

В.М. Кириленко, К.В. Кириленко

Теоретичне визначення індивідуальних значень параметрів елементів чотирьохелементних схем заміщення ізоляції для абсорбційних методів діагностування ізоляції

Розглянута теоретична методика визначення індивідуальних значень параметрів елементів узагальної схеми заміщення ізоляції по залежності абсорбційного струму від часу, а також інших чотирьохелементних схем заміщення ізоляції з наскрізною провідністю та їх взаємного перерахунку, що повністю розкриває інформативний потенціал абсорбційних методів діагностування електричної ізоляції. Знання цих значень теоретично дозволяє, враховуючи значення часу та розмірні фактори, сформувати будь-який абсорбційний діагностичний параметр, що використовується зараз, і прослідкувати його зміни в процесі експлуатації ізоляції. Наголошується, що для фізично обґрунтованої інтерпретації результатів діагностичного контролю абсорбційним методом за однією з схем заміщення ізоляції необхідно мати інформацію про склад і структуру ізоляції. Бібл. 20, рис. 2.

Ключові слова: неруйнівні методи діагностики ізоляції, абсорбційні методи діагностики, параметри елементів схем заміщення ізоляції.

Вступ. Електротехнічне і електроенергетичне обладнання, що використовується на підприємствах України, випрацювало значну частину або і весь призначений ресурс, враховуючи, що максимально інтенсивне його введення в експлуатацію мало місце до 90-х років минулого сторіччя. Це стосується обладнання електростанцій, такого як генератори, трансформатори, двигуни внутрішніх потреб та обладнання високовольтних розподільних пристроїв, ізоляції повітряних мереж та кабельних ліній, а також асинхронних двигунів електроприводу.

Зараз більша частина електрогенеруючого обладнання ТЕС і ТЕЦ відпрацювали свій граничний ресурс (більше 200 тис. годин), воно зношене і відповідно до існуючої нормативної документації потребує реконструкції або заміни. Розподіл питомої пошкоджуваності основних вузлів турбо- і гідрогенераторів, яка зростає зі збільшенням потужності, свідчить, що контролю, як найбільш «слабкий» вузол, підлягає ізоляція статора [1].

Якщо брати до уваги все основне обладнання електростанцій, то слід зазначити, що велику увагу необхідно приділяти контролю технічного стану силових трансформаторів [2-7], особливо з подовженим ресурсом.

Через зношеність у переважній більшості випадків (85-95 %) відмови асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (найширше вживаних на підприємствах країни) потужністю понад 5 кВт відбуваються через пошкодження обмотки статора та ротора і розподіляються таким чином: обмотка статора – до 80 %, ротора – до 10 % [1, 8-11]. Це спричиняє підвищену увагу до контролю надійності їхньої ізоляції.

Моральний і фізичний знос кабельних ліній напругою 6-10 кВ в системах електропостачання складає від 40 до 90 %. При цьому до 70 % всіх порушень електропостачання виникає при відмовах кабельних ліній напругою 6-10 кВ, а тому контроль їх технічного стану є також актуальним питанням [12-15].

При використанні зношеного електрообладнання, слід мати на увазі, що коли говорять про призначений ресурс, згідно нормативної документації мова йде про груповий ресурс, який визначається, як час напрацювання групи виробів, за який відмовляють n відсотків найдефектніших виробів. Цей час і приймається за груповий ресурс з надійністю $1-n/100$. Такий загальноприйнятий підхід не враховує, що розсіювання ресурсу може становити кілька сотень відсотків, а тому залишковий ресурс деяких виробів, особливо якщо ресурс розподілений за логарифмічно-нормальним законом, може бути більшим за призначений в кілька разів. Виходячи з цього факту, можна вважати виправданим

намагання подовжити термін використання обладнання, встановивши подовжений ресурс. Але, наголошуємо, що експлуатація електрообладнання, того, що відпрацювало призначений і для якого встановлений подовжений ресурс, внаслідок невизначеності реального ресурсу вимагає неперервного контролю його технічного стану. Тільки при таких умовах можна ефективно використати невипрацьований ресурс обладнання.

Контроль рівня надійності електроізоляційних матеріалів і конструкцій в експлуатації здійснюють шляхом вимірювання впливу на параметри ізоляції характеристик зовнішніх і експлуатаційних чинників, що приводять до зміни технічного стану ізоляції, у тому числі й таких, що не пов'язані з функціонуванням. Найчастіше технічний стан ізоляції і електроізоляційних матеріалів визначають за допомогою інтегральних параметрів, таких як опір, ємність, тангенс кута діелектричних втрат, струм витоку, коефіцієнт абсорбції, відновлювана напруга і т. п. [16].

Одним з методів контролю технічного стану електрообладнання є абсорбційні діагностичні методи, які рекомендуються, як нормативні, для діагностування ізоляції трансформаторів, синхронних генераторів, компенсаторів, колекторних збудників і електродвигунів змінного струму [16]. Короткий опис абсорбційних методів наведено в [1].

Сучасні наукові дослідження абсорбційних методів і їх використання стосуються діагностування стану ізоляції силових трансформаторів [2, 3, 9-12, 15], обертових електричних машин [8-11], низько- і високовольтних кабелів [7, 12-14].

Дефекти ізоляції і методи їх діагностування в загальному вигляді описані в [1, 8, 9]. В [1] розглянуто загальні питання діагностування ізоляції і, зокрема, використання абсорбційних методів. До діагностичних параметрів у випадку використання абсорбційних методів діагностики відносяться, по-перше, параметри, що використовують характеристики швидкості спаду кривої абсорбційного струму (зростання опору ізоляції) в залежності від часу прикладення постійної напруги до ізоляції на різних ділянках цієї кривої, тобто коефіцієнт абсорбції, коефіцієнт поляризації, відношення діелектричної абсорбції, індекс поляризації та інші подібні характеристики та їх похідні. Другий напрям, що відноситься до абсорбційних методів, це метод відновлюваної напруги, що реалізується в двох варіантах. У першому випадку визначається відношення максимального значення відновлюваної напруги, що виникає

внаслідок заряду від абсорбційної ємності відімкнutoї від джерела напруги ізоляції після розряду її геометричної ємності, до зарядної (ємнісний коефіцієнт абсорбції). У другому варіанті – це ж відношення, визначене при різних інтервалах часу розряджання геометричної ємності, що приводить до часткового розряду і абсорбційної ємності. Крім того, як діагностичні параметри можуть використовуватися початкова швидкість наростання відновлюваної напруги, час досягнення максимального значення відновлюваної напруги, коефіцієнти нелінійності відновлюваної напруги, сталу часу саморозряду, та інші характеристики.

Узагальнена еквівалентна схема заміщення ізоляції (рис. 1,а) лежить в основі всіх абсорбційних діагностичних методів. До її елементів належать геометрична ємність C_g , що відображає ємність, пов'язану зі швидкими процесами електронної і іонної поляризації, наскрізний опір R_b , тобто усталене значення опору ізоляції протіканню постійного струму, ємність абсорбції C_a , що відповідає за повільні процеси міграційної поляризації, обумовленої накопиченням вільних зарядів на межах областей діелектрика з різними електрофізичними властивостями або в приелектродних областях, та абсорбційний опір R_a , який вводиться для правильного відображення інерційних властивостей міграційної поляризації [1].

Коефіцієнт абсорбції (і інші різниці діагностичні параметри для узагальненої схеми і інших чотирихелементних схем заміщення), як правило, можна записати у вигляді:

$$k_a = \frac{R_1 + R_2 \exp(-t_2 \alpha_{iv})}{R_1 + R_2 \exp(-t_1 \alpha_{iv})},$$

де t_1 і t_2 – час вимірювання опорів R_1 , R_2 , в загальному випадку R_i – резистивні елементи, α_{iv} – функція резистивних і ємнісних елементів схеми заміщення. Конкретні вирази для R_i і α_{iv} , що використовуються для коефіцієнта абсорбції, будуть наведені нижче для всіх чотирихелементних схем заміщення ізоляції.

В [8, 9] розглянуто основні причини і дефекти ізоляційних конструкцій, процеси, які протікають в ізоляції під дією електричного поля і приводять до утворення її дефектів. В [9] подано узагальнений аналіз методів контролю і діагностичних параметрів ізоляції тягових двигунів постійного струму. При цьому використана узагальнена схема заміщення ізоляції, параметри схеми заміщення визначалися через параметри моделі, що містить паралельні абсорбційні кола послідовно з'єднаних ємностей і опорів.

