

Бржезицький В. О.,
Гаран Я. О.

АНАЛІЗ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ В ОБМОТЦІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ

Виконано аналіз розподілу ємнісних струмів в витках багат шарових обмоток високовольтних автотрансформаторів напруги. Визначено відмінність розподілу ємнісних струмів для першого шару витків та всіх інших шарів обмотки. Запропонований метод врахування впливу ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги на розподіл загального спадання напруги по витках обмотки.

Ключові слова: автотрансформатор напруги, ємнісний струм, спадання напруги, міжшарова ємність.

1. Вступ

Автотрансформатор — це різновид трансформатора — статичний електромагнітний пристрій, в якому, на відміну від трансформатора, первинна та вторинна обмотки мають як магнітний, так і електричний зв'язок, призначений для перетворення однієї чи кількох систем змінного струму в одну чи кілька інших систем змінного струму [1]. Автотрансформатори, як правило, поділяються на силові, призначені для перетворення параметрів потужності в електричних колах високої напруги, та індуктивні подільники напруги, які, зазвичай, використовують в якості низьковольтних прецизійних масштабних перетворювачів напруги [2, 3].

Як масштабний перетворювач напруги, високовольтний однофазний автотрансформатор напруги, як правило, має одну чи декілька високовольтних вхідних частин обмотки та одну чи декілька вихідних частин обмотки, розрахованих на номінальні напруги в кілька десятків або сотень вольт, призначених для приєднання низьковольтних вимірювальних приладів. Оскільки вхідна напруга високовольтного автотрансформатора напруги може сягати сотень кіловольт, такі автотрансформатори можуть мати значні коефіцієнти трансформації (порядку 1000 ... 10000 одиниць). Внаслідок великої кількості витків обмотки високовольтного автотрансформатора напруги, який працює в режимі, наближеному до холостого ходу (якщо приєднаний до вихідної частини його обмотки низьковольтний вимірювальний прилад має значний вхідний комплексний опір), струм холостого ходу є незначним. Одночасно, технічне виконання високовольтної обмотки з великою кількістю витків вимагає щільного розташування цих витків задля зменшення габаритів та маси активної частини. Внаслідок щільного розташування витків високовольтної обмотки між витками з різними потенціалами можуть виникати суттєві ємнісні струми, викликані складною картиною розподілу електричного поля між цими витками та формуванням електричних зарядів на границях розподілу провідних частин витків обмотки та ізоляції.

Складні ємнісні зв'язки між окремими витками обмотки високовольтного автотрансформатора напруги

подібні до ємнісних зв'язків в високовольтних обмотках трансформаторів напруги, які досліджуються в ряді робіт, наприклад [4]. Як правило, дослідження частотних характеристик трансформаторів напруги, пов'язаних з дією ємностей та індуктивностей окремих частин обмоток високовольтних трансформаторів напруги, виконуються з метою дослідження резонансних частот трансформаторів, за яких можливі суттєві перенапруги та пошкодження ізоляції обмоток [4]. Однак, за умови малого значення струмів холостого ходу, ємнісні струми можуть сягати одного порядку з ними, або бути незначно меншими, навіть для робочої частоти автотрансформаторів. Такі струми можуть мати суттєвий вплив на фактичний коефіцієнт трансформації, оскільки вони по різному розподіляються по високовольтній та низьковольтній обмотках трансформатора напруги. Ще більш суттєвим цей вплив може бути для високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги, оскільки його вихідна частина обмотки має електричний зв'язок з високовольтною частиною, причому, ємнісні струми мають можливість перетікати у низьковольтну частину обмотки та безпосередньо впливати на коефіцієнт масштабного перетворення напруги.

Тому дослідження розподілу ємнісних струмів в обмотці високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги є актуальним, особливо, для автотрансформаторів зі значними номінальними коефіцієнтами ділення.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження в даній роботі є ємнісні струми в обмотках високовольтних вимірювальних автотрансформаторів напруги. Як відомо, ємнісні струми суттєво залежать від частоти прикладеної напруги. В даному дослідженні розглядаються ємнісні струми за умови прикладення до обмотки високовольтного вимірювального автотрансформатора вхідної напруги частоти 50 (60) Гц. В дослідженні розглядається активна частина автотрансформатора напруги з багат шаровою

