

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Бойка Антона Миколайовича

**«Діагностика полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів під дією
сильного електричного поля за трибоелектричним потенціалом»,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних
полів**

Актуальність теми

Силові і контрольні кабелі відіграють важливу роль в забезпеченні надійної роботи енергоблоків ТЕС, ГЕС і АЕС. Так, наприклад, існуючі методи оцінки стану кабелів АЕС засновані на руйнівних методах випробувань, які включають відбір зразків для лабораторних випробувань з наступним поданням високої випробувальної напруги, вимірювання опору ізоляції та діелектричних втрат. Такі методи випробувань дають лише локальну оцінку стану кабелів в електричній мережі. Крім цього, випробування високою напругою часто призводять до погіршення якості полімерної ізоляції, оскільки в ній під час випробувань можуть утворитися додаткові дефекти і з'являються в значних кількостях об'ємні заряди.

Необхідне створення принципово нових методів випробувань кабелів стосовно експлуатаційних умов, для чого потрібні глибокі дослідження поведінки ізоляції в електричному полі, виявлення нових показників старіння, на базі яких можуть бути розроблені більш ефективні методи випробувань і критерії оцінки стану ізоляції в експлуатації. Таким чином, дисертація «Діагностика полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів під дією сильного електричного поля за трибоелектричним потенціалом» є актуальною.

Актуальність теми підтверджується тим, що вона виконувалась в межах науково-дослідної тематики кафедри електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» відповідно до завдань госпдоговірних робіт з Харківською філією

«Інженерно-технічний центр "КОРО" органу з оцінки відповідності Сертатом з обстеження технічного стану та продовження строку експлуатації кабелів енергоблоків атомних електричних станцій в лабораторних умовах, які знаходились в експлуатації під дією сильного електричного поля протягом 25 років.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Бойка А. М., визначається тісним зв'язком експериментальних і теоретичних досліджень, використанням сучасних методів дослідження, порівняння і аналізу отриманих результатів. Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату, фізичних явищ, які мають місце при старінні полімерної ізоляції кабелів при дії сильного електричного поля. Теоретичне обґрунтування контактної різниці потенціалу на основі фізики процесу за наявності контакту (тертя) двох діелектриків знайшло підтвердження в численних експериментальних обстеженнях значної кількості зразків кабелів різних типів та конструкцій, з різними матеріалами та умовами експлуатації. Теоретичні розробки дозволили обґрунтувати систему діагностики полімерної ізоляції за трибоелектричним потенціалом.

Наукові положення, висновки і рекомендації сформульовані у роботі на підставі цілого комплексу тривалих експериментальних досліджень, які включали дослідження зразків силових кабелів з полімерною ізоляцією, відібраних з енергоблоків після 20 – 25-річної експлуатації в умовах сильного електричного поля, у вихідному стані та додаткове теплове та радіаційне старіння зразків, еквівалентне подальшій нормальній експлуатації протягом 10 – 12 років.

Достовірність результатів досліджень

Достовірність результатів дисертаційного дослідження ґрунтується на застосуванні комплексного підходу до розв'язання теоретичних і експериментальних задач, коректністю постановки математичної задачі та

адекватністю розрахунків напруженості електричного поля в системі двох ізолюваних жил за наявності окисненого прошарку на поверхні полімерної ізоляції у відповідності до експериментальних даних, взаємоузгодженістю розрахункових і експериментальних значень критичної напруженості поля. Динаміка зміни контактної різниці потенціалу в процесі старіння кабелів в залежності від застосованих матеріалів та конструктивного виконання узгоджується з результатами вимірів діелектричних параметрів. Наукові результати здобувача використані під час обстеження кабелів АЕС та оцінювання ступеню старіння полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів.

Наукова новизна отриманих результатів

На основі проведеної автором роботи з діагностики полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів було отримано низку нових наукових результатів:

– вперше на основі застосування схеми заміщення двошарової ізоляції за допомогою введеного параметру, який дорівнює добутку струму на час заряджання, встановлено появу додаткових струмів під дією сильного електричного поля, що змінюються за експоненціальним законом, та показано динаміку зміни в часі процесу накопичення, рекомбінації та релаксації поверхневого заряду на границі розділу двох діелектриків, один з яких зістарений більшою мірою;

– вперше на основі отриманого аналітичного рішення визначено розподіл густини поверхневого заряду та падіння напруги по довжині симетричних ізолюваних провідників за наявності між ними повітряного зазору та тонкого дефектного шару на поверхні полімерної ізоляції;

– вперше на основі експериментальних досліджень визначено значення трибоелектричного потенціалу та встановлена динаміка зміни контактної різниці потенціалу в процесі прискореного терморадіаційного старіння полімерної ізоляції в залежності від конструктивного виконання і застосованих матеріалів кабелів (захищено патентом України на корисну модель №83470);