В [2] відзначається, що в ізоляції мають місце два фундаментальних процеси: поляризація і електропровідність, і що обидва процеси повинні бути чутливі до змін складу і характеристик, що відбуваються в ізоляції в процесі експлуатації, і наводиться перелік потенційно можливих методів діагностування. В [10] викладено процедури випробувань постійною напругою для вимірювання опору ізоляції та індексу поляризації ізолюваного статора, а також обмоток ротора та способи інтерпретації результатів, отриманих при діагностуванні обертових машин.

В той же час встановлено [11], що при діагностуванні обмоток роторів і статорів генераторів і двигунів опір ізоляції і індекс поляризації добре виявляють зволоження і частково провідні включення, але не чутливі до багатьох інших дефектів: ослаблення витків в пазу,

що приводить до стирання ізоляції, розшарування ізоляції через використання при високих температурах, відділення міді від ізоляції через циклічні навантаження, руйнування захисних покриттів і часткові розряди між котушками. Автори пропонують використовувати порівняння зарядного і розрядного струму для кожної фази обмотки і окремих котушок з одночасним вимірюванням опору і індексу поляризації.

В розглянутих нами вище роботах автори користуються стандартними показниками, які представляють собою стандартні інтегральні комбінації параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми, як було показано для коефіцієнта абсорбції, і не розглядають питання одночасного визначення всіх індивідуальних параметрів елементів схеми заміщення, як таких, а також їх взаємозалежності.

Якщо говорити про можливість діагностування електричної ізоляції з допомогою відновлюваної напруги, то в [3] продемонстрована хороша відповідність між моделлю на основі узагальненої схеми заміщення діелектрика і реальною ізоляцією для коефіцієнтів поляризації, деполіаризації і відновлюваної напруги.

Найбільш широке використання метод відновлюваної напруги знайшов для силових трансформаторів. Умови моніторингу ізоляції високовольтних трансформаторів методом відновлюваної напруги викладені в [4].

В роботі [5] розглядається новий підхід до об'єднання результатів, отриманих за допомогою двох методів, а саме: вимірювання зворотної напруги та вимірювання струму поляризації-деполяризації для декількох силових трансформаторів, щоб знайти зв'язок між вмістом вологи в маслі та папері, що має відношення до силових трансформаторів.

У методі відновлюваної напруги [6] визначається напруга відновлення після зарядки ізоляції напругою постійного струму. Шляхом багаторазової зарядки протягом різного часу з наступним отриманням значення відновлюваної напруги може бути створений так званий поляризаційний спектр. Діапазон напруги відновлення дає вказівку на стан, в якому є ізоляція трансформатора. Проаналізовано результати вимірювання на двох трансформаторах великої потужності в роботі, що визначають вологість твердої ізоляції.

З допомогою еквівалентних схем в [7] досліджувалися характеристики відновлюваної напруги для паперово-оливної ізоляції: час заряду, час закорочування, що дорівнював половині часу заряду, відновлювана напруга і визначалося відношення її максимуму до зарядної напруги, а також фіксувався час, що відповідає максимуму. Моделювання проводилось для 14 циклів з різним часом заряду від 0.1 до 819 с і оцінювалися доля вологи і провідність оливи. Аналізуючи результати, автори зауважують, що традиційні діагностики використовували величину постійної часу, за який досягається максимум відновлюваної напруги, хоч вона може маскуватися міжфазною поляризацією, що робить використання даної методики на практиці неприйнятним.

Враховуючи, що старіння паперово-оливної ізоляції силових трансформаторів відбувається в основному за рахунок вологи і кисню, були розроблені нові методики оцінки стану ізоляції на основі діелектричного відгуку, але вони використовують дорогі інструменти. В роботі [7] показана ефективність вимірювання відновлюваної напруги за допомогою простих вимірювальних пристроїв. Встановлено зв'язок між

початковою швидкістю зростання відновлюваної напруги і станом ізоляції.

Проведені дослідження [12] показують, що застосування вимірювання відгуку напруги є дуже ефективним інструментом для визначення стану старіння ізолюваних кабелів з масляного паперу. Початковий нахил напруги заряду прямо пропорційний провідності ізоляції і початковий нахил відновлюваної напруги пропорційний інтенсивності процесів поляризації. Тому два основних процеси зносу (зволоження і термічне старіння) масляно-паперової ізоляції можна розглянути окремо.

У роботі [13] розглянуто застосування методу спрацьовування напруги на лабораторно витриманих низьковольтних полімерних (ПВХ і ПЕ) ізолюваних кабелях і порівняно результати з результатами хімічних і пробивних випробувань. За допомогою методу спрацьовування напруги можна виявити стан старіння ізоляції, тобто ймовірне зниження діелектричної міцності для кабелів експлуатаційного віку в порівнянні з діелектричними втратами.

Відновлювана напруга, як діагностичний фактор, досліджувалася також в [14, 15]. В [17] представлена методика визначення характеристик фазної і поясної паперово-оливної ізоляції силових кабелів середньої напруги. Методика реалізована на використанні схеми заміщення трьохжильного кабелю в загальній металічній оболонці і аналізі результатів сукупних вимірювань абсорбційних характеристик. Система лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення характеристик фазної і поясної ізоляції є добре зумовленою. В статті приведені результати визначення абсорбційних характеристик фазної і поясної ізоляції силового кабелю на напругу 6 кВ, які добре узгоджуються з реальними значеннями.

Слід відзначити, що і в роботах, де в якості діагностичних параметрів використовувалася відновлювана напруга, що залежить від зарядної напруги та комбінацій значень параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції, і пов'язані з нею похідні діагностичні параметри, аналітичні вирази для яких наведені нижче в статті, мова не йде про визначення всіх індивідуальних значень параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції одночасно.

Третій напрямок діагностичних досліджень виникає практично зараз завдяки роботам Безпрозваних Г.В. [17-19], яка одна з перших, якщо не перша, зрозуміла, що потрібно використовувати статистичний підхід до діагностування електричної ізоляції. Але і в даному випадку одночасне визначення індивідуальних значень параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції залишається поза увагою авторів.

Автори робіт з діелектричної спектроскопії [12, 14] та ін. як діагностичним параметром користуються тангенсом кута діелектричних втрат в області низьких частот, який досить складно зв'язаний з параметрами елементів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції, а тому, враховуючи тему даної роботи, результати, отримані ними можуть не розглядатися. Так що і для цього напрямку одночасне визначення всіх індивідуальних параметрів схем заміщення не актуальне.

Першою роботою, де детально були проаналізовані недоліки діагностування електричної ізоляції шляхом вимірювання коефіцієнтів абсорбції, індексу поляризації, відношення діелектричної абсорбції і інших інтервальних характеристик, є стаття [20], де авторами відзначалися неоднозначність інтерпретації результатів діаг-

ностування через залежність діагностичних критеріїв одночасно від значення параметрів кількох елементів схеми заміщення, що можуть по різному змінюватися в процесі старіння ізоляції, приводячи до неоднозначності діагностичних параметрів, а також внаслідок екстремальності цих діагностичних параметрів. Відзначалася також відсутність інформації про явне значення параметрів резистивних елементів схеми заміщення, або їх неявне використання для діагностичних параметрів, що ґрунтуються на методі відновлюваної напруги, але детальний аналіз цих методів не проводився.

На погляд авторів даної статті, є можливість суттєво підвищити інформативність абсорбційних методів діагностики і частково усунути неоднозначність їх інтерпретації шляхом визначення індивідуальних значень параметрів елементів чотирьохкомпонентних схем заміщення ізоляції. Зрозуміло, що знання індивідуальних значень цих параметрів теоретично дозволить сформулювати з врахуванням часу і розмірних факторів будь-який діагностичний параметр, що ґрунтується на абсорбційних методах.

Метою статті є розроблення наукових основ методики визначення індивідуальних значень параметрів чотирьохелементних схем заміщення ізоляції з наскрізною провідністю.

