

УДК 614.2

С. В. Рудаков, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8263-0476)

О. В. Миргород, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-5989-3435)

І. М. Грицина, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2581-1614)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ШЛЯХОМ КОНТРОЛЮ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ БАГАТОЖИЛЬНИХ КАБЕЛІВ

Розроблено метод вимірювання часткових ємностей і тангенсу кута діелектричних втрат окремих компонентів кабельних виробів, які знаходяться в експлуатації на енергетичних об'єктах. Цей метод ґрунтується на проведенні прямих вимірювань компонентів ізоляції окремо з подальшою оцінкою всієї конструкції в цілому. Цей метод дає можливість оцінити більш детально стан ізоляції кабелів, так як жили, екрани, металеві оболонки використовуються в якості електродів – для локалізації зондуючого електромагнітного поля в визначених частинах кабелю: переважно в фазній та пояській ізоляції силових кабелів, в ізоляції жил або в меж фазному просторі контрольних кабелів. Тоді, порівнюючи характеристики виокремлених областей ізоляції між собою та з базовими виробами, які пройшли прискорені ресурсні випробування, аж до досягнення граничного стану, робимо обґрунтований висновок о поточному стані кабельного виробу. Значення часткових ємностей ізоляції жил кабелю повинно бути приблизно одного порядку, якщо значення суттєво різняться, то стан ізоляції наближається до критичного, що може призвести до виникнення надзвичайної ситуації. В роботі запропонований спосіб зменшення похибки вимірювань, який обмежує область використання прямої схеми тільки в тих випадках, коли ємність вимірюваного проміжку набагато вище, ніж ємність паразитних ланцюгів. Дослідження на постійному струмі виконується приладами з трьома клемми: дві – вимірювальні, третя – екрануюча – для відводу від вимірювального ланцюга зайвого струму. Ізоляційний проміжок під'єднується до вимірювальних клем, а всі інші жили кабелю та екрани – до екрануючої клемми приладу. В роботі запропонована схема вимірювань, застосування якої дозволило зменшити шунтуючі ємності на 1000 пФ. Результати такого контролю дозволять виявити області параметрів, найбільш чутливі до процесів старіння кабелів, що призведе, у свою чергу, до запобігання надзвичайним ситуаціям, які могли б виникнути на об'єктах енергетики.

Ключові слова: ізоляція кабелю, тангенс кута діелектричних втрат, опір ізоляції, часткова ємність, вимірювальний проміжок ізоляції

1. Вступ

Надійність енергопостачання – це безпечна експлуатація атомної станції (АС). Ці поняття на АС адекватні і тотожні. Збільшення одиничної потужності енергоблоків супроводжується збільшенням потужності живлючих трансформаторів, приводних механізмів, розосередженням обладнання, збільшенням довжини кабельних мереж. Все це призводить до збільшення ємнісних провідностей всій мережі, що, безумовно, ускладнює процеси, супроводжувані однофазними замиканнями на землю. Якщо говорити про надійність роботи атомної станції, а також попередження надзвичайної ситуації, то необхідно своєчасно і достовірно проводити контроль стану кабельних виробів.

Дослідження механізмів старіння ізоляційних матеріалів в лабораторних умовах і отримані результати старіння кабелів в умовах експлуатації стали основою для розробки методів неруйнівної діагностики стану і заходів з управління терміном служби кабелів на атомних станціях.

Якщо врахувати, що кожна четверта аварія на об'єктах з високою концентрацією електричних кабелів виникає внаслідок несправності в системі електропостачання, стає вочевидь необхідність поглибленого аналізу причин виникнення таких аварій с метою прийняття технічних мір по їх недопущенню та, відповідно, проведення

неруйнівного контролю кабельних трас. Тому, актуальною проблемою є забезпечення безпечної експлуатації кабельних ліній та подовження строку їх служби.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В силових кабелях, що знаходяться в експлуатації на атомних електростанціях (АЕС), контроль характеристик (часткової ємності, кута діелектричних втрат) кожної з компонент (поліетилен, ПВХ-пластикат) ізоляції окремо неможливий. Отримані експериментальним шляхом [1] дані показали, що наявність незначного старіння полівінілхлоридної ізоляції може привести до відмови кабелів виконувати свої функції. Силові кабелі містять ряд ізоляційних компонентів (наприклад: фазна ізоляція, поясна ізоляція, внутрішня оболонка, зовнішня оболонка, міжфазне заповнення), старіння яких носить індивідуальний характер. Завдання досягнення рівномірного старіння всіх компонентів конструкції кабелю поки навіть не ставиться.

Тому, виявлення найбільш слабкої ланки представляється перспективним способом неруйнівної діагностики ізоляції. В роботі [2] була спроба виявити таку ланку за допомогою сукупного методу вимірювання, але похибка при обробці результатів була суттєвою. Тому необхідна інформація про параметри ізоляції кожного проводу окремо. Для цього необхідно вибрати таку комутацію проводів, щоб електричне поле в основному зосереджувалась навколо ізоляції контрольованого проводу.

В [3] був розглянутий вибір схем вимірювань, при яких часткові ємності увімкнені тільки паралельно, що в свою чергу, приводить до систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Але не враховано, що якщо СЛАР є погано обумовленими, то їх матриці близькі до вироджених. Це вносить значні похибки на етапі обробки, які необхідно врахувати.

Ізоляція багатожильного кабелю являє собою складну систему, що складається з безлічі компонентів. Елементи конструкції кабелю знаходяться в різних умовах і старіють по-різному. Виявлення відмінностей у властивостях компонентів ізоляції кабелів (наприклад, фазної і поясної ізоляції силових кабелів, ізоляції жив і міжфазного простору – контрольних кабелів), дозволяє оцінити ступінь старіння кабелів [4].

В [5] показано, що спільними ознаками процесів старіння ізоляції конструктивних елементів кабелів, які можуть спостерігатися при постійному контролі й діагностиці в експлуатації, є: зниження опору ізоляції (або зростання струмів витoku під час випробувань постійною напругою); зміна ємності і тангенсу кута діелектричних втрат; зростання коефіцієнта абсорбції і рівня часткових розрядів; поява локальних неоднорідностей.

В зв'язку з вище зазначеним, невирішеною частиною розглянутої проблеми є розробка методу вимірювання часткових ємностей і тангенсу кута діелектричних втрат окремих компонентів кабельних виробів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є запобігання надзвичайним ситуаціям на енергетичних об'єктах шляхом розробки методу неруйнівного контролю багатожильних кабелів, який дозволить виконати вибіркові обстеження ізоляційних проміжків, які найбільш важливі з точки зору оцінки їх технічного стану.