– вперше встановлено вплив поверхневих зарядів та трибозарядів на результати діагностичних обстежень за опором ізоляції за високої напруги та

стабільність під час вимірювань ємності і тангенсу кута діелектричних втрат кабелів з полімерною ізоляцією;

– вперше запропонована з обґрунтуванням та технічним забезпеченням система діагностики поверхневих властивостей полімерної ізоляції за трибоелектричним потенціалом, який пов'язано з накопиченням трибозарядів в процесі старіння силових, контрольних та інформаційних кабелів під дією сильного електричного поля, температури та радіації.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Запропоновані здобувачем рекомендації дозволили зменшити вплив поверхневих зарядів на результати вимірювань опору ізоляції, ємності та тангенсу кута діелектричних втрат під час діагностичних обстежень силових кабелів АЕС. Практичною значимістю теоретичних та експериментальних досліджень є обґрунтування моменту початку вимірювань, який пов'язано зі зменшенням впливу поверхневих та трибозарядів на вимірювані діелектричні параметри.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 050701 – техніка та електрофізика високих напруг.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення та результати дисертаційної роботи досить повно опубліковані в 17 наукових працях, у тому числі 9 статей у фахових виданнях України, з яких 6 – у наукометричних базах, 1 патент України на корисну модель, 6 – у матеріалах конференцій. Апробація роботи відбулася на 9 науково-технічних конференціях, міжнародних симпозіумах, міжнародній конференції та науково-практичному семінарі. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Бойка А. М. складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків.

Автореферат ідентичний за змістом основним положенням дисертації і достатньо повно відбиває її основні наукові результати, отримані здобувачем.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено напрям дисертаційних досліджень, сформульовано мету та задачі досліджень, означено об'єкт та методи дослідження, розкрито наукову новизну, охарактеризовано практичне значення одержаних результатів роботи, встановлено особистий вклад здобувача, наведено апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

У першому розділі детально проаналізовано науково-технічну інформацію щодо причин появи, виявлення та спостереження просторових зарядів в зразках полімерної ізоляції та силових кабелях високої напруги. Показано, що в процесі старіння просторовий заряд накопичується на границях розділу, що призводить до зміни властивостей саме поверхні полімерної ізоляції. На підставі проведеного аналізу сформульовані завдання, виконувані в дисертаційній роботі. Обґрунтовано доцільність у визначенні розподілу поверхневої густини зарядів в умовах нещільного контакту двох діелектриків в процесі старіння полімерної ізоляції. Умотивовано необхідність експериментального визначення значень трибоелектричного потенціалу, аналізу динаміки його зміни в процесі старіння кабелів та обґрунтуванні системи діагностики полімерної ізоляції за трибоелектричним потенціалом.

Другий розділ присвячено математичному моделюванню процесу накопичення поверхневого заряду на границі розділу двох діелектриків. *Перш за все, на основі теорії Максвелла – Вагнера* встановлено зміну в часі напруженості електричного поля та поверхневої щільності зарядів на границі розділу двох пласких ізотропних діелектриків з електродами під час прикладання постійної високої напруги. Показано, що накопичення

поверхневого заряду спотворює електричне поле в порівнянні з випадком ідентичності електрофізичних властивостей двошарової ізоляції.

На основі моделювання із застосуванням схеми заміщення двошарової ізоляції встановлено, що в міру старіння ізоляції з'являються складові струму, які змінюються за експоненціальним законом (рис. 2.10, стор. 52), що свідчить про зростання поверхневих зарядів на границі розділу діелектриків. За допомогою введеного параметру, який дорівнює добутку струму на час заряджання, показана динаміка зміни в часі процесу накопичення, рекомбінації та релаксації поверхневого заряду (рис. 2.11, стор. 53) на границі розділу двох діелектриків, один з яких зістарений більшою мірою.

На основі отриманого аналітичного розв'язку представлено розподіл густини поверхневих зарядів по довжині симетричних ізольованих провідників за наявності між ними повітряного зазору товщиною 250 мкм та тонкого дефектного шару на поверхні поліетиленової зшитої ізоляції товщиною 10 мкм при потенціалі на жилах ± 3 кВ. Наявність на поверхні зшитої поліетиленової ізоляції окисненого прошарку призводить до появи сильного електричного поля, в умовах якого спостерігається нелінійна залежність струму провідності від прикладеної постійної напруги. Зростання напруги електричного поля до (6 – 10) кВ/мм в процесі старіння кабелів середньої напруги цілком узгоджуються з даними, наведеними в аналітичному огляді для силових кабелів високої та надвисокої напруги (розділ 1, стор. 35, таблиця 1.3) та результатами вимірювань (розділ 2, рис. 2.21, рис. 2.22). Встановлено, що поверхнева густина зарядів та падіння напруги на границях розділу змінюються нерівномірно вздовж осі симетрії. Значення напруги змінюються в діапазоні від частки мВ до одиниць Вольт в залежності від діелектричної проникності окисненого прошарку. Розрахункові дані добре узгоджуються з результатами вимірювань, що дає можливість виявлення дефектних поверхневих прошарків за результатами вимірювань контактної різниці потенціалів провідників силових, контрольних кабелів та симетричних кабелів зв'язку, які контактують між собою.