обмоткою циліндричного типу, виконана на стрижні магнітопроводу з електротехнічної сталі. На відміну від конструкцій силових трансформаторів та автотрансформаторів, циліндричні високовольтні обмотки вимірювальних трансформаторів та автотрансформаторів напруги мають у перерізі форму, наближену до трапеції, що пов'язано з великою кількістю витків та необхідністю забезпечити зменшення напруженості електричного поля поблизу ярем магнітної системи. Зазвичай, обмотки екранують від стрижня магнітопроводу заземлюваним електростатичним екраном, а останній (високовольтний) шар обмотки автотрансформатора напруги (так само, як і трансформатора напруги) екранують високовольтним електростатичним екраном, призначення якого — вирівнювання розподілу електричного поля та недопущення виникнення коронних розрядів. Міжвиткова ізоляція високовольтних вимірювальних автотрансформаторів, по аналогії з трансформаторами напруги, як правило, обмежується твердою ізоляцією обмоткового проводу та рідкою чи газовою ізоляцією внутрішнього середовища автотрансформатора. Міжшарова ізоляція, як правило, виконується комбінованою та складається з ізоляції обмоткового проводу, твердої міжшарової ізоляції, просоченої рідким чи газоподібним діелектриком. Ця ізоляція виконує одночасно роль механічної основи для наступного шару витків та електричної ізоляції, яка особливо важлива для крайніх витків суміжних шарів обмотки. Зменшення ширини намотування наступного шару витків виконується, одночасно, для зменшення напруженості електричного поля між крайніми витками й ярами та для унеможливлення розряду по поверхні міжшарового діелектрику між крайніми витками з найбільшою різницею потенціалів двох сусідніх шарів. Розрахунок розподілу напруги по витках обмотки автотрансформатора напруги (або трансформатора напруги), особливо для режиму холостого ходу, є достатньо складною задачею, прикладом вирішення якої можуть бути дослідження [5]. У випадку, коли ємнісні струми в обмотках складають суттєву частину, по відношенню до струму холостого ходу, необхідно враховувати їх вплив на загальний розподіл напруги по витках обмотки високовольтного автотрансформатора напруги.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є виявлення впливу ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги на розподіл напруги по витках обмотки та визначення характеру цього впливу. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати ряд задач, а саме:

- визначити для високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги найбільш вагомі фактори виникнення та розподілу ємнісних струмів в його обмотці за режиму холостого ходу та робочої частоти 50 (60) Гц;
- розробити схему заміщення для типової циліндричної багатшарової обмотки високовольтного автотрансформатора напруги;
- виконати перехід від розподілених параметрів активної, індуктивної та ємнісної складових опорів для обмотки високовольтного автотрансформатора напруги до зосереджених параметрів, які можливо використовувати в схемі його заміщення на робочій частоті;

- розрахувати вплив окремих складових опорів для зосереджених параметрів обмотки на частоті 50 (60) Гц на протікання ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги;
- розрахувати розподіл ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги класу 10 кВ та визначити механізм його впливу на загальний розподіл напруги по витках високовольтного автотрансформатора напруги на холостому ході.

4. Аналіз літературних даних

Проблема ємнісних струмів в обмотках трансформаторів та автотрансформаторів досліджується достатньо давно. Основною темою, яку досліджують численні науковці, є частотні характеристики трансформаторів та автотрансформаторів. Дослідження з даної тематики є особливо актуальними для високовольтних трансформаторів напруги, значні ємності в обмотках яких створюють складні коливальні контури з резонансними частотами, що можуть призводити до значних перепаду напруг при перехідних процесах в електромережах. В роботі [4] виконувалось дослідження частотних характеристик трансформатора типу НОМ-10 з метою визначення резонансних частот та чутливості таких трансформаторів до різного типу перенапруг. Також в цій роботі були запропоновані методи визначення розподілу напруги по обмотках даного трансформатора, в залежності від частоти прикладеної до обмотки напруги. Особливістю даного дослідження можна вважати його повністю експериментальний характер, оскільки частотні характеристики визначались для конкретного трансформатора експериментальним шляхом.

В [6] автор підсумовує ряд робіт з аналізу частотних характеристик трансформаторів та розподілу напруги по їх високовольтних обмотках в залежності від характеристик перехідного процесу на вході обмотки. В роботі досліджуються методи розрахунку частотних характеристик, запропоновані іншими авторами, та пропонується власний метод переходу від розподілених параметрів індуктивності, ємності, активного опору та провідності на землю обмотки до диференційованих зосереджених параметрів, які в подальшому пропонується використовувати у відповідній схемі заміщення. Автором приділено основну увагу міжвитковим ємностям обмотки, які, в загальному випадку, можуть створювати ряд коливальних контурів з індуктивностями цих витків, їх активними опорами та провідностями на землю. Недоліком цієї роботи можна вважати відсутність розрахунків впливу розподілених ємностей обмотки на розподіл напруги за нормальних режимів роботи трансформатора. Той же автор в [7], додатково до поздовжнього розподіленого комплексного опору обмотки, розглядає міжшарові ємності і провідності та пропонує методи їх врахування для визначення частотних характеристик обмоток силових трансформаторів. В роботі зроблено наголос на неоднорідності параметрів окремих ділянок обмоток та запропонована еквівалентна схема заміщення, яка дозволяє використовувати, за запропонованою автором методикою, зосереджені параметри ємності, індуктивності, активного опору та провідності окремих ділянок обмотки. Одержані автором результати хоча і є актуальними для силових трансформаторів, проте, не можуть бути без певних доробок застосовані для

високовольтних вимірювальних трансформаторів та автотрансформаторів напруги.

В роботі [8] запропоновано визначити частотні характеристики високовольтного трансформатора тороїдального типу шляхом визначення значень його міжвиткових ємностей чисельними методами. В роботі запропоновано використовувати програмне забезпечення на основі методу скінченних елементів для визначення розподілу електричного поля в тривимірній моделі трансформатора. Однак, хоча в роботі й запропоновано відповідну схему заміщення, в якій використовуються розраховані чисельно міжвиткові та міжшарові ємності обмотки такого трансформатора, матриці взаємних індуктивностей, активних опорів та провідностей пропонується розраховувати на основі матриці взаємних ємностей, елементи якої визначаються чисельними розрахунками, що знижує точність таких розрахунків.