Для досягнення поставленої задачі передбачено вирішення таких завдань:

– розробити такий метод неруйнівного контролю стану ізоляції кабелів, при якому можливо оцінити викривлені результати обстеження багатожильних кабелів

при застосуванні ємнісних та індуктивних мостів та довести доцільність визначення початкової стадії старіння та пошкодження ізоляції за допомогою змінної напруги;

– дослідити стан ізоляції багатожильних кабелів та зменшити вплив ємнісних струмів на результат вимірювання шляхом використання прямої схеми тільки такими випадками, коли ємність вимірюваного проміжку превалює над ємностями паразитних ланцюгів.

4. Розробка методу контролю компонентів ізоляції кабелів за параметрами часткових ємностей

Своєчасне виявлене відхилення значень параметрів ізоляції окремого контрольного кабелю від нормативних, допомагає спрогнозувати старіння ізоляції інших кабелів, що знаходяться в однакових умовах експлуатації, що сприяє запобіганню надзвичайних ситуацій.

Традиційні показники технічного стану багатожильних кабелів, які визначаються на постійній напрузі (опір ізоляції, витримується випробувальну напругу), малочутливі до початкових стадій старіння ізоляції і пошкоджень захисних оболонок кабелів. За параметрами ємності і тангенса кута діелектричних втрат можна вести контроль процесів старіння ізоляції кабелів.

В багатожильних кабелях є ряд ізоляційних проміжків типу «жила-жила» або «жила-екран», за якими можна зробити ряд обґрунтованих висновків щодо стану ізоляції жив і захисних оболонок кабелів.

Здавалося б, що для цього достатньо використовувати прилади, що мають три виводи: два вимірювальні, третій – екранує. Клеми обстежуваного проміжку підключаються до вимірювальних виводів, а всі інші клеми кабелю (жили, екрани) – до екрануючого виводу приладу – так звана пряма схема вимірювання параметрів часткових ємностей.

Тоді заважаючі ємнісні струми всіх проміжків, крім виокремленого, відводяться повз вимірювальної частини приладу. В результаті вимірюються параметри саме виокремленого проміжку – часткової ємності і тангенса кута діелектричних втрат між обраними клемми. Однак, похибки вимірювань часткової ємності, а особливо тангенса кута діелектричних втрат, можуть бути настільки великими, що обстеження втрачає будь-який сенс. Причиною цього є ємнісні струми паразитних ланцюгів, що відводяться на екран приладу. Для зменшення їх впливу можна обмежити область використання прямої схеми тільки такими випадками, коли ємність вимірюваного проміжку превалює над ємностями паразитних ланцюгів. При цьому частина ізоляційних проміжків кабелю залишається обстеженою, а саме параметри цих проміжків найсильніше залежать від наявності в кабелі низькомолекулярних домішок – продуктів розкладання полімерної ізоляції в результаті термоокислювальних або радіолітичних процесів старіння.

Розглянемо методи контролю окремих компонентів ізоляції за параметрами часткових ємностей і тангенсу кута діелектричних втрат; проведемо аналіз причин впливу ємнісних струмів паразитних ланцюгів на результати вимірювань параметрів ізоляційних проміжків багатожильних кабелів і дамо рекомендації по усуненню такого впливу. Можливість оцінки стану ізоляції кабелів в значній мірі полегшується, тому що жили, екрани, металеві оболонки використовуються в якості електродів – для локалізації зондуючого поля в певних частинах кабелю: переважно в фазній або поясній ізоляції силових кабелів, в ізоляції жив або в міжфазному просторі контрольних кабелів.

Тоді, порівнюючи характеристики виокремлених областей ізоляції – між собою і з базовими виробами, які пройшли прискорені ресурсні випробування аж до досягнення граничного стану - можна зробити обґрунтований висновок про поточний стан кабелю.

Для 3-х жильного кабелю число ізоляційних проміжків дорівнює 3, для 4-х жильного – 6, для 5-жильного – 10, а для 27-жильного – 351. Число ізоляційних проміжків N зростає пропорційно квадрату числа жил $N \approx \frac{n^2}{2}$. Відповідно зростає і трудомісткість дослідження багатожильного кабелю.

В ідеалі потрібно знати властивості (такі як ємність, тангенс кута діелектричних втрат, опір ізоляції, рівень відновлюється напруга або абсорбційні характеристики) усіх ізоляційних проміжків. У початковому стані властивості фазної і поясної ізоляції, як правило, однакові. У процесі ж експлуатації починають з'являтися відмінності, спостереження за якими і може служити основою неруйнівною контролю процесів старіння (моніторингу) силових кабелів [6–8].

Для контрольних кабелів, число жив яких досягає декількох десятків, повне обстеження можливо тільки в лабораторних умовах. В експлуатації же доводиться обмежуватися вибірковими дослідженнями або сукупними вимірами, коли контролюються параметри декількох ізоляційних проміжків, включених паралельно.

5. Дослідження ізоляції багатожильних кабелів вимірювачем імітансу

Дослідження на постійному струмі виконуються приладами з 3-ма клемми: дві – вимірювальні, третя – екрануюча – для відводу від вимірювального ланцюга заважають струмів. Такими приладами, зокрема, є тераомметри, екрануюча клемма яких використовується зазвичай для відводу на землю струмів поверхневої провідності.

При вимірюваннях на змінному струмі використовуються 5-ти клемні прилади, вимірювальні ланцюги яких виконані роздільними – дві струмові і дві потенційні, що дозволяє виключити вплив на результати вимірювань сполучних проводів. Між багатожильним кабелем і вимірювальним приладом ставиться багатоканальний комутатор, за допомогою якого кожна жила кабелю може підключатися або до однієї, або до іншої клемми приладу, або – заземлюватися.

Розглянемо метод прямих вимірювань властивостей ізоляційних проміжків. Для цього проміжок підключається до вимірювальних клем, а всі інші жили кабелю і екрани – до екрануючої клемми приладу. Вважається, що заважають струми всіх проміжків будуть відводитися повз вимірювального ланцюга і не вплинуть на результати вимірювань обраного проміжку. При всій очевидності такої схеми в разі обстеження кабелів вона не завжди виявляється працездатною [9–10]. Причина в тому, що струми обраного проміжку часто виявляються багато менше струмів шунтуючих ланцюгів.

Останні ж навантажують прилад настільки, що результати вимірювань виявляються сильно спотвореними. Тому від використання екрануючого проводу в цих ситуаціях доводиться відмовлятися. Тоді прилад перетворюється в 2-х клемний, і вимірювання виконуються в сукупності – вибраного ланцюга і ряду паралельно включених шунтуючих ланцюгів.

Метод прямого вимірювання параметрів ізоляційних проміжків багатожильних кабелів реалізується за допомогою приладів, що містять 3 клемми (на постійному струмі) або 5 клем (на змінному струмі), одна з яких служить для відводу заважаючих струмів повз вимірювального ланцюга на корпус (заземлення) [10–11].

Нехай клеми 1 і 2 вимірювача підключаються до вимірюваної ємності C_{12} між двома довільними виводами (1 і 2) конструкції, а третя – екрануюча – до спільної точки (Є) з'єднання всіх інших висновків. Між виводами 1, 2 і Є утворюється трикутник ємностей, в якому C_1 і C_2 є паразитні ємності виводів 1 і 2 конструкції по відношенню до загальної точки Є (рис. 1).

