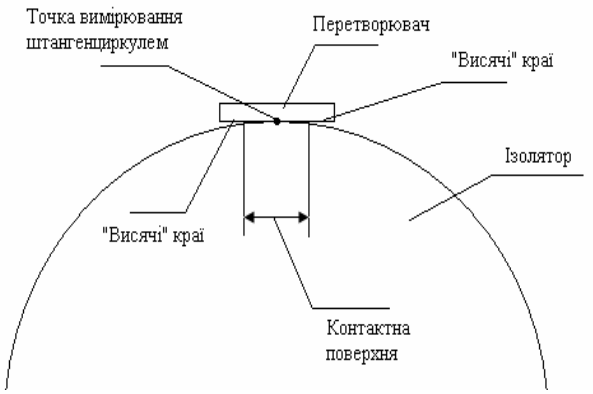


Рисунок 3 – Реальний контакт УЗП з поверхнею введення УЗК ОСІ

Зрозуміло, що ідеально сумістити центр перетворювача з точкою вимірювання штангенциркулем неможливо, тим паче забезпечити такі умови, щоб акустична вісь перетворювача проходила через дві визначені штангенциркулем точки (рис. 4). Особливо це важко зробити із-за криволінійної форми бічної поверхні ізолятору у ВНП/ННП.

Внаслідок нерівності поверхні введення УЗК губки штангенциркуля (або одна з губок) можуть потрапити в западини (або підвищення) в одній з точок (лінії) поверхні введення. Якщо датчик матиме досить великі розміри, то прийнятий сигнал буде усередненим по площі поверхні введення, тому часовий зсув між випроміненим сигналом і прийнятим не відповідатиме відстані, яка виміряна штангенциркулем.

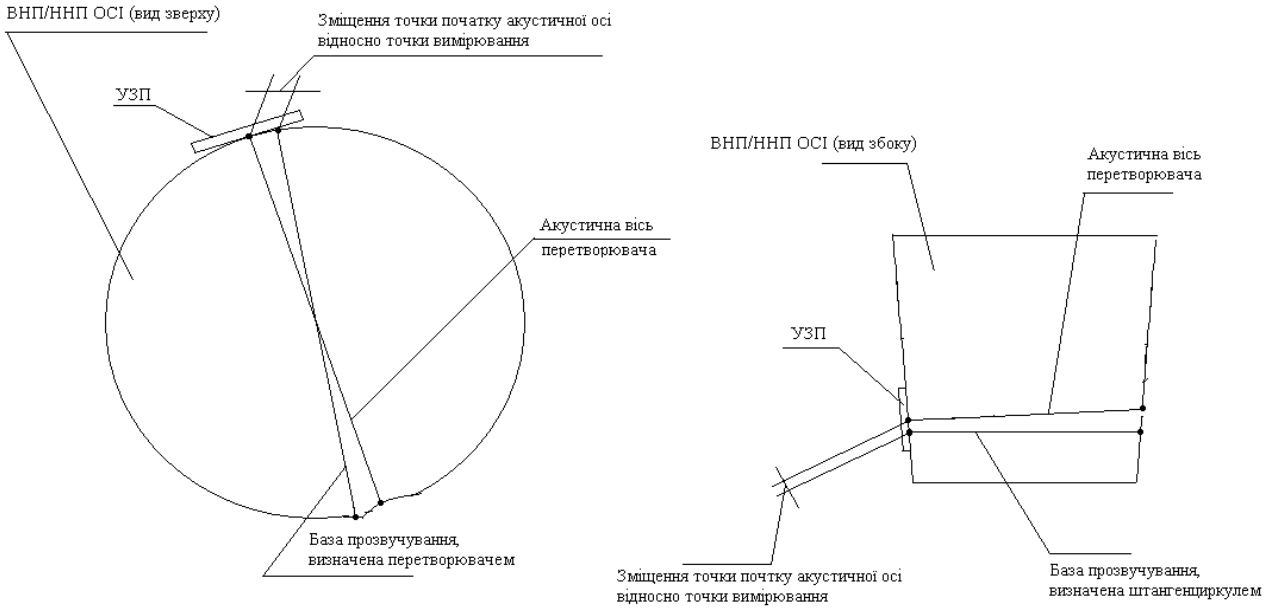


Рисунок 4 - Похибка із-за не суміщення бази прозвучування з акустичною віссю ОСІ

Звідси слідує, що підставлені у формулу (1) для луна-методу значення відстані і часу дадуть заздалегідь невірний результат.