В статті розглядається випадок, коли діелектрик має тільки одну абсорбційну експоненту, враховуючи, що узагальнення методики на кілька абсорбційних експонент очевидне. Для цього потрібно виключати спочатку постійну складову, а потім послідовно експоненти з найбільшою сталою часу віднімаючи силу струму, що їм відповідає від залишкової кривої і перебудовуючи нову залишкову криву в напівлогарифмічному масштабі. Автори розуміють, що стаття носить суцільно теоретичний характер, визначення індивідуальних значень параметрів схеми заміщення ізоляції проводиться для кривої, що моделює абсорбційний струм в ізоляції, але очевидно, що застосування методики, що пропонується, до реальної абсорбційної кривої дозволить визначити реальні значення параметрів схеми заміщення ізоляції, що досліджується. Практичне використання методики для реальної ізоляції буде продемонстроване в наступній статті.

Використання еквівалентних схем діелектрика для діагностування ізоляції. Для ізоляції електротехнічного і електроенергетичного устаткування характерна неоднорідність структури і властивостей, що зумовлена самою структурою і складом електроізоляційного матеріалу. Крім того, неоднорідність ізоляції може виникати в процесі експлуатації ізоляції внаслідок неоднорідного розподілу поля, пов'язаного з геометрією самої діелектричної конструкції, внаслідок чого електричне і теплове старіння ізоляції буде протікати з різною інтенсивністю в областях з різною напруженістю поля. Вплив неоднорідності матеріалу і геометрії електроізоляційної конструкції на конфігурацію внутрішнього поля в ізоляції можна оцінити розрахунковим шляхом лише для деяких найбільш простих випадків. Якщо застосовуються неоднорідні матеріали в неоднорідному полі, то накладання зовнішньої і внутрішньої неоднорідностей різко ускладнює задачу. Одним з простих підходів до обходу виникаючих ускладнень полягає в моделюванні електроізоляційних конструкцій простими електричними схемами заміщення, що складаються з резисторів і конденсаторів і мають частотні характеристики, що відповідають час-

тотним характеристикам ізоляції, що досліджується. Передбачається, що при такій заміні можна скласти більш-менш адекватне уявлення про міру неоднорідності ізоляції при певній інтерпретації отриманих результатів. Зазначимо, що подібний підхід, що ґрунтується на заміні діелектриків еквівалентними схемами, застосовують не лише до опису властивостей електричної ізоляції, але і до дослідження взаємозв'язку між структурою і електрофізичними властивостями гетерогенних композиційних діелектричних матеріалів.

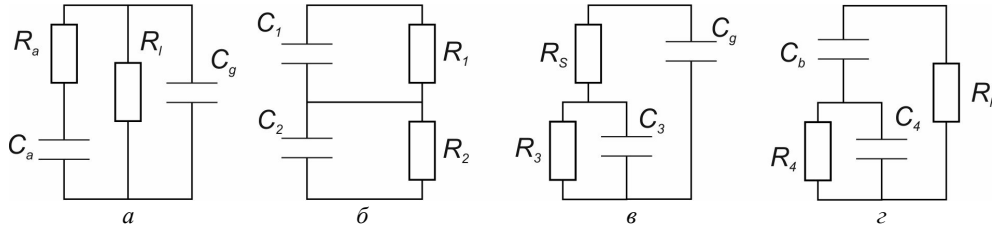


Рис. 1. Чотирьохелементні схеми заміщення ізоляції з наскрізною провідністю

Інтерпретація узагальненої схеми заміщення ізоляції (рис. 1,а) була наведена вище.

Шаруватому матеріалу, що є послідовним з'єднанням двох діелектриків з пружною поляризацією, яка відображається ємностями C_1 і C_2 , і наскрізною електропровідністю, яка представлена опорами R_1 і R_2 , включеними паралельно відповідним ємностям, відповідає схема (рис. 1,б). За умови, що $\epsilon_{r1}\rho_1 \neq \epsilon_{r2}\rho_2$, макроскопічна неоднорідність такої двокомпонентної ізоляції приводить до появи міграційної поляризації, обумовленої накопиченням вільних зарядів на між фазній межі, наслідком якого є експоненціальний спад струму з часом при постійній напрузі і діелектричні втрати при змінному.

Схема (рис. 1,в) може відповідати ізоляції з частково зруйнованими чи пробитими локальними вкрапленнями або композитному діелектричному матеріалу з допороговою концентрацією компонента зі значно вищою електропровідністю, що характеризується опором R_b , послідовно з яким підключено діелектрик (ємність C_3) з низькою електричною провідністю (опір R_3), а також паралельною цьому послідовному колу ємністю C_g , що відображає швидкі види поляризації.

І, нарешті, схему (рис. 1,г) можна застосувати для ізоляції, що є композицією високодобротного неполярного полімера з дуже низькою провідністю (ємність C_b) і полярного полімера, включеного частково послідовно з ним (коло C_4 , R_4), а частково паралельно (опір R_1), або для композиційного матеріалу, що складається з іонного або іншого низькодобротного наповнювача в запороговому режимі.

Таким чином, модельна крива абсорбційного струму може бути підібрана для однієї з схем заміщення ізоляції, і саме для цієї з схем заміщення можуть бути розраховані індивідуальні значення параметрів її елементів, але потім ці значення можуть бути перераховані і до других схем заміщення. Спочатку в статті ми розглянемо, як визначити індивідуальні значення параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми, а потім їх перерахунок в індивідуальні значення параметрів елементів інших чотирьохелементних схем заміщення ізоляції. Наведені також формули для зворотного перерахунку.

Визначення індивідуальних значень параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції. Визначення індивідуальних зна-

даних модельній кривій абсорбційного струму може відповідати будь-яка чотирьохкомпонентна схема заміщення з наскрізною провідністю. Для правильного вибору схеми заміщення і наступної інтерпретації результатів діагностування необхідно мати уявлення про склад, структуру і особливості протікання електрофізичних процесів в ізоляції. Це досить складна задача, а тому наведемо лише деякі можливі варіанти інтерпретації чотирьохелементних схем заміщення ізоляції.

Значення параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції: наскрізного опору, абсорбційного опору, абсорбційної і геометричної ємностей на практиці можна реалізувати шляхом реєстрації і аналізу перехідного струму у вимірювальному колі, зображеному на рис. 2, при миттєвому поданні постійної напруги $U = U_0$.

У вимірювальне коло включено, крім ізоляції, два резистори: вимірювальний R_d – для вимірювання струму витoku, і формувальний R_0 – для генерування експоненти, що описує заряд геометричної ємності ізоляції. Значення вимірювального опору вибирається в межах $10^3 - 10^5$ Ом. Формувальний опір повинен бути в межах $10^6 - 10^9$ Ом і забезпечувати сталу часу заряду геометричної ємності $C_g(R_0 + R_d)$ близько секунди. Тоді за час 3-4 с вона затухне і за більш пізніми відліками абсорбційного струму, можна буде визначити абсорбційну сталу часу.

Модельний струм через ізоляцію при підключенні вимірювального кола (рис. 2) до постійної напруги U_0 , як функція часу, буде мати три складових: постійну і дві експоненти із зарядною для геометричної ємності $1/a$ і абсорбційною $1/b$ сталими часу:

$$I = C + A \cdot \exp(-at) + B \cdot \exp(-bt). \quad (1)$$

Для того, щоб за модельною кривою абсорбційного струму теоретично визначити її параметри, ми пропонуємо скористатися трьохточковим методом, що дає можливість визначити сталі a і b , а потім розрахувати коефіцієнти кривої абсорбції. Далі, використовуючи формулу для струму витoku, записаному з врахуванням виразу для операторної провідності, теоретично можна визначити параметри елементів еквівалентної схеми заміщення, а потім і значення коефіцієнта абсорбції чи інших інтервальних діагностичних параметрів.

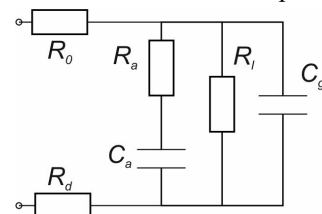


Рис. 2. Еквівалентна вимірювальна схема: R_0 – обмежувальний (формувальний) опір, R_d – опір вимірювального датчика, R_1 – наскрізний опір, R_a – опір абсорбції, C_a – ємність абсорбції, C_g – геометрична ємність

В рамках теоретичного методу, що пропонується, на інтервалі часу більше 10 с, де зарядна експонента вже не дає вкладу у струм витоку, вибирається три точки t_1 , t_2 і t_3 , такі, що $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. Для того, щоб мати можливість розраховувати коефіцієнт абсорбції R_{60}/R_{15} , рекомендується прийняти $t_1 = 15$ с, $t_2 = 37,5$ с і $t_3 = 60$ с.