Якщо $C_{12} \gg C_1, C_2$, то вимірювання ємності C_{12} будуть достовірними. Така ситуація зазвичай має місце при обстеженні зосереджених ємностей, коли роль C_1, C_2 виконують паразитні ємності на корпус. Коректними в цьому випадку будуть і вимірювання тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_{12}$, пов'язаного з розсіюванням енергії в ємності C_{12} .

Якщо ємності C_{12} і C_1, C_2 – одного порядку (як це зазвичай має місце при обстеженні розподілених ємностей кабелів), то результати вимірювань C_{12} можуть бути помилковими – як по ємності, так і за величиною $\text{tg}\delta_{12}$.

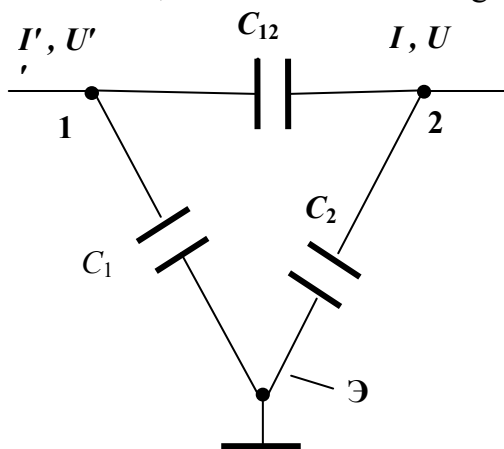


Рис. 1. Трикутник ємностей об'єкту контролю: C_{12} – вимірююча; C_1, C_2 – шунтуючі ємності

До параметрів шунтуючих ланцюгів вимірників C і $\text{tg}\delta$ є ряд обмежень. Так, для нормальної роботи вимірювача імітанса Е7-14 потрібно, щоб повні опори Z_1, Z_2 шунтуючих ланцюгів задовольняли нерівності:

- а) $Z_1 \geq (100; 10 \text{ или } 1) \text{ кОм}$ (в залежності від межі вимірювань);
- б) $Z_2 \geq 1 \text{ кОм}$ (на будь-якої межі вимірювань).

Клеми 1 и 2 вимірювача – не рівноцінні. Обмеження на допустимі опору Z_1 шунтуючих ланцюгів, що підключаються до першої клеми (позначається також символами I', U'), більш жорсткі.

Вимоги до трикутника ємностей рис.1, що впливають з умов (а і б), представлені в табл. 1.

Ціною деякої втрати точності вдається отримати в цілому правильні значення вимірюваних параметрів. В іншому випадку результати вимірювань можуть на 2–3 (!) порядку відрізнятись від справжніх, причому помилкові результати відтворюються з точністю 4–5 розрядів.

На рис. 2 а показані результати вимірювань сукупної погонної ємності багатожильного кабелю, а на рис. 2 б – тангенсів кутів діелектричних втрат. Стрибкоподібні зміни результатів вимірювань пов'язується саме з втратою стійкості приладу. Умови застосування методу прямих вимірювань представлені на рис. 3 у вигляді залежностей допустимих значень ємностей C_1, C_2 шунтуючих ланцюгів від величини вимірюваної погонної ємності C_{12} .

Табл. 1. Гранична величина шунтуючої ємності C_1 в залежності від вимірюваної ємності C_{12} (межі вимірювань)

Межа вимірювань	$Z_1 = \frac{1}{\omega C_1}$, кОм	Частота, кГц		
		0,1	1,0	10
1	≥ 100	$C_{12} = 0,1 - 1600$ пФ	$C_{12} = 0,01 - 160$ пФ	$C_{12} = 0,001 - 16$ пФ
		$C_1 \leq 16000$ пФ	$C_1 \leq 1600$ пФ	$C_1 \leq 160$ пФ
2	≥ 100	$C_{12} = 1 - 16000$ пФ	$C_{12} = 0,1 - 1600$ пФ	$C_{12} = 0,01 - 160$ пФ
		$C_1 \leq 16000$ пФ	$C_1 \leq 1600$ пФ	$C_1 \leq 160$ пФ
3	≥ 100	$C_{12} = 0,01 - 160$ нФ	$C_{12} = 0,001 - 16$ нФ	$C_{12} = 0,0001 - 1,6$ нФ
		$C_1 \leq 16$ нФ	$C_1 \leq 1,6$ нФ	$C_1 \leq 160$ пФ
4	≥ 10	$C_{12} = 0,1 - 1600$ нФ	$C_{12} = 0,01 - 160$ нФ	$C_{12} = 0,001 - 16$ нФ
		$C_1 \leq 160$ нФ	$C_1 \leq 16$ нФ	$C_1 \leq 1,6$ нФ
5	≥ 1	$C_{12} = 1 - 16000$ нФ	$C_{12} = 0,1 - 1600$ нФ	$C_{12} = 0,01 - 160$ нФ
		$C_1 \leq 1600$ нФ	$C_1 \leq 160$ нФ	$C_1 \leq 16$ нФ
6	≥ 1	$C_{12} = 16 - 160$ мкФ	$C_{12} = 1,6 - 16$ мкФ	$C_{12} = 0,16 - 1,6$ мкФ
		$C_1 \leq 1600$ нФ	$C_1 \leq 160$ нФ	$C_1 \leq 16$ нФ
7	≥ 1	$C_{12} = 160 - 1600$ мкФ	$C_{12} = 16 - 160$ мкФ	$C_{12} = 1,6 - 16$ мкФ
		$C_1 \leq 1600$ нФ	$C_1 \leq 160$ нФ	$C_1 \leq 16$ нФ
8	≥ 1	$C_{12} = 1600 - 16000$ мкФ	$C_{12} = 160 - 1600$ мкФ	$C_{12} = 16 - 160$ мкФ
		$C_1 \leq 1600$ нФ	$C_1 \leq 160$ нФ	$C_1 \leq 16$ нФ

Похила лінія (1) відповідає рівності шунтуючих і вимірюваних погонних ємностей. Крива (2) визначає верхню межу допустимих величин C_1 , C_2 . Вона знаходиться експериментально.

Перетин ліній (1) і (2) спостерігається в районі $C_{12} \sim 1-2$ нФ. При $C_{12} < 1-2$ нФ шунтуючі ємності значно перевищують вимірювальну, але при $C_{12} > 1-2$ нФ вони повинні на порядок – два бути менше за вимірювальну. Ця властивість приладу Е7-14 накладає обмеження на максимально можливу довжину кабелю, обстежуваного методом прямих вимірювань.