У третьому розділі доведено, що трибоелектричний потенціал, який виникає внаслідок постійного контакту (тертя) струмопровідних жил відносно полімерної ізоляції по всій довжині кабелю, ізоляції відносно металевих екранів, ізолюваних провідників один відносно одного, призводить до процесу статичної електризації, в результаті чого на границях розділу накопичуються трибозаряди та виникає стрибок потенціалу – контактна різниця потенціалу (трибоелектричний потенціал). На основі чисельних експериментальних досліджень показано, що трибоелектричний потенціал є структурово- та конструктивно-чутливим параметром і може бути використаний як показник стану поверхні полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів. Обґрунтовано динаміку зміни контактної різниці потенціалу результатами вимірів ємності та тангенсу кута діелектричних втрат в процесі старіння в залежності від застосованих матеріалів та конструктивного виконання силових кабелів.

Четвертий розділ присвячено обґрунтуванню та забезпеченню технологічних показників системи діагностики поверхневих властивостей полімерної ізоляції кабелів за трибоелектричним потенціалом. Експериментально встановлено, що для екранованих кабелів та кабелів з металевими оболонками є можливим проведення діагностики за трибоелектричним потенціалом без екранувальної заземленої камери. Полярність підключення жили та екрану до двох клем приладу впливає на знак та характер часових залежностей контактної різниці потенціалу. Показано, що електростатичний вольтметр завдяки високій чутливості вимірює як індивідуальні шуми кабелю, обумовлені трибоелектризацією, так і сторонні. В умовах довготривалих діагностичних обстежень проявляється шум Джонсона – Найквіста, що обмежує час спостереження часових залежностей контактної різниці потенціалу. Акцентовано, що обстеження повинні виконуватись за однакової температури. В іншому випадку в провідниках є можливим виникнення внутрішніх теплових шумів. Показано, що фільтрація результатів часових рядів трибоелектричного потенціалу зразка силового кабелю зі зшитою поліетиленовою ізоляцією на

напругу 6 кВ під час обстеження електростатичним вольтметром та цифровим мультиметром призвела до суттєвого зростання коефіцієнту парної кореляції (до 0,89), що уможливило застосування для діагностики доступних цифрових мультиметрів з передаванням результатів спостережень оптичним інтерфейсом до пам'яті комп'ютера.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані досить послідовно, аргументовано і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації, складається із 135 найменувань.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та досить повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

Зауваження щодо дисертаційної роботи

1. У схемі заміщення двошарової ізоляції і відповідної дискретної моделі не вказано, як задавалися цифрові значення параметрів моделі під час розрахунків: R_1 , R_2 , R_{11} , R_{22} , C_{11} , C_{22} , E_{c11} , E_{c22} . Як задавали радіус R_{qm} ? В середині товщини прошарку H_1 або на його межах? Якої величини був часовий крок ітерації при розрахунках динаміки накопичення поверхневого заряду?

2. Не роз'яснено спосіб віднімання першої компоненти струму абсорбції від загального струму.

3. У розділі 2 розглядається плоска двовимірна задача визначення густини зарядів в кабелі з ядром інтегрального рівняння, записаним у вигляді

$$\frac{\cos(r, n)}{r}.$$

Воно вказує на те, що інтеграл по поверхні переходять у контурні. Про який тоді розподіл густини зарядів по довжині симетричних кабелів йде мова? Густина зарядів по довжині кабелю повинна бути постійною.

4. Для поверхневої густини електростатичних зарядів на границі розділу діелектриків в системі двох симетричних лінійних зарядів отримано

аналітичне рішення (розділ 2, формула 2.40, стор. 66) на основі методу інтегральних рівнянь Фредгольма першого та другого роду із застосуванням інтегрального перетворення Фур'є. Класичним перетворенням інтегральних рівнянь в алгебраїчну форму є застосування перетворення Лапласа, яке є лінійним перетворенням. А яким є інтегральне перетворення Фур'є? Які його властивості? Цього, на жаль, в дисертаційній роботі не зазначено.

5. Незрозуміло, як реалізовано вимірювання струму провідності зразків силових кабелів напругою 10 кВ під час діагностичних обстежень в умовах експлуатації за постійної випробувальної напруги до 40 кВ (розділ 2, стор. 72)?