Запропонований вибір трьох розрахункових точок дозволяє за рахунок віднімання $I(t_2) - I(t_1)$ і $I(t_3) - I(t_2)$ усунути постійну складову абсорбційного струму і тоді, при умові, що стала часу заряду геометричної ємності $C_g(R_0 + R_d) \approx 1$ с, а стала часу заряду абсорбційної ємності $C_a R_a > 3$ с, стала b на другому інтервалі з достатньою точністю може бути розрахована за формулою

$$b = \frac{\ln\left(\frac{I_4 - I_5}{I_5 - I_6}\right)}{t_5 - t_4}. \quad (2)$$

На першому інтервалі часу від 0 до 10 с потрібно вибрати три точки t_1 , t_2 і t_3 , також дотримуючись вигоди, щоб $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. Тоді зарядна стала a на першому інтервалі часу розраховується так

$$a = \frac{\ln\left(\frac{I_1 - I_2}{I_2 - I_3}\right)}{t_2 - t_1}. \quad (3)$$

$$Y_1 = \frac{R_d}{R_0 + R_d} \cdot \frac{p^2 + p(\alpha_{aa} + \alpha_{ga} + \alpha_{gl}) + \alpha_{aa}\alpha_{gl}}{p^2 + p(\alpha_{aa} + \alpha_{ga} + \alpha_{gl} + \alpha_{god}) + \alpha_{aa}(\alpha_{gl} + \alpha_{god})}; \quad (6)$$

$$\alpha_{aa} = \frac{1}{R_a C_a}; \alpha_{ga} = \frac{1}{R_a C_g}; \alpha_{gl} = \frac{1}{R_l C_g}; \alpha_{god} = \frac{1}{C_g(R_0 + R_{god})}; \quad (7)$$

$$I_1 = \frac{U_0}{R_0 + R_d} \cdot \left(\frac{\beta}{ab} + \frac{a^2 - aa + \beta}{a(a-b)} \exp(-at) - \frac{b^2 - ab + \beta}{b(a-b)} \exp(-bt) \right), \quad (8)$$

де α і β – коефіцієнти чисельника, a і b – абсолютні значення коренів знаменника провідності узагальненої схеми заміщення ізоляції в операторному вигляді, що дорівнюють оберненим величинам до сталих часу струму витоку.

Для коренів знаменника за теоремою Вієта справедливі рівності

$$\begin{aligned} a_1 + b_1 &= a + b = (\alpha_{ga} + \alpha_{aa} + \alpha_{gl} + \alpha_{god}); \\ b_1 &= ab = \alpha_{aa} \cdot (\alpha_{gl} + \alpha_{god}) \end{aligned} \quad (9)$$

Коефіцієнти чисельника α і β можна визначити через коефіцієнти абсорбційного струму A і C , враховуючи вирази для a_1 і b_1 згідно формули (9)

$$\beta = \frac{b_1 C (R_0 + R_d)}{U_0}; \quad (10)$$

$$\alpha = a + \frac{\beta}{a} - \frac{A a_1 (R_0 + R_d)}{U_0}. \quad (11)$$

Тепер можна перейти до визначення значень параметрів узагальненої схеми заміщення. Враховуючи, що R_0 і R_d відомі, а $\alpha_{god} = \alpha_1 - \alpha$, можна визначити геометричну ємність

$$C_g = \frac{1}{(a_1 - \alpha)(R_0 + R_d)}. \quad (12)$$

Далі, використовуючи рівності

$$\beta = \alpha_{aa} \cdot \alpha_{gl} \quad \text{і} \quad \alpha_{gl} = \frac{\alpha_{god} \cdot \beta}{b - \beta},$$

маємо

Коефіцієнти A , B і C визначаються з системи 3-х рівнянь, взятих для трьох значень модельної кривої абсорбційного струму, краще при малих значеннях часу, при яких система рівнянь буде краще визначеною і можна отримати точніші значення коефіцієнтів. Система рівнянь для визначення коефіцієнтів рівняння (1) буде мати вигляд

$$\begin{cases} a_1 A + b_1 B + C = I_1; \\ a_2 A + b_2 B + C = I_2, \end{cases} \quad (4)$$

де $a_i = \exp(-at_i)$, $b_i = \exp(-bt_i)$, $I_i = I(t_i)$.

Коефіцієнти рівняння A , B і C згідно рішення системи (4) в загальному вигляді дорівнюють значенням, які наведені в (5).

$$\begin{aligned} A &= \frac{(I_1 - I_2) \cdot (b_2 - b_3) - (I_2 - I_3) \cdot (b_1 - b_2)}{(a_1 - a_2) \cdot (b_2 - b_3) - (b_1 - b_2) \cdot (a_2 - a_3)}, \\ B &= \frac{I_1 - I_2 - A \cdot (a_1 - a_2)}{(b_1 - b_2)}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$C = I_1 - a_1 A - b_1 B.$$

Щоб записати формули для визначення значень параметрів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції запишемо в операторному виді її провідність (6). Цій провідності відповідає така часова залежність струму через ізоляцію (8)

$$R_l = \left(\frac{b}{\beta} - 1 \right) \cdot (R_0 + R_d), \quad (13)$$

а враховуючи, що

$$\alpha_{gl} = \frac{(a - \alpha) \cdot \beta}{b - \beta}, \quad \alpha_{aa} = \frac{\beta}{\alpha_{gl}} = \frac{b - \beta}{a - \alpha} \quad \text{і} \quad \alpha_{ga} = \alpha - \alpha_{aa} - \alpha_{gl},$$

знаходимо

$$R_a = \frac{(a - \alpha) \cdot (R_0 + R_d)}{\alpha - \frac{b - \beta}{a - \alpha} - \frac{a - \alpha}{b - \beta} \cdot \beta}, \quad (14)$$

$$C_a = \frac{1}{(R_0 + R_d) \cdot (b - \beta)} \left(\alpha - \frac{a - \alpha}{b - \beta} \beta - \frac{b - \beta}{a - \alpha} \right). \quad (15)$$

Слід зауважити, що, як показують більш детальні модельні розрахунки, правильне визначення параметрів схеми заміщення ізоляції запропонованим методом для модельного прикладу можливе тільки при певному їх співвідношенні. Стала часу заряду геометричної ємності $C_g(R_0 + R_d)$ повинна знаходитися в межах $0,2 < C_g(R_0 + R_d) < 1$ с, а тому необхідно попередньо знати або визначити ємність об'єкта вимірювання з відповідною точністю. Враховуючи, що для розрахунку коефіцієнта абсорбції визначають абсорбційний струм на 15 і 60 с після подачі напруги, стала часу $C_a R_a$ повинна бути більшою 3 с. Крім того, необхідно, щоб добуток $C_g R_l$ був більшим 0,5 с, а опір витоку R_l був меншим за абсорбційний опір R_a .

Щоб проілюструвати порядок використання трьохточкового методу розглянемо приклад розрахунку значень параметрів модельної узагальненої схеми заміщення ізоляції з використанням розрахункового абсорбційного струму для схеми з відомими значеннями параметрів. Прийнемо, що $R_d = 5 \cdot 10^3$ Ом, $R_0 = 2 \cdot 10^7$ Ом, $C_g = 7 \cdot 10^{-8}$ Ф, $R_l = 8 \cdot 10^{11}$ Ом, $C_a = 3 \cdot 10^{-8}$ Ф, $R_a = 6 \cdot 10^9$ Ом. Тоді, використовуючи формули (7) – (9) для абсорбційного струму, що протікає через модельну схему заміщення ізоляції, маємо вираз, за яким потрібно визначити індивідуальні значення параметрів елементів модельної схеми заміщення

$$I = 1,69 \cdot 10^8 e^{(-0,0055t)} + 4,98 \cdot 10^6 e^{(-0,716t)} + 1,25 \cdot 10^{-10} \quad (16)$$

Для визначення значень сталих часу експонент модельної абсорбційної кривої на першому інтервалі вибираємо значення часу 1, 2 і 3 с, а на другому – 15, 37,5 і 60 с. За формулами (2) і (3) знаходимо, що $a = 5,5 \cdot 10^{-3}$, $b = 0,7164$, що практично співпадає зі значеннями сталих часу в рівнянні (16). Тепер можна знайти розрахункові коефіцієнти рівняння, що дорівнюють відповідно $A = 1,686 \cdot 10^{-8}$, $B = 4,982 \cdot 10^{-6}$ і $C = 1,25 \cdot 10^{-10}$ і точно співпадають з дійсними значеннями коефіцієнтів. Вирахувавши a_1 і b_1 , знаходимо за формулами (10) і (11) $\alpha = 8 \cdot 10^{-3}$, що точно відповідає вихідному значенню, та дещо занижене $\beta = 9,9196 \cdot 10^{-8}$ при точному значенні $9,9206 \cdot 10^{-8}$. Маючи всі необхідні значення, розрахуємо за формулами (12) – (15) значення параметрів схеми заміщення ізоляції: $C_g = 7 \cdot 10^{-8}$ Ф, $R_l = 8 \cdot 10^{11}$ Ом, $C_a = 3 \cdot 10^{-8}$ Ф, $R_a = 8 \cdot 10^{11}$ Ом, що співпадають з вихідними значеннями з точністю до четвертого знака після десяткової коми.