Використання перетворювачів кінцевого розміру та луна-методу на таких криволінійних поверхнях введення та відбиття УЗК приводить до того, що акустичний сигнал «розпливається» в часі. Це, в свою чергу, є причиною появи похибки при визначенні часового зсуву.

Для аналізу впливу наведених вище факторів на точність визначення швидкості розповсюдження ультразвуку ВНП та ННП ізолятора ИОС-110-400 було поділено на три радіальні перерізи. Кожен переріз ВНП визначається 34-ма точками, в яких за допомогою штангенциркуля (ціна шкали поділки по ноніусу 0,05мм) визначалась база вимірювання. Кожна з точок перерізу знаходилась приблизно на одній відстані (в кутових координатах це складає 10°-11°) одна від одної по колу. Точки першого і третього перерізу знаходились на одній прямій вздовж осі ізолятора, точки другого перерізу, що був розташований між першим і третім, були зсунуті відносно точок першого і третього перерізу на 5°. Результати вимірювань бази прозвучування штангенциркулем одного із ізоляторів типу ИОС-110-400 наведені на рис. 5.

З графіка видно, що бічна поверхня ВНП є конусоподібною, так як криві по кожному із перерізв не співпадають, і чітко прослідкується зменшення виміряних розмірів (у відповідних точках кожного перерізу вздовж осі ізолятора). Також чітко видно, що кожен переріз не є колом (на рис. 5 спостерігаємо не прямі лінії, які є характерними для кола), а має незначну еліптичність. Як було зазначено вище, така нерівність поверхня ізолятора у ВНП приводить до збільшення похибки визначення швидкості УЗК в ОК. Різниця між максимальною та мінімальною визначеними базами вимірювання становить ≈3,5 мм (у ВНП).

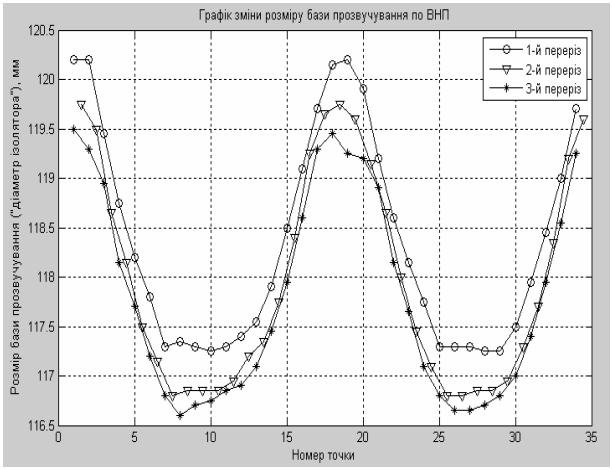


Рисунок 5 - Зміни розміру бази прозвучування по трьох перерізам ВНП

Досить високі вимоги пред'являються до якості акустичного контакту на таких криволінійних поверхнях, так як потужність прийнятого сигналу значною мірою залежить

від якісного акустичного контакту. Згідно [2] рекомендовано для забезпечення акустичного контакту використовувати при додатних температурах водопровідну воду, тому що використання мастила приводить до забруднення ізолятора. Вода, що не має достатньої в'язкості і швидко стікає з поверхні введення УЗК, на жаль, не є зручною контактною рідиною при проведенні УЗС на встановлених ОСІ.

Вплив криволінійності поверхні введення УЗК на точність визначення швидкості ультразвуку в ОК можна продемонструвати на прикладі вимірювання часу розповсюдження УЗК в декількох точках ВНП. Для проведення вимірювань використовувався дефектоскоп загального призначення Einstein II з перетворювачем Modsonic k5k в режимі луна-методу. Налаштування дефектоскопу для роботи проводилось по зразку СО-2. Перетворювач встановлювався якомога точніше у ті ж точки, через які вже було визначено базу прозвучування штангенциркулем і незначним чином (без зсуву із точки вимірювання) «перекочувався» по поверхні. Результати вимірювань (лише для декількох точок в першому перерізі ВНП) представлені в табл.1.

Як видно з табл.1 в точках 1 та 22 досить складно судити, яка з виміряних часових затримок розповсюдження УЗК в ОК є найбільш відповідною виміряній базі прозвучування, адже амплітуди прийнятих сигналів в обох напрямкам відрізняються незначним чином. Отже визначати часовий зсув між сигналами по максимуму амплітуди прийнятого сигналу при такій схемі проведення контролю не є доречним. Тим паче, амплітуда прийнятого сигналу залежить не лише від геометрії та фізико-механічних характеристик ОК, але й від якості акустичного контакту.

Якщо прийняти невірне рішення в наведених прикладах (в точці 1 або 22), то, наприклад, в точці 1 значення похибки вимірювання часової затримки між випроміненим та прийнятим сигналами складе 0,3мкс.