Аналогічні дослідження розглянуті в [9], де запропоновано математичну модель високовольтного трансформатора з циліндричними обмотками на двострижневому магнітопроводі. В даній роботі показано, що в трансформаторі з багатошаровою високовольтною обмоткою циліндричного типу ємності крайніх витків шарів на заземлені частини конструкції становлять близько 1 пФ, й при імпульсному впливі майже не змінюють розподіл напруги по витках обмотки. Також, в роботі показано, що навіть при значному збільшенні цієї ємності до 100 пФ (чого не буває в реальних конструкціях трансформаторів) відхилення від розподілу напруги по витках обмотки також є незначним. Ємності між шарами витків в [9] запропоновано розраховувати за ємностями коаксіальних циліндрів з радіусами й висотами, що відповідають сусіднім шарам обмотки. Також в цій роботі запропоновано розраховувати взаємну індуктивність витків обмотки за формулами магнітного поля кругових витків у циліндричній системі координат. Моделювання та експериментальні дослідження характеристик високовольтного трансформатора, виконані в цій роботі, показали достатньо високий ступінь співпадіння результатів.

В [10] достатньо детально розглянуті методи обчислень взаємних ємностей між витками одного шару та в різних шарах багатошарових обмоток трансформаторів.

Огляд публікацій за темою статті засвідчує, що дослідження в напрямку визначення впливу ємнісних струмів в обмотках високовольтних трансформаторів ведеться вже тривалий час, існує ряд методів, які дозволяють обчислювати міжвиткові та міжшарові ємності в обмотках, взаємні та власні індуктивності витків обмоток. Проте, дослідження високовольтних автотрансформаторів в якості масштабних перетворювачів високої напруги практично відсутні, також бракує матеріалів, які стосуються досліджень впливу ємнісних струмів на розподіл напруги по витках обмотки за нормальних режимів роботи автотрансформаторів напруги.

5. Матеріали та методи досліджень

Для аналізу розподілу ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги в роботі використовується вісесиметрична модель багатошарової циліндричної обмотки вимірювального автотрансформатора класу 10 кВ, виконана на стрижні двострижневого магнітопроводу, яка представлена на рис. 1.

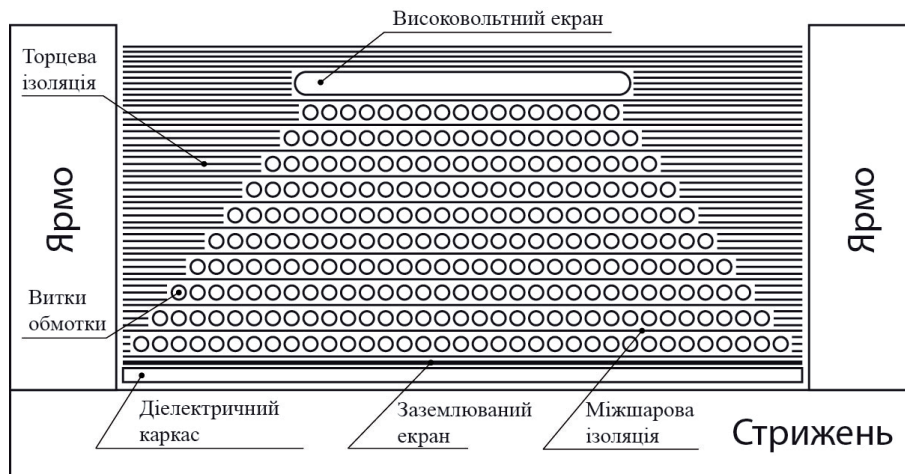


Рис. 1. Схематичне зображення перерізу обмотки високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги класу 10 кВ

Для визначення розподілу напруженості електричного поля та обчислення заряду на поверхнях провідних частин моделі використовуються чисельні розрахунки в програмному пакеті Comsol Multiphysics. Використовуючи методи, викладені в [9, 10] та результати чисельних розрахунків, в роботі виконано перехід від розподілених міжшарових ємностей до зосереджених ємностей кожного витка. Для розрахунків ємнісних струмів була використана схема заміщення, представлена на рис. 2.

В представленій схемі заміщення враховується те, що кількість витків у багатошаровій високовольтній обмотці з чередуванням шарів зменшується зі збільшенням потенціалу початкового витка шару. Одночасно, з віддаленням шару від стрижня, збільшується його площа поверхні, а отже — збільшується ємність між шарами. Комплексні міжвиткові опори $Z_b(k)cn_k$ складаються з включених паралельно активних та ємнісних складових опорів витків, що визначаються за активними провідностями міжвиткової ізоляції та ємностями між двома сусідніми витками в одному шарі, як описано в [9, 10]. Комплексні виткові опори $Z_b(k)ln_k$ визначаються як результуючі значення розрахунків, що враховують власні активні складові опорів витків, власні та взаємні індуктивності розсіювання між різними витками в обмотці, а також власні та взаємні індуктивності, пов'язані з магнітопроводом високовольтного автотрансформатора напруги, та розраховуються за відомими методами, наприклад, представленими в [5].

Комплексні міжшарові опори $Z_m(k)(k-1)$ визначаються загальними міжшаровими активними провідностями та ємностями на один виток шару. Перший номер в дужках означає індекс зовнішнього шару обмотки, другий — найближчого внутрішнього шару обмотки високовольтного автотрансформатора напруги.