На рис. 3 східчастими лініями показані також нормативні обмеження на допустимі значення ємностей C_1 , C_2 . Вимоги до C_1 , C_2 – нерівнозначні. Для першої з них, під'єднаної до клем U' , I' , вимоги жорсткіші. Наприклад, при $C_{12} < 100$ пФ має бути: $C_1 \leq 160$ пФ, 1600 пФ і 16000 пФ – при частотах 10 кГц, 1 кГц і 100 Гц відповідно. При тих же умовах ($C_{12} < 100$ пФ) допустимі значення шунтуючої ємності C_2 істотно вище: не більше $0,016$ мкФ, $0,16$ мкФ і $1,6$ мкФ відповідно при тих же частотах.

При під'єднанні до приладу однієї з жил, а всіх інших – до екрану, маємо наступні значення трикутника ємностей (див. рис. 1):

$$C_1 = 1 \times 70 \text{ пФ}; \quad C_{12} = 1 \times 270 \text{ пФ}; \quad C_2 = 70 + 2 \times 26 \times 70 = 3710 \text{ пФ}.$$

Шунтуюча ємність C_2 в цьому випадку набагато перевищує C_{12} . Результати вимірювань виявляються хибними.

При під'єднанні до приладу усіх 27 жил значення вказаних ємностей дорівнює: $C_1 = 1 \times 27 \times 70 = 1890$ пФ; $C_{12} = 27 \times 270 = 7290$ пФ; $C_2 = 1 \times 27 \times 70 = 1890$ пФ. Ємність C_{12} є більше шунтуючих, і вимірювання будуть коректними. Стрибокподібна зміна резуль-

татів вимірювань від спотворених до істинних відбувається при паралельному підключенні до вимірювача більш 25 паралельно увімкнених ланцюгів (рис. 2 а, б).

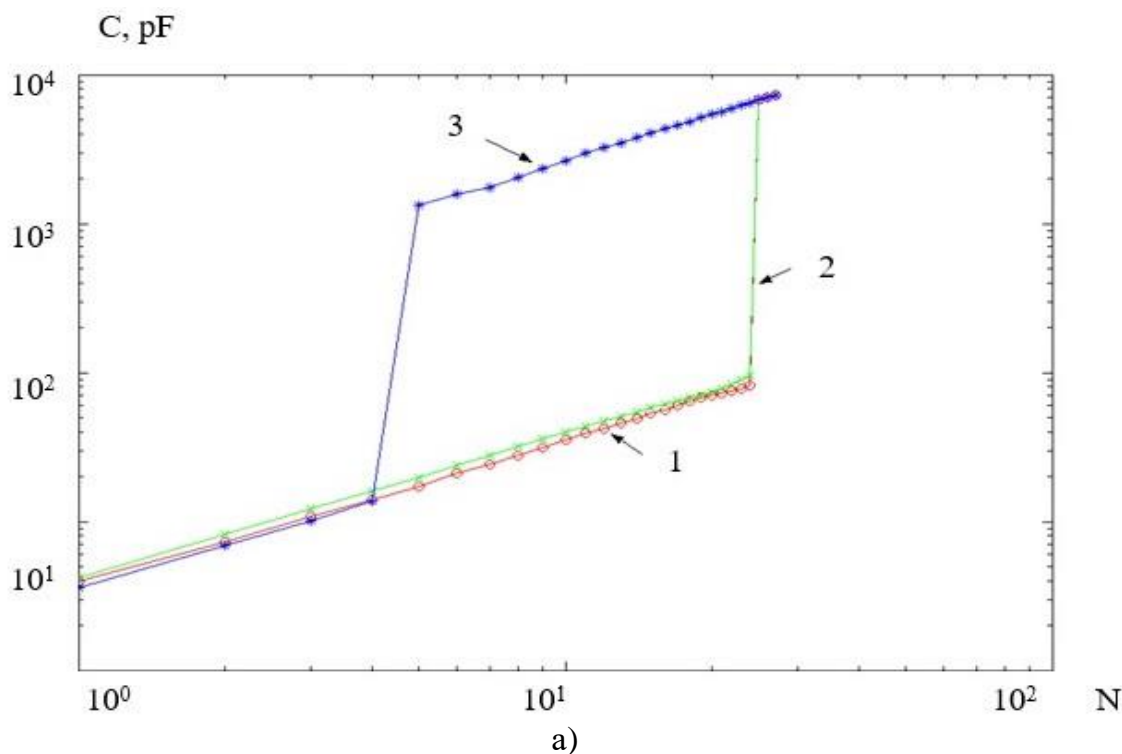
На рис. 3 точки, що відповідають випадкам підключення однієї, а також цілої групи часткових ємностей, позначені буквами A_2 і В відповідно. Точка A_2 буде вищою, а точка В – нижче граничної лінії 2. Тому в першому випадку вимірювання виявляються помилковими, а в другому – істинними. Перевірка виконується також шляхом прямого підключення (без комутатора), коли струмові (I' , I) і потенційні (U' , U) клемми приладу замикаються безпосередньо на об'єкті контролю.

Таким чином, для коректного вимірювання часткових ємностей багатожильних кабелів прямим методом необхідна обмежена величина шунтуючих ємностей, які, як правило, повинні бути менше шуканої ємності (права частина рис.3 при $C_{12} > 1-2$ нФ).

Результати лабораторних досліджень зразка 27-жильного екранованого кабелю КВВГЕ ВП РАЕС-04 в початковому стані (після експлуатації на енергоблоці №1 РАЕС протягом понад 20 років) представлені на рис. 4 у вигляді так званої $C-tg\delta-Is$ діаграми [9].

Виконано вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат всіх ізоляційних проміжків 27-жильного кабелю (тобто 378-й проміжків), причому на трьох частотах: 100 Гц (позначені о), 1 кГц (х) і 10 кГц (*).

У наведеному прикладі 378 проміжків 27-жильного екранованого кабелю утворюють всього 5 груп часткових ємностей. Дві крайні праві групи (з частковими ємностями близько 60 пФ / 1,5 м) відносяться до ізоляційних проміжків між жилами першого повиву (позначено II) і між жилами другого повиву і екрану (позначено II-е).