Невідома швидкість в ОК (для луна-методу) визначається за формулою (1). Розрахуємо похибку визначення швидкості УЗК, що виникне в разі прийняття неправильного рішення (вважатимемо, що поправка $\Delta T = 0$):

$$\Delta C = \left|C_{1x} - C_{1x}\right| = \left|\frac{2H_б}{T_{1x}} - \frac{2H_б}{T_{2x}}\right| = \left|\frac{2H_б \Delta T_{12}}{T_{1x} T_{2x}}\right|, \quad (3)$$

де $H_б$ – визначений штангенциркулем розмір бази прозвучування.

Так, підставивши дані із табл.1 в формулу (3), отримаємо, що в точці 1 величина ΔC дорівнюватиме 38м/с, а в точці 22 ΔC=26м/с.

Загалом швидкість розповсюдження в ізоляторі залежить не тільки від наявності або відсутності ВМІП в об'ємі ізолятора, але також від хімічного і кількісного складу сировини, що використовувалась для виготовлення ізолятора, часових та температурних режимів обпалу порцеляни тощо. Оцінка критичних параметрів контролю визначається виключно в межах однієї партії виготовлених ОСІ. Для іншої партії необхідно визначати свої критичні значення.

Швидкість розповсюдження УЗК у ВНП та ННП може відрізнятись в кожному окремому ізоляторі. Так середнє значення швидкості УЗК у ВНП при проведенні дослідження на ізоляторі ИОС-110-400 при відсутності дефекту типу ВМІП склало 5555м/с, а у ННП – 5563м/с.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу можна сформулювати наступні рекомендації, що дозволять суттєво зменшити вплив деяких перерахованих вище факторів на точність визначення швидкості УЗК в ізоляторі:

Таблиця 1 - Результати прозву чування ОСІ за допомогою дефектоскопа Einstein з перетворювачем Modsonic k5k

	№ точки									
	1		2		5		7		22	
База вимірювання (по штангенциркулю), мм	120,2		120,2		118,2		117,3		118,6	
Часова затримка між випроміненим та прийнятим сигналами, мкс	43,3	43	43,3	43	42,6	42,3	42,3	42	42,8	42,6
Амплітуда прийнятого сигналу, відн. од.	8	9	5	9,5	4	9	9	4	8	6

1) необхідно розробити таку систему контролю та методику вимірювань, яка б забезпечувала постійну рівність акустичного тракту (за яким визначається часовий зсув) тракту та просторового розміру (за яким визначається геометрична відстань бази прозвучування) розміру;

2) забезпечити умови паралельності осі акустичного тракту паралельною осі, по якій визначається геометричний розмір;

3) система контролю повинна автоматично вимірювати геометричний розмір бази прозвучування з метою виключення суб'єктивної похибки;

4) для проведення контролю використовувати спеціальні перетворювачі, наприклад, ультразвукові концентратори з точковою контактною поверхнею. Концентратори з сухим точковим контактом не потребують використання мастила для забезпечення акустичного контакту. При цьому концентратори повинні забезпечувати фазове, а не геометричне, фокусування УЗК в точці контакту, щоб не відбувалось «розпливання» сигналу в часі;

5) використовувати тіньовий метод проходження УЗК в ОК, для чого необхідно розробити спеціальні пристосування змінної довжини для співвісного кріплення випромінюючого та приймаючого перетворювачів;

6) всі контрольно-вимірювальні операції повинен виконувати один оператор;

7) вести температурну корекцію для урахування залежності швидкості УЗК від температури навколишнього середовища.

1. Кухтиков В.А. Методы и средства контроля механического состояния опорно-стержневой фарфоровой изоляции высоковольтных разъединителей в условиях эксплуатации / В.А. Кухтиков, В.Э. Воротницкий, А.Н. Демин // Энергетик. – М. – 2002. – №8, – С.15-20. 2. Кухтиков В.А. Методические указания по контролю механического состояния фарфоровых опорно-стержневых изоляторов разъединителей 110 кВ и выше и фарфоровых покрышек высоковольтных воздушных и масляных выключателей в условиях эксплуатации / В.А. Кухтиков, В.Э. Воротницкий, А.А. Шейкин – (Утверждено ОАО "ФСК ЕЭС" 31.12.2004 года и согласовано с РАО "ЕЭС России"). 3. Изоляторы керамические опорные на напряжение свыше 1000В. Общие технические условия : ГОСТ Р 52034 : 2003.

Поступила в редакцію 25.11.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Костишин В.С.