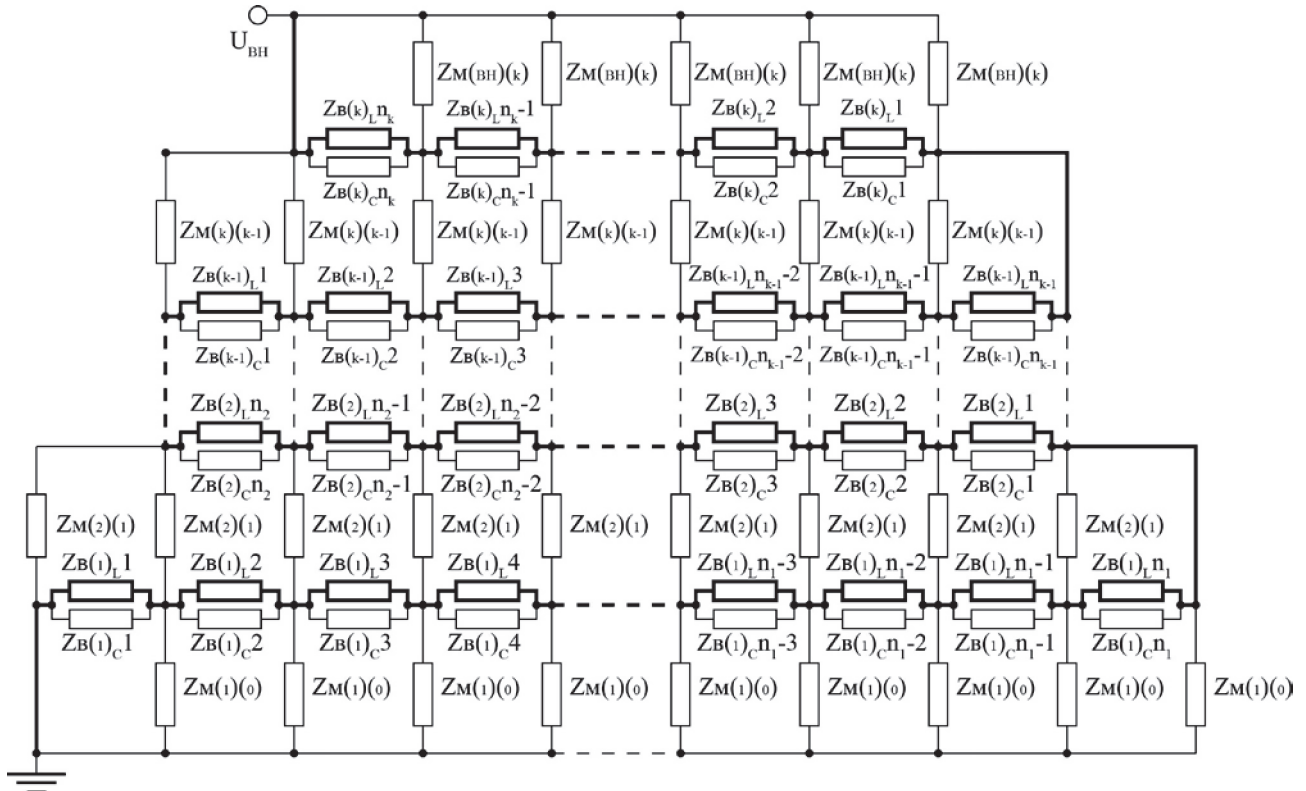


Рис. 2. Схема заміщення обмотки високовольтного автотрансформатора напруги з розподіленими комплексними опорами:

$Z_M(k)(k-1)$ — міжшарові комплексні опори між (k) -м та $(k-1)$ -м шарами обмотки; $Z_B(k)L_k$ — виткові комплексні опори індуктивної гілки; $Z_B(k)C_k$ — міжвиткові комплексні опори ємнісної гілки; k — кількість шарів в обмотці; n_k — кількість витків у k -му шарі; U_{BH} — приєднання високої напруги; BH — індекс високовольтного електростатичного екрану; 0 — індекс заземлюваного електростатичного екрану

На рис. 2 виділено жирними лініями коло, яке не враховує ані міжвиткові ємності в одному шарі, ані міжшарові ємності між найближчими витками в сусідніх шарах. Це коло відповідає розрахункам, результати яких одержуються за [5].

Для частоти струму робочої напруги 50 (60) Гц комплексні виткові опори індуктивних гілок за рис. 2 є суттєво меншими за комплексні опори ємнісних міжвиткових гілок. Внаслідок цього, для розрахунків за частоти 50 (60) Гц значеннями опорів ємнісних міжвиткових гілок у першому наближенні можна нехтувати. Комплексні міжшарові опори можуть бути в кілька разів більшими за відповідні міжвиткові, проте, внаслідок значно більшої різниці потенціалів між витками в різних шарах, формують суттєво більші струми, величини яких визначають на частоті 50 (60) Гц міжшарові ємності. Внаслідок нерівномірності розподілу міжшарових ємнісних струмів по витках одного шару, викликаного різними градієнтами напруги по відношенню до зовнішнього та внутрішнього шарів обмотки, результуючий ємнісний струм, що є алгебраїчною сумою струмів, які втікають у виток з шару з більшим потенціалом та витікають у шар з меншим потенціалом, буде протікати вздовж витків одного шару.