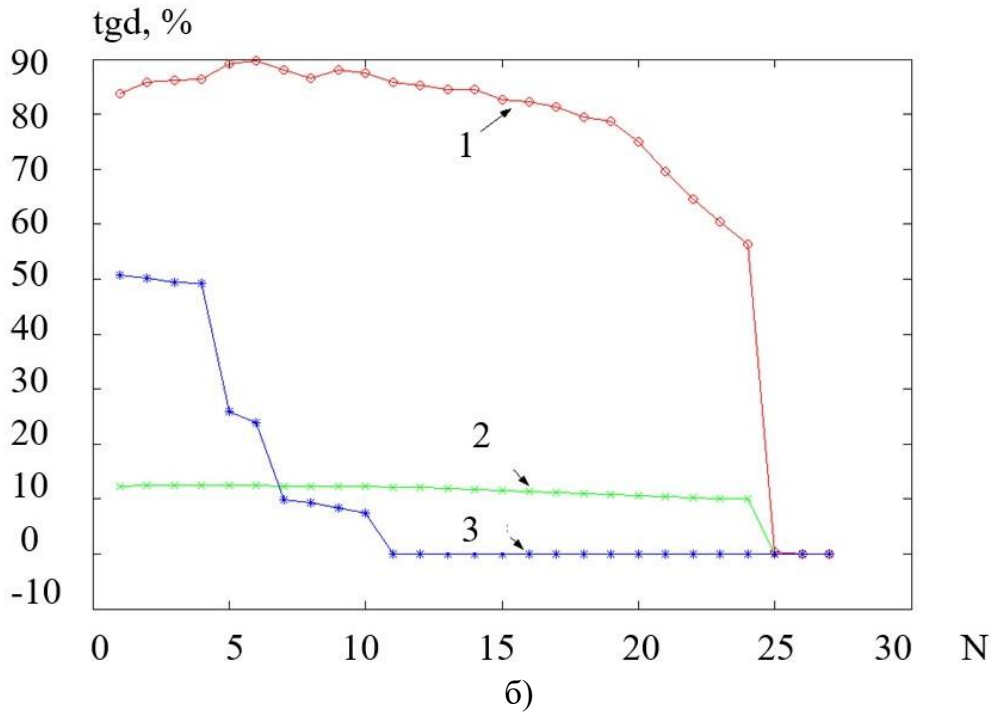


Рис. 2. Залежності від числа N паралельних гілок показів вимірювача імпедансу для ємності (а) і тангенсу кута діелектричних втрат (б). Кабель КМПЕВнг-27х0,35 довжиною 1,5 м. Частота вимірювань: 1 – 100 Гц; 2 – 1 кГц; 3 – 10 кГц.

Ці дві групи майже не помітні по ємності, але добре помітні по $tg\delta$: для другої групи він істотно менше. Це є доброю ознакою, що свідчить про те, що на поверхні ізоляції жив третього повиву немає низькомолекулярних продуктів (НМП) розкладання ізоляції.

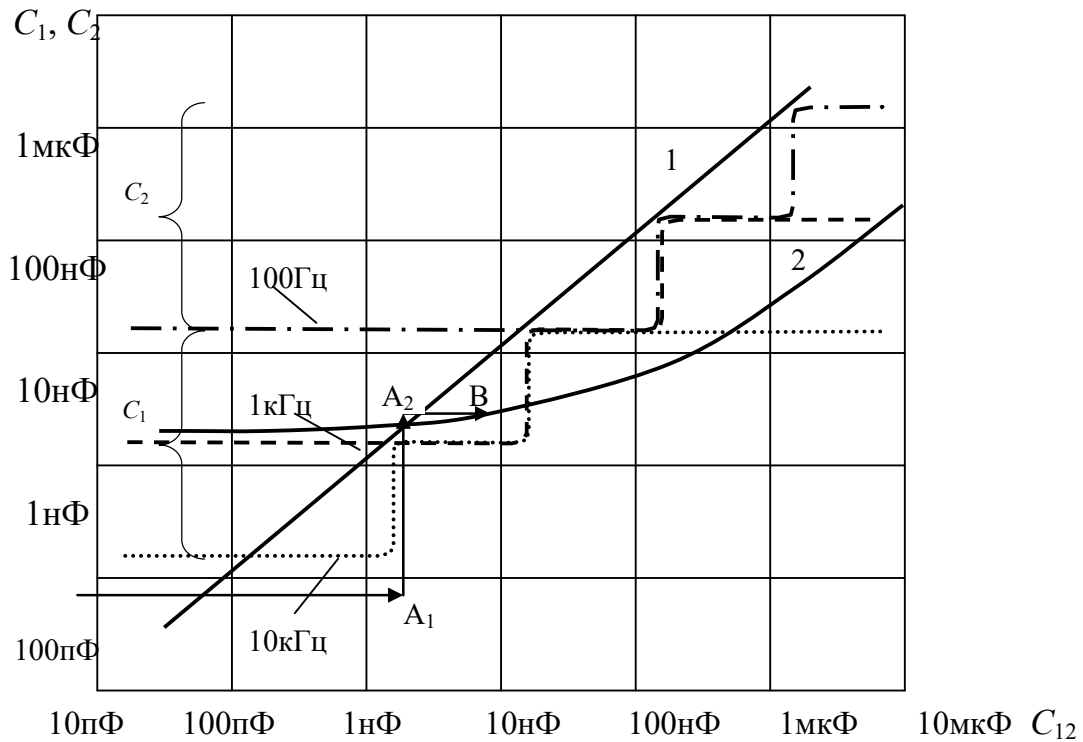


Рис. 3. Припустимі величини шунтуючих ємностей C_1, C_2 (східчасті лінії) в залежності від вимірювальної ємності C_{12}