Наведений приклад розрахунку також можна використати для теоретичної ілюстрації переваги знання індивідуальних значень індивідуальних параметрів схеми заміщення ізоляції перед формальним використанням коефіцієнта абсорбції. Коефіцієнт абсорбції для модельної розрахункової схеми дорівнює 1,18, що на практиці дало б формальні підстави для виведення ізоляції з експлуатації внаслідок незадовільних характеристик. Однак, якщо врахувати, що наскрізний опір витoku має значення $8 \cdot 10^{11}$ Ом, а розрахунковий $\text{tg} \delta$ на електропровідність має значення $5,7 \cdot 10^{-8}$, то можна прийти до протилежного висновку – ізоляція має задовільні характеристики і пробій їй не загрожує.

Таким чином, теоретична перевірка запропонованої модельної методики показує, що тільки у випадку, коли необхідні співвідношення між значеннями параметрів ізоляції і, відповідно, схеми її заміщення, мають місце, розрахунки індивідуальних значень дають хорошу точність. Але необхідно мати на увазі, що при виході за наведені вище межі значень параметрів точність досить різко погіршується.

Теоретично підвищити точність визначення значень параметрів схеми заміщення можна шляхом проведення двох розрахунків. Перший розрахунок повинен проводитися при умові, що R_0 і $R_d \ll R_a$ і R_b , і впливом зовнішніх опорів на абсорбційний струм можна знехтувати. При цьому

$$I = U_0 \left(\frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_a} \exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right) \right),$$

де $\tau_a = C_a R_a$ – абсорбційна стала часу.

Вибравши три значення часу в області спаду абсорбційної кривої як і раніше так, щоб $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \Delta t$, використовуючи значення струму I_1 , I_2 і I_3 , знаходимо

їх різниці $dI_{12} = I_1 - I_2$, $dI_{23} = I_2 - I_3$ і значення абсорбційної сталої часу

$$\tau_a = \frac{\Delta t}{\ln(dI_{12}/dI_{23})}. \quad (17)$$

Тепер можна розрахувати абсорбційний опір

$$R_a = \frac{U_0}{\Delta I_{12}} \left(\exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right) - \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_a}\right) \right), \quad (18)$$

абсорбційну ємність

$$C_a = \tau_a / R_a, \quad (19)$$

і наскрізний опір

$$R_l = \frac{U_0}{I(t_1) - \frac{U_0}{R_a} \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_a}\right)}. \quad (20)$$

На другому етапі потрібно проводити розрахунок, вибираючи R_0 приблизно 10^6 Ом, щоб сформувавши зарядну експоненту, за формулами (2) і (3) знайти сталі часу a і b , а потім, враховуючи, що інші параметри вже відомі практично точно, розрахувати наближене значення C_g , за формулою

$$C_n = (ab C_a R_a (R_0 + R_d))^{-1}. \quad (21)$$

Якщо зарядна стала часу $C_g(R_0 + R_d)$ знаходиться в межах від 0,2 с до 1 с, то C_g буде визначено з точністю не гірше кількох відсотків, якщо ні, то вибирають нове значення R_0 , що задовольняє наведеній умові, і повторюють розрахунок. Таким чином, у цьому випадку, незважаючи на більшу кількість роботи, можна отримати точні значення трьох параметрів, що визначають коефіцієнт абсорбції, і наближене значення четвертого.

Теоретично можна визначити всі значення параметрів схеми заміщення ізоляції трьохточковим методом і при однократному розрахунку шляхом використання, крім кривої абсорбції, ще й відновлюваної напруги. Для цього спочатку повторюється перший етап попереднього розрахунку і фіксуються значення абсорбційного струму, необхідні для точного визначення R_l , R_a і C_a , а потім при моделюванні методу відновлюваної напруги (короткочасне закорочування ізоляції для розряду геометричної ємності на малий опір і вимірювання електростатичним вольтметром або вольтметром з опором, що значно перевищує опір ізоляції, відновлюваної напруги на ізоляції, що виникає внаслідок заряду геометричної ємності від абсорбційної) визначається ємнісний коефіцієнт абсорбції

$$k_c = \frac{U_{v\max}}{U_0} = \frac{C_a}{C_g + C_a},$$

де $U_{v\max}$ – максимальне значення відновлюваної напруги, і геометрична ємність

$$C_g = C_a \left(\frac{1}{k_c} - 1 \right). \quad (22)$$

Зауважимо, що при такому модельному визначенні відновлюваної напруги, ємнісного коефіцієнта абсорбції і геометричної ємності нехтують можливим розрядом ємностей ізоляції через її наскрізний опір в процесі заряду геометричної ємності від абсорбційної, що може привести до деякого завищення значення знайденої геометричної ємності.

Більш детальне теоретичне дослідження відновлюваної напруги можна провести, знаючи значення параметрів схеми заміщення ізоляції. Розглянемо ви-

падок з включенням R_d і R_0 в розрядну схему, коли після заряду ізоляції і відключення джерела напруги, відбувається короткочасне закорочування. Вважаючи R_d настільки малим (меншим або рівним 10^4 Ом), що ним можна знехтувати, розглянемо перерозподіл заряду між ємностями C_a і C_g , а також розряд C_a через R_a , R_0 та R_l і C_g через R_l і R_0 при умові, що C_a заряджена до U_{ca} , а заряд на C_g нульовий. Позначивши

$$\frac{R_l R_0}{R_l + R_0} = R_{de},$$

з системи рівнянь для струмів I_1 і I_2 в операторній формі, враховуючи, що $U_{rg} = I_2 / (pC_g)$, запишемо вираз для I_2 :

$$I_2 (R_{de} + R_a) \left[\frac{(p + \alpha_{gde})(p + \alpha_{aade})}{p} - \frac{R_{de}}{(R_{de} + R_a)} \right] = -U_{ca},$$

де $\alpha_{gde} = C_g R_{de}$, $\alpha_{aade} = C_a (R_a + R_{de})$, і для відновлюваної напруги в операторній формі маємо

$$U_{rg} = \frac{I_2}{pC_g} = -\frac{U_{ca}}{C_g R_{de}} \frac{p}{(p + \alpha_{aa})(p + \alpha_{gdee})},$$

або в функції часу

$$U_{rg} = \frac{U_{ca}}{C_g R_{de}} \frac{\exp(-\alpha_{aa}t) - \exp(-\alpha_{gdee}t)}{\alpha_{aa} - \alpha_{gdee}}.$$

Тепер можна розрахувати час, при якому відновлювана напруга має екстремум

$$t_{\max} = \frac{\ln(\alpha_{aa}) - \ln(\alpha_{gdee})}{\alpha_{aa} - \alpha_{gdee}},$$

максимальне значення відновлюваної напруги

$$U_{r\max} = -\frac{U_{ca}}{\alpha_{gdee} C_g R_a} \left(\frac{\alpha_{gdee}}{\alpha_{aa}} \right)^{\alpha_{aa} - \alpha_{gdee}}$$

і швидкість відновлення напруги на геометричній ємності, що при $t = 0$ становить

$$\left. \frac{dU_r}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_{ca}}{C_g R_a}$$

і залежить не тільки від параметрів схеми заміщення ізоляції, а і від значення напруги U_{ca} , до якого заряджена ємність C_a . Для класичного варіанту визначення відновлюваної напруги, коли спочатку геометрична і абсорбційна ємності заряджаються до максимального значення напруги U_0 , отримані формули будуть справедливими, якщо прийняти $U_{ca} = U_0$. Зауважимо, що характеристики відновлюваної напруги, що використовуються для діагностування в [4] і в інших роботах, можливо також розрахувати за визначеними індивідуальними значеннями параметрів елементів схеми заміщення, не проводячи додаткових вимірювань.