В подальших розрахунках приймається, що всі зосереджені міжшарові ємності є однакові для сусідніх шарів, що розглядаються (ізоляція має однакову товщину та характеристики). Приймається також, що всі міжвиткові ємності є однакові для всіх витків в одному шарі. Загальна ємність двох шарів обмотки, що розглядаються, розраховується за формулою ємності коаксіального конденсатора:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot H}{\ln\left(\frac{R1+d}{R1}\right)}, \tag{1}$$

де ϵ_0 — електрична стала; ϵ — відносна діелектрична проникність матеріалу міжшарової ізоляції; H — мінімальна висота сусідніх шарів циліндричної обмотки; d — товщина ізоляції між шарами; $R1$ — максимальний, по відношенню до вісі обмотки, радіус поверхні проводу внутрішнього шару.

Комплексний міжшаровий опір між найближчими витками в сусідніх шарах розраховується за врахуванням паралельного з'єднання активної та ємнісної складових:

$$Z_{M_i} = \frac{1}{\frac{1}{R_{M_i}} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{M_i}}, \tag{2}$$

де i — номер витка у обмотці; R_{M_i} — активний опір ізоляції між i -м витком та його найближчим витком у сусідньому шарі, який визначається характеристиками активної провідності міжшарового діелектрику за різних частот, температурних режимів, напруженості поля, тощо; f — частота струму прикладеної до обмотки напруги 50 (60) Гц; C_{M_i} — ємність між i -м витком та його найближчим витком у сусідньому шарі; $j = \sqrt{-1}$.

Активні складові міжшарового опору є значними й ними, зазвичай, можна нехтувати. Ємності C_{M_i} можна розраховувати за формулою:

$$C_{m_i} = \frac{C}{N}, \tag{3}$$

де N — кількість витків у зовнішньому з двох шарів обмотки, що розглядаються.

Поздовжні комплексні виткові опори між $Z_b(k)_{Lnk}$ визначаються за [5], чисельними методами, або в інший спосіб.

Якщо розглядати складові $Z_b(k)_{Cnk}$ — міжвиткових комплексних опорів ємнісної гілки — на частоті 50 (60) Гц, можна бачити, що ці опори є суттєво більшими опорів індуктивної гілки $Z_b(k)_{Lnk}$, тому практично не впливають на формування розподілу напруги по витках в режимі холостого ходу, оскільки, зазвичай, міжвиткові ємності в одному шарі не перевищують кількох пікофарад [9]. Тому, за частоти 50 (60) Гц, пропонується нехтувати складовими $Z_b(k)_{Cnk}$, які показані на рис. 2.

Розрахунки електричного поля (для амплітудного значення робочої напруги $U = 26,87 \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t)$ кВ високовольтного автотрансформатора напруги) виконувались в програмному пакеті Comsol Multiphysics (вісесиметрична модель) з метою визначення максимально допустимої напруженості поля та зарядів на провідних частинах обмотки. В цій моделі заземлюваний екран обмотки виконаний на діелектричному каркасі діаметром 81 мм, що відповідає фактичному виконанню високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги класу 10 кВ.

6. Результати досліджень

За результатами моделювання обмотки високовольтного автотрансформатора напруги, у відповідності до рис. 2 та формул (1)–(3), були одержані значення струмів у витках при кількості витків у шарах 250, кількості шарів 100, товщині ізоляції 0,25 мм та її відносній діелектричній проникності $\epsilon = 2$, мінімальному радіусі R_1 першого шару витків 43 мм та діаметрі проводу 0,224 мм.

Структура одержаного в результаті розрахунків розподілу ємнісних струмів по шарах обмотки високовольтного автотрансформатора напруги пояснена на рис. 3.

На рис. 3 представлені діаграми міжшарових ємнісних струмів для останнього (100-го, високовольтного), середнього (50-го) та першого (низьковольтного) шарів обмотки високовольтного автотрансформатора напруги. Можна бачити, що, оскільки, для середнього шару обмотки загальний сумарний ємнісний струм, який втікає у витки з зовнішнього шару дорівнює струму, що втікає у витки внутрішнього шару (внаслідок рівності градієнтів напруг по відношенню до сусідніх зовнішнього та внутрішнього шарів), одержуємо вздовж витків шару всередині обмотки симетричний відносно його центру розподіл інтегральних поздовжніх ємнісних струмів у кожному витку (рис. 3, б). Струми, що втікають у зовнішній (100-й, високовольтний) шар обмотки, формуються градієнтом напруг від нуля до різниці потенціалів між крайніми витками цього шару, а струми, які втікають з цього шару, формуються градієнтами напруг від нуля до подвійної різниці потенціалів між крайніми витками одного шару (рис. 3, а). За розрахунками, результуючий ємнісний струм, який перетікає вздовж витків обмотки з одного шару в інший між витками з найменшою різницею потенціалів, дорівнює сумарному ємнісному струму між двома зовнішніми (100-м та 99-м) шарами обмотки.