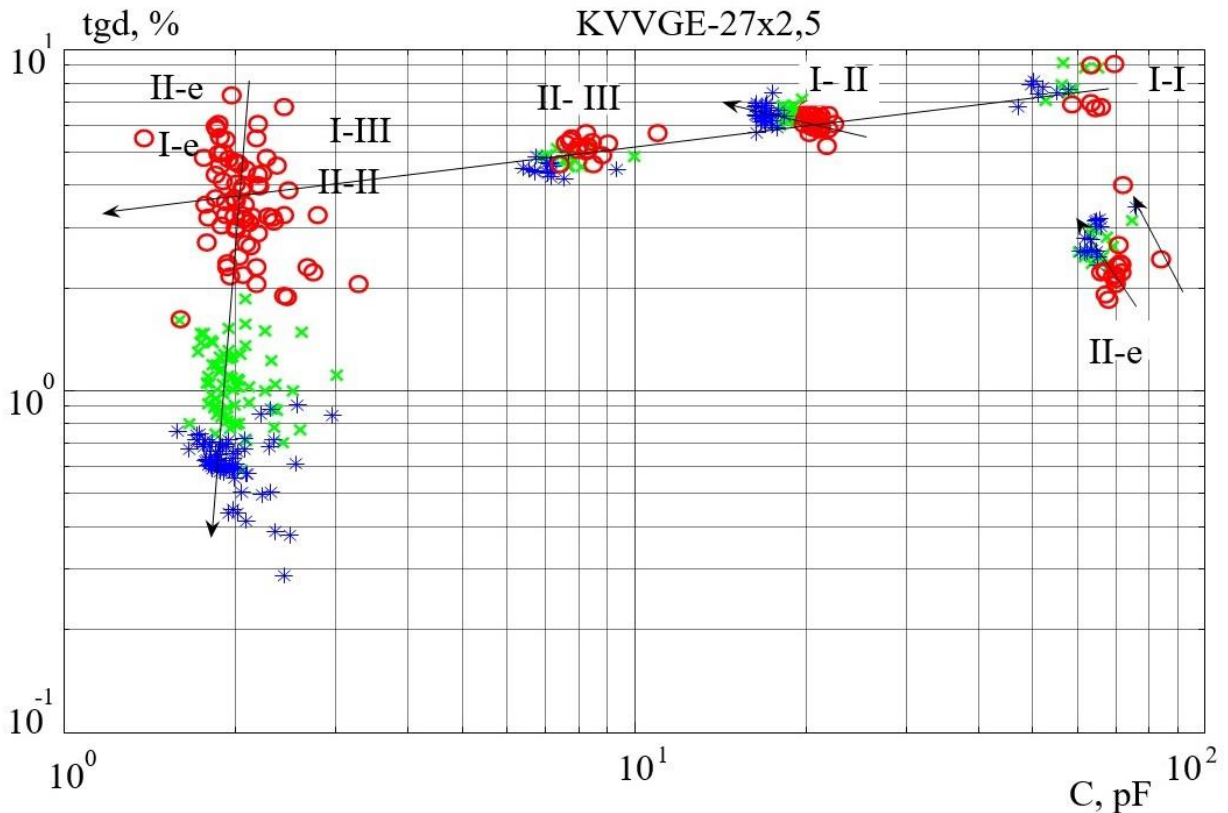


Рис. 4. C - $tg\delta$ - I_s діаграма зразка кабелю КВВГЕ-27х2,5/РАЭС-04 в вихідному стані. Область I-I – ізоляційні проміжки першого повіву; II – e – другий повів відносно екрану. Інші позначення – за аналогією

Силкові лінії від жил другого повіву на шляху до екрану проходять крізь область контакту ізольованих жив третього повіву. Якби в зоні контакту скупчилися НМП, вони б привели до зростання $tg\delta$. У кабелі всього 3 повіву, число жив в повів 3 + 9 + 15 відповідно. В область II потрапляють результати вимірювань також проміжків між дотичними ізольованими жилами I-го і II-го повівів. Область I-I слід розглядати як опорну. Вона найбільшою мірою відображає властивості власне ізоляції жил кабелю, вплив проміжків між жилами тут позначається мало.

При порівнянні з даною галуззю значень $tg\delta$ трьох інших областей, що характеризуються частковими ємностями близько 20,8 і 2пФ/1,5 спостерігається зниження $tg\delta$ при переході в області малих часткових ємностей. Це також є доброю ознакою, що свідчить про чистоту поверхні ізоляції також жив внутрішніх повівів. Внутрішній простір кабелю заповнений повітрям, діелектричні втрати якого дуже малі. Тому через «розведення» проміжків між віддаленими жилами повітрям їх $tg\delta$ знижується. Характерно, що «розбавлення» відбивається також і на залежності $tg\delta$ від частоти. Для ПВХ ізоляції жив характерна зростаюча залежність $tg\delta$ з ростом частоти (показано стрілками вгору в правій частині діаграми). Для ізоляційних проміжків, «розбавлених» повітрям, спостерігається падаюча залежність $tg\delta(f)$ – стрілка вниз в лівій частині діаграми.

Таким чином, за діелектричними втратами всіх ізоляційних проміжків представлений зразок виглядає цілком задовільно.

На рис. 5 представлений інший приклад, який свідчить про накопичення всередині кабелів НМП розкладання ізоляції.

Вони виявляються за різким зростання $tg\delta$ саме в області малих ємностей. Ця ж область є, як правило, найбільш чутливою і до старіння ізоляції (рис. 5, область 2).

Старіння починається з поверхневих шарів ізоляції жил через їх окислення. Помітити появу поверхневих шарів легше в тому випадку, коли зондує електричне поле ковзає уздовж межі контакту ізолюваних жил. Саме така структура поля і виникає в разі обстеження видалених одна від одної жил, тобто при вимірюванні малих часткових ємностей кабелів.

Мікрокапіляри мають властивість заповнюватися водою і в ненасиченій атмосфері. (На противагу цьому – макрокапіляри – віддають воду також в насичену атмосферу). Збільшення $\text{tg}\delta$ в області 3 (рис. 5) до 20–30% в порівнянні з початковим рівнем 7–9% обумовлюється саме наведеною гігроскопічністю зістареного кабелю.

6. Обговорення результатів контролю стану параметрів ізоляції кабельних виробів

Показники технічного стану багатожильних кабелів, які визначалися на постійній напрузі (опір ізоляції, напруга, що витримує випробувальні значення) малочутливі до початкової стадії пошкодження захисних оболонок кабелю, тому в роботі запропоновано вимірювання параметрів ізоляції, які вимірюються на змінній напрузі (часткові ємності C та тангенси кутів діелектричних втрат елементів конструкції кабелів. За параметрам ємності та $\text{tg}\delta$ можна вести більш вірогідний та якісний контроль процесів старіння ізоляції кабелів.