Щоб впевнитися в цьому, врахуємо, що напругу U_{ca} на абсорбційній ємності можна отримати при неповному заряді ізоляції. Якщо геометричну ємність заряджати через невеликий опір ($10^6 - 10^7$) Ом, так щоб її стала заряду була менше 0,1 секунди, то при такій сталій часу абсорбції на ізоляції фактично вже через секунду буде мати місце напруга, що дорівнює прикладеній U_0 , а абсорбційна ємність буде заряджатися з абсорбційною сталою часу і напруга на ній буде

$$U_a = U_0 (1 - \exp(-\alpha_{aa}t)).$$

Якщо обмежити процес подачі постійної напруги на ізоляцію через невеликий обмежувальний опір часом

$$\Delta t = -\frac{1}{\alpha_{aa}} \ln \left(1 - \frac{U_{ca}}{U_0} \right),$$

абсорбційна ємність зарядиться до напруги U_{ca} . Потім потрібно за короткий час розрядити геометричну ємність на малий опір до нульової напруги і зафіксувати зростання напруги на геометричній ємності за рахунок її заряду від абсорбційної, яке описано вище.

Перерахунок параметрів узагальненої еквівалентної схеми до інших схем заміщення ізоляції. Використовуючи знайдені вище значення параметрів узагальненої еквівалентної схеми заміщення ізоляції, можна знайти індивідуальні значення параметрів і для інших чотирихелементних схем, що відображають можливість протікання наскрізного струму (див. рис. 1). Теоретично умови тотожності реакції на дію зовнішнього постійного електричного поля можна отримати, наприклад, шляхом прирівнювання їх перехідних характеристик в операторному вигляді.

Вибравши в якості основної розглянуту вище узагальнену схему заміщення, зображену на рис. 1,а, взаємозв'язок між параметрами різних еквівалентних схем, що відповідатимуть одній і тій самій часовій залежності струму через діелектрик, будемо знаходити, розв'язуючи системи рівнянь, отриманих прирівнюванням відповідних коефіцієнтів перехідних провідностей в операторному вигляді при різних степенях оператора p . Паралельно розглянемо також перехід від значень параметрів еквівалентних схем заміщення ізоляції до значень параметрів узагальненої схеми заміщення і наведемо формули для обчислення коефіцієнта абсорбції для різних схем заміщення ізоляції. Для еквівалентної схеми двохшарового діелектрика (рис. 1,б) провідність в операторному вигляді дорівнює

$$Y_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \frac{p^2 + p(\alpha_{11} + \alpha_{22}) + \alpha_{11} \alpha_{22}}{p + \alpha_{2e}}, \quad (23)$$

$$\text{де } \alpha_{11} = \frac{1}{R_1 C_1}; \quad \alpha_{22} = \frac{1}{R_2 C_2}; \quad \alpha_{2e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}.$$

З порівняння формул (6) для Y_1 і (23) для Y_2 запишемо систему рівнянь для переходу від схеми заміщення (рис. 1,б) до схеми заміщення (рис. 1,а) і навпаки, використовуючи параметри елементів еквівалентних схем:

$$C_g = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}; \quad (24)$$

$$\frac{1}{C_a R_a} \frac{1}{C_g R_l} = \frac{1}{C_1 R_1} \frac{1}{C_2 R_2}; \quad (25)$$

$$\frac{1}{C_g R_a} + \frac{1}{C_a R_a} + \frac{1}{C_g R_l} = \frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_2 R_2}; \quad (26)$$

$$\frac{1}{C_a R_a} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}. \quad (27)$$

Рівняння (24) зразу ж дає вираз C_g через C_1 і C_2 . З рівняння (25), враховуючи рівняння (24) і (27), маємо

$$R_l = R_1 + R_2. \quad (28)$$

Підставивши в рівняння (26) відповідні значення і здійснивши необхідні перетворення, а також враховуючи вираз (7) для α_{aa} , отримуємо

$$R_a = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) \cdot (C_1 + C_2)}{(C_1 R_1 - C_2 R_2)^2}; \quad (29)$$

$$C_a = \frac{(C_1 R_1 - C_2 R_2)^2}{(C_1 + C_2)(R_1 + R_2)^2}. \quad (30)$$

Зворотне визначення коефіцієнтів для переходу від схеми (рис. 1,а) до схеми (рис. 1,б) краще проводити, визначивши спочатку α_{11} і α_{22} . Для знаходження α_{11} і α_{22} використаємо систему двох рівнянь (25) і (26), записану у вигляді

$$\begin{cases} \alpha_{11}\alpha_{22} = \alpha_{aa}\alpha_{gl} = A; \\ \alpha_{11} + \alpha_{22} = \alpha_{aa} + \alpha_{ga} + \alpha_{gl} = B. \end{cases} \quad (31)$$

Знайшовши α_{11} і α_{22} , а також враховуючи рівняння (27) і (28), можна записати параметри елементів схеми заміщення ізоляції (рис. 1,б) через параметри елементів схеми заміщення (рис. 1,а), а також вираз для коефіцієнта абсорбції:

$$R_1 = R_l \frac{\alpha_{22}(\alpha_{11} - \alpha_{aa})}{\alpha_{aa}(\alpha_{11} - \alpha_{22})}; \quad R_2 = R_l \frac{\alpha_{11}(\alpha_{22} - \alpha_{aa})}{\alpha_{aa}(\alpha_{22} - \alpha_{11})};$$

$$C_1 = \frac{\alpha_{aa}(\alpha_{11} - \alpha_{22})}{R_l \alpha_{11} \alpha_{22} (\alpha_{11} - \alpha_{aa})}; \quad C_2 = \frac{\alpha_{aa}(\alpha_{22} - \alpha_{11})}{R_l \alpha_{11} \alpha_{22} (\alpha_{22} - \alpha_{aa})}.$$

Коефіцієнт абсорбції для схеми (рис. 1,б) дорівнює

$$k_a = \frac{1 + d_{1b} \exp(-60\alpha_{1b})}{1 + d_{1b} \exp(-15\alpha_{1b})},$$

$$\text{де } d_{1b} = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)^2}, \quad \alpha_{1b} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}.$$

Для схеми заміщення (рис. 1,б) маємо перехідну характеристику у вигляді

$$Y_3 = C_g \frac{p^2 + p(\alpha_{gs} + \alpha_{3s} + \alpha_{33}) + \alpha_{gs}\alpha_{33}}{p + \alpha_{3e}}, \quad (32)$$

$$\text{де } \alpha_{gs} = \frac{1}{R_s C_g}; \quad \alpha_{3s} = \frac{1}{R_3 C_s}; \quad \alpha_{3e} = \frac{R_s + R_3}{R_s R_3 C_1}.$$

Порівнявши коефіцієнти при різних степенях оператора p в чисельнику і знаменнику для (32) і (6), отримуємо формули перерахунку коефіцієнтів узагальненої схеми заміщення ізоляції (рис. 1,а) до коефіцієнтів схеми (рис. 1,б) і навпаки. З врахуванням того, що C_g залишається без змін, маємо:

$$C_g = C_g, R_l = R_3 + R_s, R_a = \frac{R_s}{R_3} (R_3 + R_s), C_a = C_3 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_s} \right)^2.$$

Зворотному переходу від схеми (рис. 1,а) до схеми (рис. 1,б) відповідають формули:

$$C_g = C_g, R_3 = \frac{R_l^2}{R_a + R_l}, R_s = \frac{R_a R_l}{R_a + R_l}, C_3 = C_a \left(1 + \frac{R_a}{R_l} \right)^2,$$

а коефіцієнт абсорбції, виражений через значення параметрів елементів схеми (рис. 1,б), дорівнює

$$k_a = \frac{R_s + R_3 \exp(-60\alpha_{1v})}{R_s + R_3 \exp(-15\alpha_{1v})}, \quad \alpha_{1v} = \frac{R_s + R_3}{R_s R_3 C_3}.$$