На відміну від останнього високовольтного шару обмотки, ємнісні струми між витками першого шару та низьковольтним екраном формуються градієнтом напруг, що змінюється від різниці потенціалів між крайніми витками у шарі до нуля (рис. 3, в). А струми, які затікають в цей останній шар з зовнішнього, формуються градієнтом напруг від нуля до подвійної різниці потенціалів між крайніми витками одного шару. Крім цього, враховується поздовжній ємнісний струм, який перетікає з останнього витка другого шару в перший виток першого шару. Внаслідок того, що струми, які затікають в цей перший (низьковольтний) шар обмотки, сумарно перебільшують струми, які з нього втікають на низьковольтний екран, в цьому шарі ємнісні струми не зменшуються до нульових значень, як у високовольтному шарі обмотки (рис. 4), внаслідок поздовжнього ємнісного струму в обмотці.

Поздовжній ємнісний струм в обмотці автотрансформатора напруги відрізняється по шарах внаслідок того, що при переході від першого до останнього (високовольтного) шару обмотки збільшується міжшарова ємність (тому на рис. 3 зменшуються відповідні значення по вісях ординат).

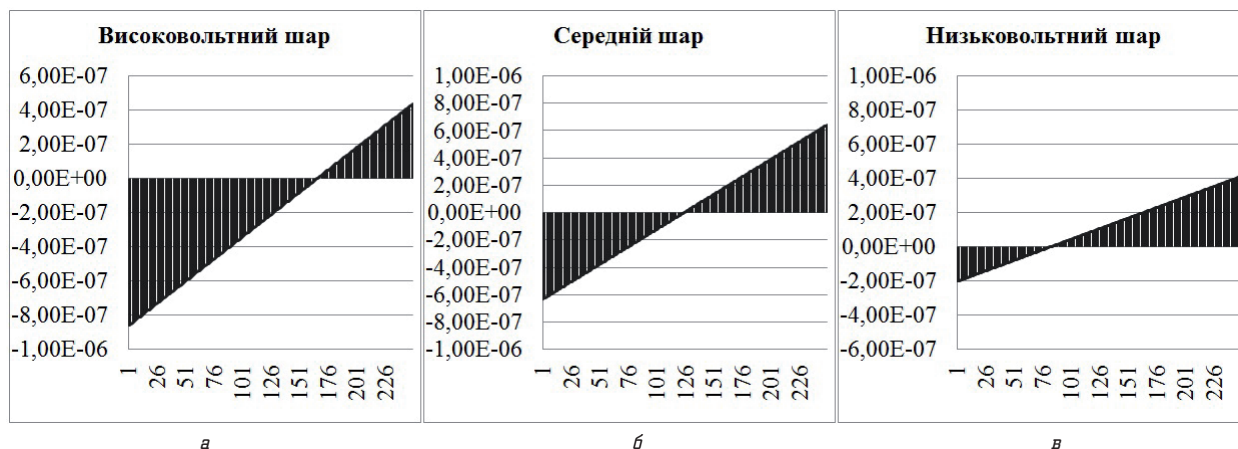


Рис. 3. Розподіл різницеєвих міжшарових ємнісних струмів для різних шарів обмотки високовольтного автотрансформатора напруги: а — струми для витків останнього (зовнішнього, 100-го) високовольтного шару; б — струми для витків 50-го шару всередині обмотки; в — струми для витків першого (низьковольтного) шару. По вісях абсцис відкладені номери витків; по вісях ординат — результуючі ємнісні струми (в амперах) — різниці ємнісних струмів, що втікають у виток (зі знаком «+») та втікають з нього (зі знаком «-»)

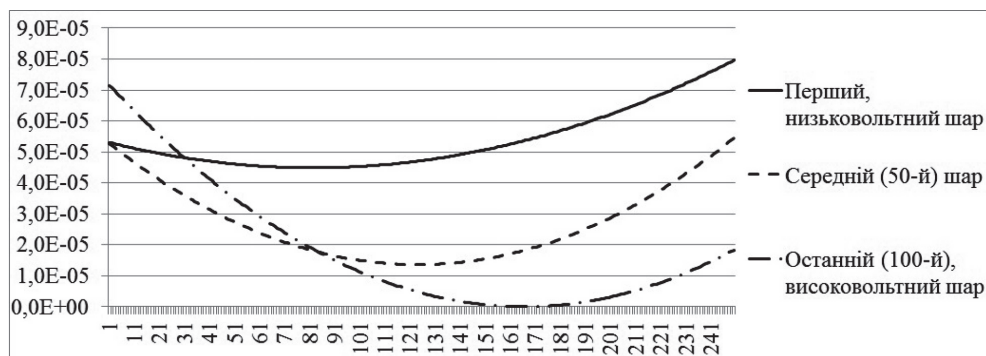


Рис. 4. Розподіл емнісних струмів по витках першого, 50-го та 100-го шарів обмотки. На вісі абсцис відкладені номери витків у шарі, починаючи від витка з найбільшим потенціалом; на вісі ординат відкладені значення емнісного струму (в амперах), що протікає у відповідному витку

В результаті, за розрахунками емнісних струмів схеми заміщення за рис. 2 одержуємо розподілення цих струмів у шарах (за номерами 1; 50; 100) обмотки автотрансформатора напруги, які представлені на рис. 4.

На рис. 4 показані одержані графічні залежності емнісного струму у витках з відповідними номерами у шарі, починаючи з витка з найбільшим потенціалом.