6. Якщо ознакою старіння ізоляції є також накопичування на поверхні полімерної ізоляції продуктів його розпаду, то чи не доцільніше було б виконати також і вимірювання поверхневого опору ізоляції, також оцінити ступінь окислення поверхонь, наприклад, за наявністю карбонільних груп – основної ознаки окислення поліетилену.

7. Порівняння часових рядів трибоелектричного потенціалу в початковому стані та після прискореного старіння за розмахом значень потенціалу має якісний (розділ 3, рис. 3.20, рис. 3.23, рис. 3.25), а не кількісний характер. Аналіз часових рядів при цьому носить ознаки нечітких множин, для якого слід було б застосувати апарат нечіткої логіки.

8. Основні результати отримані здобувачем на коротких зразках кабелів в лабораторних умовах. В умовах експлуатації вплив зовнішніх факторів, несуттєвих для коротких відрізків, може стати значущим для кабелів значної довжини. Як врахувати, наприклад, різні температури окремих частин кабелю?

9. Трибозаряди безпосередньо пов'язані з поверхнею ізоляції, а значення трибоелектричного потенціалу залежить від поверхневих властивостей, тобто шорсткості (нерівностей) поверхні в результаті окиснення полімерної ізоляції (розділ 4, рис. 4.3, рис. 4.4). Розміри нерівностей, як зазначено в розділі 3, стор. 81, звичайно не перевищують 3 - 50 мкм. Слід було зв'язати результати вимірювань трибоелектричного

потенціалу з середнім розміром нерівностей в початковому стані та після старіння. Це дало б можливість отримати критерій ступеню зістареності поверхні, а значить і самої полімерної ізоляції.

10. Є також зауваження щодо оформлення дисертації:

– в представленому на відгук екземплярі дисертації відсутній аркуш 13;

– стор. 67. На рис. 2.17 не зазначено розмірності досліджуваних величин;

– стор. 68 і 71. По осі абсцис на графіках рис. 2.18 і 2.20 наведено позначення у вигляді незрозумілої аббревіатури SDL, m, при цьому на графіку «б» $SDL = 0,16 \text{ m}$, а на графіку «а» $SDL = 1000 \text{ m}$ за порівнянних розмірів кабелю;

– стор. 73. У вираженні 2.41 для обчислення ємності допущено помилку, очевидно, під час комп'ютерного набору формули для вставлення у текст;

– стор. 77. Назву розділу 2.5 «Висновки по розділу» потрібно було перенести з кінця стор. 77 на початок стор. 78;

– стор. 80. На 5-му рядку знизу тексту у вислові «сталою ізоляції» в середині пропущено слово «часу»;

– стор. 86. На стор. 86 наведено таблицю 3.1 без зазначення посилання на літературу;

– стор. 89. Вираз «насиченость повіву» слід було б замінити на «густина обплетення»;

– стор. 93 – 96. Наведені на стор. 93 – 96 рис. 3.6, 3.8, 3.9 виконані абсолютно нерозбірливо, крім цього, два різних графіки пронумеровані однаково як рис. 3.9;

– стор. 101. Написано «порівняйте рис. 3.12, крива 2 і рис. 3.15, б»; допущено помилку, тому що потрібно порівнювати з даними рис. 3.16;

– стор. 72. Немає достатнього роз'яснення значення графіків на рис. 2.22;

– стор. 87. У розділі 3.2 «Експериментальне визначення трибоелектричного потенціалу в інформаційних кабелях» дуже стисло

описано методику досліджень, також відсутня електрична схема вимірювань трибоелектричного потенціалу;

– стор. 97. У розділі 3.3, як і в розділі 3.2, не досить добре викладено методику дослідження, не наведено електричної схеми вимірювань;

– стор. 100. Вираз 3.3 представляє не комплексну діелектричну проникність, а комплексну провідність діелектрика;

– стор. 106. Незрозуміла рекомендація для порівняння рис. 3.29, а і 3.20, б;

– стор. 134. Посилання на рис. 2.22 не стосується розглянутого в розділі 4.3 питання.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Бойка Антона Миколайовича «Діагностика полімерної ізоляції в процесі старіння кабелів під дією сильного електричного поля за трибоелектричним потенціалом» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. Дисертація є завершеною науковою роботою, яка розв'язує важливе науково-практичне завдання щодо розробки діагностики процесів старіння полімерної ізоляції кабелів під дією сильного електричного поля, що ґрунтується на вимірюваннях трибоелектричного потенціалу. Дисертаційна робота повністю відповідає п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Бойко Антон Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів.

Офіційний опонент

заступник директора з наукової роботи

ТОВ «Виробниче об'єднання Слов'янський завод

високовольтних ізоляторів»,

доктор технічних наук, професор

12.02.2016



Шумілов Ю. М.