Для схеми (рис. 1,з) перехідна провідність в операторному вигляді дорівнює

$$Y_4 = \frac{C_4 C_s}{C_4 + C_s} \cdot \frac{p^2 + p(\alpha_{sl} + \alpha_{4l} + \alpha_{44}) + \alpha_{sl}\alpha_{44}}{p + \alpha_{4e}}, \quad (33)$$

$$\text{де } \alpha_{sl} = \frac{1}{R_l C_s}; \quad \alpha_{4s} = \frac{1}{R_l C_4}; \quad \alpha_{4e} = \frac{1}{R_4 (C_4 + C_s)}.$$

Перехід від схеми (рис. 1,з) до схеми (рис. 1,а), з врахуванням формули (33) та очевидної рівності R_b , можливий за отриманими в результаті розв'язання відповідної системи рівнянь формулами:

$$R_l = R_l, C_g = \frac{C_s C_4}{C_s + C_4}, R_a = R_4 \left(1 + \frac{C_4}{C_s} \right)^2, C_a = \frac{C_s^2}{(C_s + C_4)}.$$

Перехід від схеми (рис. 1,а) до схеми (рис. 1,з) і коефіцієнт абсорбції описується формулами

$$R_l = R_l, C_s = C_g + C_a, C_4 = C_g \left(1 + \frac{C_g}{C_a} \right), R_4 = R_a \left(\frac{C_a}{C_a + C_g} \right)^2.$$

Коефіцієнт абсорбції для схеми (рис. 1,з)

$$k_a = \frac{R_4 + d_{1g} \exp(-60\alpha_{1g})}{R_4 + d_{1g} \exp(-15\alpha_{1g})},$$

$$\text{де } d_{1g} = \frac{C_b^2 R_b}{(C_b + C_4)^2}; \quad \alpha_{1g} = \frac{1}{(C_b + C_4) R_4}.$$

Для ілюстрації еквівалентності схем заміщення ізоляції розглянемо, як приклад, випадок, коли визначені значення параметрів елементів узагальненої еквівалентної схеми ізоляції дорівнюють $C_g = 10^{-9}$ Ф, $C_a = 10^{-10}$ Ф, $R_l = 10^{12}$ Ом, $R_a = 2 \cdot 10^{11}$ Ом. Тоді розрахункові значення параметрів елементів інших еквівалентних схем будуть: для схеми (рис. 1,б) – $C_1 = 1,098 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_2 = 1,114 \cdot 10^{-8}$ Ф, $R_1 = 9,968 \cdot 10^{11}$ Ом, $R_2 = 1,557 \cdot 10^9$ Ом; для схеми (рис. 1,в) – $C_g = 9,997 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_3 = 1,353 \cdot 10^{-10}$ Ф, $R_p = 1,69 \cdot 10^{11}$ Ом, $R_3 = 8,31 \cdot 10^{11}$ Ом; для схеми (рис. 1,з) – $C_b = 1,093 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_2 = 1,169 \cdot 10^{-8}$ Ф, $R_b = 9,999 \cdot 10^{11}$ Ом, $R_2 = 1,486 \cdot 10^9$ Ом.

Як свідчить розрахунок за перерахованими значеннями параметрів, різні схеми заміщення дають практично одні й ті самі абсорбційні криві і один і той же коефіцієнт абсорбції, який для даного випадку дорівнює 2,156. В той же час, інтерпретація результатів в залежності від схеми заміщення ізоляції буде різною внаслідок, як вже відзначалося, різної структури схем.

Автори хотіли б зробити кілька зауважень щодо практичного застосування методики визначення індивідуальних значень параметрів елементів схем заміщення ізоляції, що пропонується в даній статті.

На практиці, навіть знання значень параметрів схеми заміщення не приводить до однозначної інтерпретації отриманих в процесі діагностування результатів. При оцінці технічного стану електричної ізоляції слід враховувати, що зміні R_l будуть відповідати як оборотні, так і необоротні зміни в ізоляції. З оборотних змін необхідно виділити, перш за все, нагрівання і зволоження ізоляції. Необоротні зміни в ізоляції можуть виникати внаслідок дифузійних, хімічних, електрохімічних процесів або в результаті механічного руйнування по термофлуктуаційному механізму. В першу чергу на опір витоку повинні впливати обвуглювання органічних компонентів при значних перегріваннях, утворення провідникових каналів (трекінг чи трірінг) в результаті дії часткових розрядів на органічні матеріали або відновлення оксидів металів внаслідок електролізу, особливо при постійній напрузі, у випадку неорганічних матеріалів.

Зростання C_a буде свідчити про зростання ступеня макронеоднорідності (утворення в ізоляції макроскопічних дефектів, таких як тріщини, порожнини, розшарування і т.п., а також локальну зміну електрофізичних характеристик внаслідок старіння в неоднорідному полі), а зниження R_a – про зростання дефектності ізоляції на мікроскопічному рівні.

При практичному використанні запропонованої нами методики, знання індивідуальних значень пара-

метрів апіорно вибраних схем заміщення ізоляції при наявності інформації про склад, властивості і режим експлуатації ізоляції, також дозволить визначити вклад різних фаз у властивості неоднорідної чи композиційної ізоляції і орієнтуватися в фізичній суті процесів, що відбуваються при її старінні в експлуатації. Однак, через велику різноманітність структур і комбінацій властивостей компонентів ізоляції питання інтерпретації результатів вимірювання вимагають в кожному конкретному випадку окремого розгляду.

Висновки. В статті викладені наукові основи методики визначення індивідуальних значень параметрів елементів чотирьохелементних схем заміщення ізоляції на прикладі узагальної схеми заміщення. Для розрахунку цих значень використано трьох точковий метод, коли відліки значень абсорбційного струму вибираються так, щоб $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$, при цьому постійна складова струму усувається, і параметри експоненціальних складових, що використовуються при розрахунках значень параметрів послідовно визначаються без похибки. Наведені формули для взаємного перерахунку індивідуальних значень параметрів елементів чотирьохелементних схем заміщення ізоляції з наскрізною провідністю і показано, що точність перерахунку задовільна. Показана можливість конструювання відомих діагностичних параметрів, використовуючи індивідуальні значення параметрів елементів узагальної схеми заміщення ізоляції.

Констатується, що в рамках абсорбційних методів діагностування задача визначення технічного стану ізоляції за результатами дослідження відгуку на ступінчасту напругу не має однозначного рішення. Вибір схеми заміщення і інтерпретація результатів вимірювання повинні ґрунтуватися на апіорній інформації про процеси, що відбуваються в ізоляції, або гіпотезі про її структуру і властивості.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Проценко О.Р. Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.
2. Németh B., Csépes G., Vörös C. Applicability of the dielectric response methods of diagnostics of power transformers: Hungarian experiences. *2011 Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2011, pp. 49-53. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2011.5996114>.
3. Saha T.K., Purkait P., Muller F. Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 149-157. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835436>.
4. Soni G., Dutta S., Baral A. Condition Monitoring of Power Transformer Insulation by Return Voltage Measurement. *2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, 2021, pp. 108-112. doi: <https://doi.org/10.1109/CATCON52335.2021.9670485>.
5. Sarkar S., Sharma T., Baral A., Chatterjee B., Dey D., Chakravorti S. A new approach for determination of moisture in paper insulation of in-situ power transformers by combining polarization-depolarization current and return voltage measurement results. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 2325-2334. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678886>.
6. Gavrilă D.E., Ciprian I., Gavrilă H.C. Applying the Recovery Voltage Method (RVM) to Study the Degradation of High Power Transformer Insulation. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 911, pp. 260-265. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.911.260>.