Як можна бачити з рис. 4, струми у першому та останньому шарах обмотки, на відміну від струмів у середніх шарах обмотки, розподіляються несиметрично відносно середини шару. Крім цього, емнісні струми у низьковольтному шарі обмотки, який є найближчим до заземленого екрану обмотки, не зменшуються до нульового значення, причому струми у середніх шарах наближуються в середині шару до мінімальних значень зі збільшенням радіуса шару. Наслідком такого розподілу емнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги є нелінійний розподіл додаткового (від емнісної складової струму) спадання напруги у кожному шарі обмотки. При цьому, оскільки низьковольтна (вихідна) частина обмотки високовольтного автотрансформатора напруги розташовується саме в тих шарах, що є найближчими до стрижня, нелінійний розподіл емнісних складових спадання напруги вздовж перших (низьковольтних) шарів обмотки автотрансформатора напруги може суттєво впливати на коефіцієнт масштабного перетворення даного автотрансформатора напруги.

Якщо емнісні струми мають значення порядку струму холостого ходу високовольтного автотрансформатора напруги, їх вплив на загальний розподіл напруги по витках обмотки може бути суттєвим і повинен враховуватись при розрахунках високовольтних автотрансформаторів напруги, призначених для вимірювань високих напруг з високою точністю. Даний вплив емнісних струмів може розглядатись як фактор вторинного порядку по відношенню до струмів холостого ходу високовольтного автотрансформатора напруги.

Підсумовуючи результати розрахунків, можна відзначити, що розподіл емнісних струмів вздовж витків кожного шару обмотки високовольтного автотрансформатора напруги є нелінійним. Величина цього струму залежить від емнісного струму між сусідніми шарами обмотки. Перший та останній шари обмотки суттєво відрізняються від середніх шарів обмотки за розподілом емнісних струмів вздовж шару, тому, при розташуванні витків вихідної частини обмотки в першому шарі, одержуємо спадання напруги на ній, яке відрізняється від «середньозваженого» спадання напруги, викликаного протіканням емнісної складової струму вздовж інших частин обмотки.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Одержані результати досліджень є новими для розробки та створення високоточних високовольтних масштабних перетворювачів напруги автотрансформаторного типу.

До переваг розробленого в роботі підходу оцінювання емнісної складової струму в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги слід віднести його достатню простоту в обчисленні за приведеною схемою заміщення та можливість оцінювання впливу емнісних струмів в обмотці на точність масштабного перетворення напруги на стадії проектування високовольтного автотрансформатора напруги. Розраховані значення емнісних струмів можуть бути використані для створення деталізованої векторної діаграми напруг і струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги. Це має особливий сенс при розробці прецизійних високовольтних автотрансформаторів напруги класів точності 0,1 або більш точних, а також при проектуванні високовольтних автотрансформаторів напруги на класи напруг 110 кВ і вище без використання каскадних конструкцій.

Недоліком запропонованого підходу є те, що спрощення, запропоновані в роботі, не враховують того, що фактична міжшарова емність, розрахована чисельними методами, дещо відрізняється від визначеної за формулою (1), особливо, при значних відношеннях діаметру обмоткового проводу до товщини міжшарової ізоляції обмотки. Крім того, що міжшарова емність відрізняється фактично для різних шарів, також змінюється кількість витків у шарі зі збільшенням його радіуса, тому для більш точних розрахунків необхідно ускладнювати процедуру розрахунків, у відповідності до схеми заміщення рис. 2. Також, слід відзначити, що запропонований підхід не призначений для розрахунку частотних характеристик високовольтного автотрансформатора напруги, оскільки його основне призначення — визначення впливу емнісних струмів на розподіл напруги по витках на робочій частоті автотрансформатора напруги в режимі холостого ходу.

Для більш точного врахування впливу емнісних струмів на частоті 50 (60) Гц на розподіл напруги по витках обмотки високовольтного автотрансформатора напруги, пропонується деталізувати схему заміщення обмотки у відповідності до рис. 2, враховуючи активні та індуктивні спадання напруг по витках обмотки, розраховані у відповідності до [5], виконувати моделювання та чисельні розрахунки методом скінченних елементів розподілу напруженості поля між шарами обмотки, розподілу зарядів на поверхнях окремих витків обмотки, за якими більш точно визначити розподілені

та зосереджені міжшарові ємності обмотки високовольтного автотрансформатора напруги. В загальному випадку необхідно враховувати струми у навантаженні високовольтного автотрансформатора напруги.

Існуючі методи визначення частотних характеристик високовольтних трансформаторів напруги можуть бути лише частково використані для визначення характеристик високовольтних автотрансформаторів напруги, оскільки обмотки високовольтних трансформаторів напруги не мають безпосереднього електричного зв'язку. Методи, розглянуті в [4, 6–10] створювались для визначення розподілу напруг вздовж витків обмоток трансформаторів у найбільш небезпечних режимах їх роботи – при перехідних процесах в обмотках, тому їх неефективно використовувати для визначення цього розподілу на частоті 50 (60) Гц. Саме тому, представлений в роботі підхід є найбільш прийнятним для розрахунків характеристик високовольтних автотрансформаторів напруги в основних режимах його роботи.