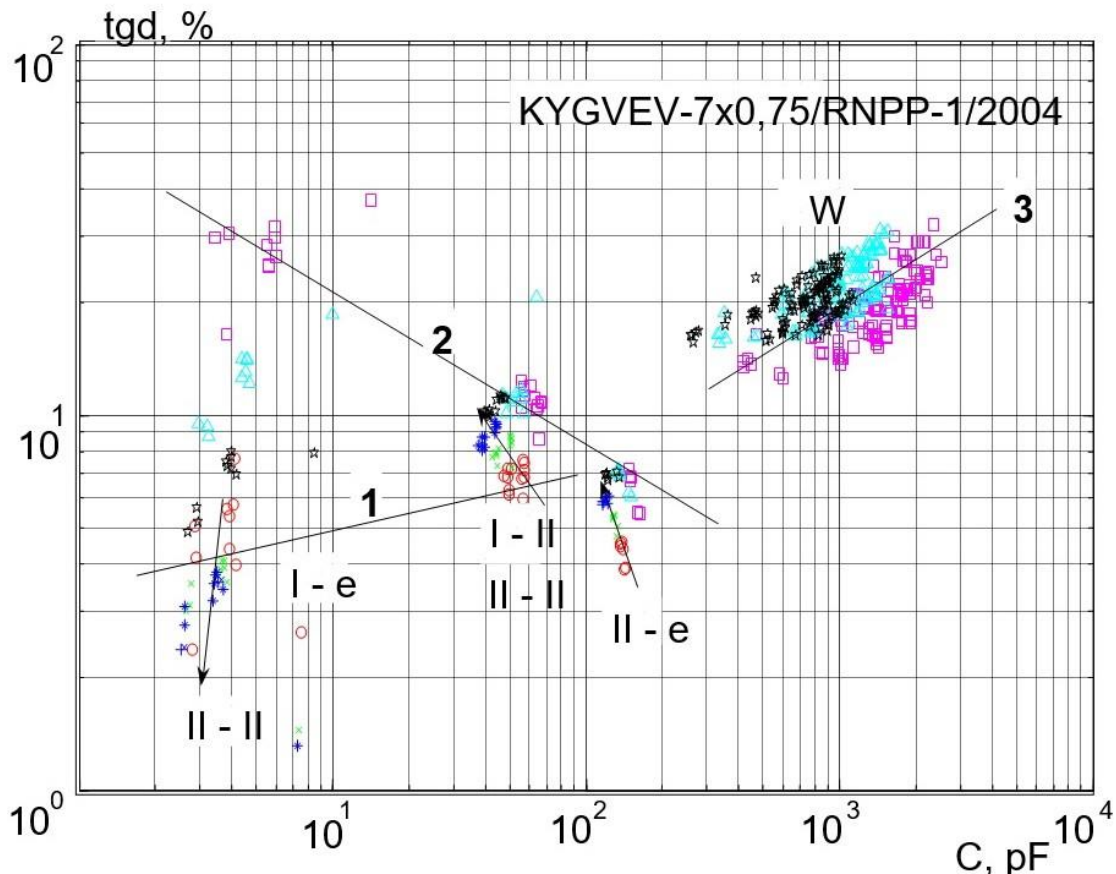


Рис. 5. Параметри зразків кабелю КУГВЕВ-7х0,75/ОП РАЕС-1/2004: 1 – в початковому стані; 2 – після додаткового терморадіаційного старіння; 3 – після гігроскопічного зволоження у вологокамері

Особливості запропонованого метода полягають в тому, що для отримання достовірних результатів вимірювань використовуються певна комбінація під'єднання до засобу вимірювальної техніки струмопровідних компонентів кабелю.

Вимоги до допустимій величині шунтуючих ємностей не однакові для двох вимірювальних клем приладу. Так, для вимірювача імітансу E7-14, струмові і потенційні клема, відмічені символами U' , I' , допускають значно менші рівні шунтуючих ємностей в порівнянні з клемами, зазначеними символами U , I . Тому реверс (зміна полярності) підключення об'єкта контролю може істотно впливати на результат: вимірювання, які спотворюються шунтуючими ємностями в одному випадку, можуть бути коректними при зміні полярності. В роботі були отримані граничні величини шунтуючої ємності C_1 в залежності від вимірюваної ємності C_{12} . На підставі цих розрахунків з'явилась можливість зменшити вплив шунтуючих ємностей на точність вимірювань приблизно на 1000 пФ.

Вимірювання параметрів ізоляційних проміжків багатожильних кабелів реалізується за допомогою приладів, що містять 3 клема (на постійному струмі) або 5 клем (на змінному струмі), одна з яких служить для відводу заважають струмів повз вимірювального ланцюга на корпус (заземлення).

Вимірювання характеристик малих погонних ємностей зручніше виконувати в сукупності. Окислені поверхневі шари ізоляції жил стають гідрофільними (притягують молекули води з атмосфери). В результаті кабель починає накопичувати водяні пари, які проникають всередину через кінцеві оброблення і мікротріщини в оболонці. Поглинання водяної пари з повітря – явище гігроскопічності – обумовлюється також тим, що в багатожильних кабелях виникає безліч мікрокапілярів (по лініях контактів ізолюваних жил).

Отже, для зменшення впливу паразитних ємностей рекомендується обмежити область використання методу прямих вимірювань тільки такими випадками, коли ємність вимірюваного проміжку превалює над погонними ємностями паразитних ланцюгів. Якщо значення часткових ємностей ізоляції жил кабелю приблизно одного порядку, то стан ізоляції кабелю є задовільним, якщо значення суттєво різняться, то стан ізоляції наближається до критичного, що призведе до виникнення надзвичайної ситуації. При цьому частина ізоляційних проміжків кабелю залишається обстеженою, а саме параметри цих проміжків найсильніше залежать від наявності в кабелі низькомолекулярних домішок – продуктів розкладання полімерної ізоляції в результаті термоокислювального або радіолітичного процесів старіння.

Однак, запропонований метод дослідження не завжди приводить до високоточних результатів. Похибка вимірювань часткової ємності, а особливо тангенсу кута діелектричних втрат, можуть бути настільки великими, що вимірювання втрачають сенс. Причиною такого явища є ємнісні струми паразитних ланцюгів, що відводяться на екран приладу. Для зменшення їх впливу обмежують область використання прямої схеми тільки тими випадками, коли ємність вимірюваного проміжку перевищує ємність паразитних ланцюгів.

Таким чином, за допомогою прямого методу вимірювання окремих локальних ізоляційних проміжків кабельного виробу можемо зробити висновок про стан ізоляції кабелю в цілому та виявити найбільш вірогідні ділянки кабелю, які можуть вийти з ладу, що в свою чергу дозволить запобігти надзвичайній ситуації.

Розвиток подальшого дослідження полягає в застосуванні більш чутливих сучасних цифрових засобів вимірювальної техніки та накопичення статистичної інформації щодо граничного максимального значення часткових ємностей та тангенсів кутів діелектричних втрат ізоляційних компонентів кабелів, при яких сам кабельний виріб досягне критичного стану.

7. Висновки

1. Розроблено метод неруйнівного контролю стану ізоляції кабелів при якому можливо оцінити результати обстеження багатожильних кабелів при використанні ємнісних та індуктивних мостів, який реалізується за допомогою приладів, які містять 3 клеми (на постійному струмі) або 5 клем (на змінному струмі), одна з яких служить для відводу заважаючих струмів повз вимірювальний ланцюг на корпус та застосуванням трикутника ємностей, що дозволяє досягти рівності шунтуючих і вимірюваних погонних ємностей та привести результати вимірювань до тих значень, за якими ми можемо зробити висновок щодо темпів термоокислювального або радіолітичного старіння ізоляції кабелю.

Запропонований метод дозволив ідентифікувати вимірюваний ізоляційний проміжок – за номерами жили-джерела – I_s і жили-приймача I_t та виділити області поєднань параметрів $C\text{-tg}\delta$, пов'язаних з різними повіями; що дозволяє спостерігати за розподілом низькомолекулярних продуктів (НМП) розкладання ізоляції за поперечним перерізом кабелю.

Визначення традиційних показників технічного стану кабелів, які визначаються постійній напрузі (опір ізоляції) малочутливі до початкової стадії пошкодження захисних оболонок ізоляції, тому запропоновано вимірювати більш чутливі показники на змінній напрузі (ємності C та тангенси кутів діелектричних втрат $\text{tg}\delta$) елементів конструкції кабелів.

2. Досліджено стан ізоляції багатожильних кабелів з метою виявлення ознак процесів старіння ізоляції конструктивних елементів кабелів: зниження опору ізоляції, зміна в бік зменшення значень ємностей та тангенсу кута діелектричних втрат, зростання коефіцієнту абсорбції та рівня часткових розрядів, появлення локальних неоднорідностей.