7. Martinez M., Pleite J. Improvement of RVM Test Interpretation Using a Debye Equivalent Circuit. *2019 6th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, 2019, pp. 105-110. doi: <https://doi.org/10.23919/ARWtr.2019.8930187>.
8. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання. – Северодонецьк: вид-во СЧУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.
9. Хамевко О.М., Сушко Д.Л. Аналіз методів контролю і діагностичних параметрів ізоляції тягових двигунів постійного струму. *Збірник наукових праць Української Державної Академії залізничного транспорту*, 2014, № 147, С. 152-155. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.147.2014.75121>.
10. IEEE Std 43-2000. *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*, 2000, 28 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.91301>.
11. Stone G.C., Sasic M. Experience with DC polarization-depolarization measurements on stator winding insulation. *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013, pp. 7-10. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554191>.
12. Tamus Z.A., Berta I. Application of voltage response measurement on low voltage cables. *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009, pp. 444-447. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166387>.
13. Filipović-Grčić B., Filipović-Grčić D., Uglešić I. Modeling of polarization in oil-paper insulation using recovery voltage measurements. *International Review of Electrical Engineering*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 430-437.
14. Безпрозванных Г.В., Костюков І.О., Москвітін Є.С. Розділення абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції за кривими відновленої напруги силових високовольтних кабелів. *Технічна електродинаміка*, 2021, № 6, С. 13-19. doi: <https://doi.org/10.15407/techne2021.06.013>.
15. Bezprozvannyh, G. V., Moskvitin, E. S., & Kyessayev, A. G. The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 5, pp. 63-68. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.5.09>.
16. СОУ-Н-ЕЕ-20.302:2007. Норми-випробування електрообладнання. Київ, ДП МОУ «Воєнне видавництво України «Варта», 2007. – 262 с.
17. Беспрозванных А.В. Физическая интерпретация кривых восстанавливающегося напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика. *Технічна електродинаміка*, 2009, № 6, С. 23-27.
18. Bezprozvannyh G.V., Kostjukov I.A. Error of control of electrical insulation structures by dielectric absorption parameters according to the concept of uncertainty of measurements. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.07>.
19. Bezprozvannyh G.V., Kostjukov I.A. A method of wavelet analysis of time series of parameters of dielectric absorption of electrical insulating structures. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 2, pp. 52-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.08>.
20. Kyrylenko V.M., Kyrylenko K.V., Budko M.O., Denysiuk P.L. Reasoning of additional diagnostic parameters for electric insulation diagnostics by absorption methods. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 6, pp. 39-45. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.06>.

REFERENCES

1. Protsenko O.R. *Diagnostics of the electrical equipment condition. Course of lectures*. Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ., 2022. 162 p. (Ukr).
2. Németh B., Csépes G., Vörös C. Applicability of the dielectric response methods of diagnostics of power transformers: Hungarian experiences. *2011 Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2011, pp. 49-53. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2011.5996114>.
3. Saha T.K., Purkait P., Muller F. Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 149-157. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835436>.

4. Soni G., Dutta S., Baral A. Condition Monitoring of Power Transformer Insulation by Return Voltage Measurement. *2021 IEEE 5th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, 2021, pp. 108-112. doi: <https://doi.org/10.1109/CATCON52335.2021.9670485>.
5. Sarkar S., Sharma T., Baral A., Chatterjee B., Dey D., Chakravorti S. A new approach for determination of moisture in paper insulation of in-situ power transformers by combining polarization-depolarization current and return voltage measurement results. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 2325-2334. doi: <https://doi.org/10.1109/TDEL.2013.6678886>.
6. Gavrila D.E., Ciprian I., Gavrila H.C. Applying the Recovery Voltage Method (RVM) to Study the Degradation of High Power Transformer Insulation. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 911, pp. 260-265. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.911.260>.
7. Martinez M., Pleite J. Improvement of RVM Test Interpretation Using a Debye Equivalent Circuit. *2019 6th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, 2019, pp. 105-110. doi: <https://doi.org/10.23919/ARWtr.2019.8930187>.
8. Hubarevych O.V. *Reliability and diagnostics of electrical equipment*. Syevyerodonetsk, V. Dahl EUNU Publ., 2016. 248 p. (Ukr).
9. Khamevko O.N., Sushko D.L. Analysis of methods control and diagnostic parameters isolation the traction engine of direct current. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 2014, no. 147, pp. 152-155. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.147.2014.75121>.
10. *IEEE Std 43-2000. Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*, 2000, 28 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.91301>.
11. Stone G.C., Sasic M. Experience with DC polarization-depolarization measurements on stator winding insulation. *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013, pp. 7-10. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554191>.
12. Tamus Z.A., Berta I. Application of voltage response measurement on low voltage cables. *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009, pp. 444-447. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166387>.
13. Filipović-Grčić B., Filipović-Grčić D., Uglešić I. Modeling of polarization in oil-paper insulation using recovery voltage measurements. *International Review of Electrical Engineering*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 430-437.
14. Bezprozvannyh G.V., Kostukov I.O., Moskvitin E.S. Differentiation of absorption processes in inhomogeneous insulation by curve of recovery voltage of power high voltage cables. *Technical Electrodynamics*, 2021, no. 6, pp. 13-19. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.013>.
15. Bezprozvannyh, G. V., Moskvitin, E. S., & Kyessayev, A. G. The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 5, pp. 63-68. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.5.09>.
16. *SOU-N-EE-20.302:2007. Testing norms for electrical equipment*. Kyiv, DP MOU «Voienne vydavnytstvo Ukrainy «Varta», 2007. 262 p. (Ukr).
17. Bezprozvannyh G.V. Physical interpretation of the recovery voltage curves based on the equivalent circuits of an inhomogeneous dielectric. *Technical Electrodynamics*, 2009, no. 6, pp. 23-27. (Rus).
18. Bezprozvannyh G.V., Kostiukov I.A. Error of control of electrical insulation structures by dielectric absorption parameters according to the concept of uncertainty of measurements. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.07>.

How to cite this article:

Kyrylenko V.M., Kyrylenko K.V. Determination of individual values of four-element equivalent circuits elements parameters at technical diagnostics of insulation by absorption methods. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 4, pp. 65-74. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.4.10>

19. Bezprozvannyh G.V., Kostiukov I.A. A method of wavelet analysis of time series of parameters of dielectric absorption of electrical insulating structures. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 2, pp. 52-58. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.08>.
20. Kyrylenko V.M., Kyrylenko K.V., Budko M.O., Denysiuk P.L. Reasoning of additional diagnostic parameters for electric insulation diagnostics by absorption methods. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 6, pp. 39-45. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.06>.

Надійшла (Received) 09.07.2022
 Прийнята (Accepted) 04.10.2022
 Опублікована (Published) 01.07.2023

Кириленко Всеволод Михайлович¹, к.т.н., доц.,
 Кириленко Катерина Всеволодівна¹, к.т.н.,
¹ Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
 03056, Київ, пр. Перемоги, 37,
 e-mail: vsemychkirg@gmail.com (Corresponding Author)

V.M. Kyrylenko¹, K.V. Kyrylenko¹
¹ National Technical University of Ukraine
 «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
 37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Theoretical determination of individual values of insulation four-element equivalent circuits elements parameters at technical diagnostics of insulation by absorption methods.

The aim of this article is to present a methodology of determining of the individual values of the parameters of four-element equivalent circuits for insulation with through conductivity. **Methodology.** The proposed method consists in the fact that at a time interval of more than 10 s, when the charge indicator no longer contributes to the leakage current, three points t_1 , t_2 and t_3 are selected, such that $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. To be able to determine the absorption coefficient R_{60}/R_{15} , it is recommended to take $t_1 = 15$ s, $t_2 = 37.5$ s and $t_3 = 60$ s. At the same time, by subtracting $I(t_2) - I(t_1)$ and $I(t_3) - I(t_2)$, the constant component of the absorption curve is excluded and it becomes possible to determine the individual values of the parameters of the generalized equivalent circuit of insulation, additionally using its conductivity in operator form. **Results.** As calculations show, the correct determination of the parameters of insulation equivalent circuit according to the proposed method is possible only with a certain ratio of these parameters. The charge time of the geometric capacitance $C_g(R_0+R_d)$, where R_0 and R_d are the resistance that forms the charging exponent, and the resistance of the sensor, should be within 0.2 s $< C_g(R_0+R_d) < 1$ s, the time constant $C_a R_n$, where C_a and R_n are the capacitance and resistance of the absorption chain, should be more than 3 s, the product of $C_a R_l$, where R_l is the leakage resistance, more 0.5 s, the leakage resistance R_l is less than the absorption resistance R_n . Checking the methodology on a model example gives the values of the parameters of the insulation equivalent circuit that match the specified ones with high accuracy. **Practical value.** The use of individual values of the parameters of insulation equivalent circuits when applying absorption diagnostic methods with considering the time values and dimensional factors, allow to calculate all currently used diagnostic parameters, to determine the conditions of certain insulation types, as well as in more detail, in comparison with the existing approach, to assess the technical condition of the insulation and the reasons of its changes. References 20, figures 2.

Key words: non-destructive methods of insulation diagnostics, absorption methods of diagnostics, parameters of elements of insulation equivalent circuits.