8. Висновки

1. В роботі визначено, що міжвиткові та міжшарові ємності обмотки, разом з активними міжвитковими та міжшаровими провідностями й власними та взаємними індуктивностями витків високовольтного автотрансформатора напруги створюють складну розподілену систему контурів, яка на частоті 50 (60) Гц може викликати появу в цій обмотці суттєвих ємнісних струмів.

2. В роботі запропоновано використовувати схему заміщення типової циліндричної обмотки високовольтного автотрансформатора напруги, яка враховує змінювані по шарах розподілені міжвиткові та міжшарові ємності між сусідніми витками, параметри індуктивних гілок витків обмотки та розподілені міжвиткові й міжшарові активні провідності ізоляції.

3. Запропоновано чисельно розраховувати розподілені ємнісні параметри обмотки високовольтного автотрансформатора напруги та за наведеними в роботі формулами перетворювати розраховані розподілені параметри в зосереджені. Зосереджені параметри активних та індуктивних складових опорів запропоновано розраховувати за вже існуючими підходами.

4. Шляхом виконаних розрахунків визначено, що за частоти 50 (60) Гц ємнісна складова струмів в обмотці високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги класу 10 кВ є значно більшою за активну складову та може досягати одного порядку зі струмом холостого ходу. При цьому, індуктивні складові гілок схеми заміщення формують основний розподіл напруги по обмотці й, відповідно, задають напрямки протікання ємнісних струмів в обмотці, які можна розглядати як фактори вторинного впливу в формуванні розподілу напруги по витках обмотки.

5. За виконаними розрахунками параметрів обмотки високовольтного автотрансформатора напруги класу 10 кВ на частоті 50 Гц визначено нелінійний характер розподілу ємнісних струмів вздовж витків шарів обмотки, а також різний характер цього розподілу для першого, останнього та середніх шарів обмотки. Одержані результати дозволяють зробити висновок про необхідність врахування ємнісних струмів при розрахунках кількості та розташування витків вихідної частини обмотки високоточних високовольтних вимірювальних автотрансформаторів напруги.

Література

1. Васютинский, С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов [Текст] / С. Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
2. Hoer, C. A. A 2:1 ratio inductive voltage divider with less than 0.1 ppm error to 1 MHz [Text] / C. A. Hoer, W. L. Smith // Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section C: Engineering and Instrumentation. – 1967. – Vol. 71C, № 2. – P. 101–109. doi:10.6028/jres.071c.012
3. Avramov-Zamurovic, S. Binary versus decade inductive voltage divider comparison and error decomposition [Text] / S. Avramov-Zamurovic, G. N. Stenbakken, A. D. Koffman, N. M. Oldham, R. W. Gammon // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1995. – Vol. 44, № 4. – P. 904–908. doi:10.1109/19.392879
4. Никонец, Л. А. Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН [Текст] / Л. А. Никонец, И. Р. Бучковский, Р. В. Бучковский, В. П. Венгер, В. П. Венгер, А. Л. Никонец, М. Б. Сабат // Электрические станции. – 2014. – № 2. – С. 51–56.
5. Бржезицький, В. О. Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів напруги за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів [Текст] / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. М. Десятов // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 61–63.
6. Saied Mohamed, M. An Analytical Method for the Analysis of Transformer Windings Having Non-Uniform Capacitance Distribution [Text] / M. Saied Mohamed // Journal of Power Electronics and Power Systems. – 2015. – Vol. 5, № 2. – P. 41–54.
7. Saied Mohamed, M. The Transient Response and Frequency Characteristics of Power Transformers Having Non-Uniform Winding Insulation [Text] / M. Saied Mohamed // Journal of Power Electronics and Power Systems. – 2014. – Vol. 4, № 1. – P. 37–52.
8. Gomez, P. Impulse-Response Analysis of Toroidal Core Distribution Transformers for Dielectric Design [Text] / P. Gomez, F. de Leon, I. A. Hernandez // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 26, № 2. – P. 1231–1238. doi:10.1109/tpwrd.2010.2087043
9. Popov, M. Analysis of Very Fast Transients in Layer-Type Transformer Windings [Text] / M. Popov, L. van der Sluis, R. P. P. Smeets, J. Lopez Roldan // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, № 1. – P. 238–247. doi:10.1109/tpwrd.2006.881605
10. Dalessandro, L. Self-Capacitance of High-Voltage Transformers [Text] / L. Dalessandro, F. da Silveira Cavalcante, J. W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, № 5. – P. 2081–2092. doi:10.1109/tpe.2007.904252

АНАЛИЗ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ В ОБМОТКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА НАПЯЖЕНИЯ

Проанализировано распределение емкостных токов в витках многослойных обмоток высоковольтных автотрансформаторов напряжения. Выявлено различие распределения емкостных токов для первого слоя витков и всех остальных слоев обмотки. Предложен метод учета влияния емкостных токов в обмотке высоковольтного автотрансформатора напряжения на распределение общего падения напряжения по виткам обмотки.

Ключевые слова: автотрансформатор напряжения, емкостный ток, падение напряжения, межслоевая емкость.

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор, виконувач обов'язків завідувача кафедри техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.

Гаран Ярослав Олександрович, інженер II категорії, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: garan@ua.fm.

Бржезицький Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Гаран Ярослав Александрович, инженер II категории, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Brzhezitskyi Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.
Naran Yaroslav, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: garan@ua.fm