Виявлені області параметрів ізоляції, які найбільш чутливі до процесів старіння кабелів (зі зміни положення груп точок після додаткового прискореного старіння зразків та гігроскопічного зволоження) та визначили області параметрів, найменш чутливі до старіння ізоляції. Збільшення $\text{tg}\delta$ в області до 20–30% в порівнянні з початково рівнем 7–9% обумовлюється саме наведеною гігроскопічністю зістареного кабелю. Такі області можна використовувати в якості «внутрішнього стандарту», тобто опорних областей для порівняльного аналізу ізоляційних проміжків кабелів.

Визначено області та можливості застосування прямого методу контролю часткових ємностей і тангенса кута діелектричних втрат кабельних виробів в контексті запобігання надзвичайним ситуаціям.

Література

1. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Bin Wu., Rodriguez J., Pérez M. A., Leon J. I. Recent advances and industrial applications of multilevel converters // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. V. 57. P. 2553–2580. doi: 10.1109/tie.2010.2049719
2. Krieger E. M., Arnold C. B. Effects of undercharge and internal loss on the rate dependence of battery charge storage efficiency // Journal of Power Sources. 2012. V. 210. P. 286–291. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.029
3. Chen R. J., Zhang Y., Wang B. Numerical simulation study on the cement-based absorbing material // Advanced Materials Research. 2013. V. 853. P. 169–173. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.853.169

4. Saha A., Ahmad S., Soma A. A., Chowdhury M. Z., Hossain A. A. Modelling and control of STATCOM to ensure stable power system operation // 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). 2017. P. 12–17. doi: 10.1109/icaee.2017.8255318

5. Pignini A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G. Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods // IEEE Transactions on Power Delivery. 1989. V. 4. P. 1379–1392. doi: 10.1109/61.25625

6. Caldwell R., Darveniza M. Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1973. V. 4. PAS-92. P. 1420–1428. doi: 10.1109/tpas.1973.293550

7. Jones M., Satiawan I. N. W., Bodo N., Levi E. A dual fivephase space-vector modulation algorithm based on the decomposition method // IEEE Transactions on Industry Applications. 2012. V. 48. P. 2110–2120. doi: 10.1109/tia.2012.2226422

8. Беспрозванных А.В., Костюков И.А. Погрешность контроля электроизоляционных конструкций по параметрам диэлектрической абсорбции в соответствии с концепцией неопределенности измерений. Електротехніка і електромеханіка. 2020. № 1. С. 47–51. doi: 10.20998/2074-272X.2020.1.07

9. Fesenko H., Kliushnikov I., Kharchenko V., Rudakov S., Odarushchenko E. Routing an unmanned aerial vehicle during NPP monitoring in the presence of an automatic battery replacement aerial system // Proceedings of the 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020). Kyiv. Ukraine. May 14–18. 2020. P. 34–39. doi: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125080

10. Forthofer J., Shannon K., and Butler B. Simulating diurnally driven slope winds with WindNinja // Eighth Symposium on Fire and Forest Meteorology, 13–15 October 2009. Kalispell. MT. 156275. available at: https://ams.confex.com/ams/8Fire/techprogram/paper_156275.htm (last access: 11 December 2015).

11. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies pringer International Publ. AG, 2018. 93 p. doi: 10.1007/978-3-319-74570-1

*S. Rudakov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
O. Myrgorod, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
I. Gritsina, PhD, Associate Professor, Deputy Head of Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

PREVENTION OF EMERGENCIES BY MONITORING THE INSULATION CONDITION OF MULTI-CORE CABLES

A method for measuring the partial capacities and the tangent of the dielectric loss angle of individual components of cable products that are in operation at energy facilities has been developed. This method is based on direct measurements of insulation components separately with subsequent assessment of the whole structure. This method makes it possible to assess in more detail the state of cable insulation, as cores, shields, metal sheaths are used as electrodes – to localize the probing electromagnetic field in certain parts of the cable: mainly in phase and solder insulation of power cables, in core insulation or in phase space control cables. Then, comparing the characteristics of the isolated areas of insulation with each other and with the basic products that have passed the accelerated resource tests, up to reaching the limit state – we make a reasonable conclusion about the current state of the cable product. However, in such measurements, the errors of partial capacitance measurements, and especially the tangent of the dielectric loss angle, can be large. The reason for this is the capacitive currents of the par-

asitic circuits discharged to the screen of the device. The paper proposes a method of reducing the measurement error, which limits the scope of the direct circuit only in cases where the capacity of the measured interval is much higher than the capacity of the parasitic circuits. The study on direct current is performed by devices with three terminals: two - measuring, the third - shielding - to remove excess current from the measuring circuit. The paper proposes such a scheme in the form of a triangle of capacitors, which allows for reliable measurements of the values of partial tanks, which compensates for the currents of the shunt circuits relative to the currents of the selected interval. The results of such control will allow to identify the areas of parameters that are most sensitive to the aging processes of cables, which, in turn, will prevent emergencies that could occur at energy facilities.

Keywords: cable insulation, dielectric loss tangent, partial capacitance

References

1. Kouro, S., Malinowski, M., Gopakumar, K., Pou, J., Franquelo, L.G., Bin, Wu., Rodriguez, J., Pérez, M.A., Leon, J.I. (2010). Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (8), 2553–2580.
2. Krieger, E. M., Arnold, C. B. (2012). Effects of undercharge and internal loss on the rate dependence of battery charge storage efficiency. *Journal of Power Sources*, 210, 286–291.
3. Chen, R. J., Zhang, Y., Wang, B. (2013). Numerical simulation study on the cement-based absorbing material. *Advanced Materials Research*, 853, 169–173.
4. Saha, A., Ahmad, S., Soma, A. A., Chowdhury, M. Z., Hossain, A. A. (2017). Modelling and control of STATCOM to ensure stable power system operation. 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 12–17.
5. Pignini, A., Rizzi, G., Garbagnati, E., Porrino, A., Baldo, G., Pesavento, G. (1989). Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1379–1392.
6. Caldwell, R., Darveniza, M. (1973). Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-92, 4, 1420–1428.
7. Jones, M., Satiawan, I. N. W., Bodo, N., Levi, E. (2012). A dual fivephase space-vector modulation algorithm based on the decomposition method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48 (6), 2110–2120.
8. Bezprozvannykh, G. V., Kostiukov, I. A. (2020). Error of control of electrical insulation structures by dielectric absorption parameters according to the concept of uncertainty of measurements. *Electrical engineering & electromechanics*, 1, 47–51.
9. Fesenko, H., Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Rudakov, S., Odarushchenko, E. (2020). Routing an unmanned aerial vehicle during NPP monitoring in the presence of an automatic battery replacement aerial system. *Proceedings of the 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020)*, Kyiv, Ukraine, 34–39.
10. Forthofer, J., Shannon, K., Butler, B. (2009). Simulating diurnally driven slope winds with WindNinja, in: *Eighth Symposium on Fire and Forest Meteorology*. Kalispell, MT, 156275.
11. Batygin, Yu., Barbashova, M., Sabokar, O. (2018). *Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies*. Springer International Publ, AG, 93.

Надійшла до редколегії: 02.02.2021

Прийнята до друку: 06.04.2021