

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Гаран Ярослав Олександрович

УДК 621.314.223

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**Удосконалення високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги**

05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Я. О. Гаран

Науковий керівник:

Бржезицький Володимир Олександрович доктор технічних наук, професор

Київ – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Гаран Я. О.* Удосконалення високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.13 «Техніка сильних електричних та магнітних полів» (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018 р.

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання удосконалення теорії автотрансформаторного перетворення напруги у високовольтних вимірювальних пристроях шляхом розвитку методів його математичного моделювання, визначення характеристик автотрансформаторного перетворення напруги на основі проведення за допомогою ПК чисельних розрахунків електричних та магнітних полів, покращення характеристик та підвищення точності відповідних високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги. Отримані результати роботи, в сукупності, мають істотне значення для розвитку техніки сильних електричних і магнітних полів та вимірювань високих напруг.

В першому розділі дисертації виконано огляд літературних джерел, пов'язаних з тематикою досліджень. Огляд літературних джерел та сучасних наукових досліджень дозволив виявити ряд невирішених питань, що стосуються автотрансформаторного перетворення напруги у високовольтних

вимірювальних пристроях: недостатню деталізацію теорії автотрансформаторного перетворення напруги для багатошарових обмоток, а також відсутність теоретичних положень для визначення параметрів комплексного трансформаторного та автотрансформаторного перетворення напруги в обмотках, розташованих на спільному магнітопроводі.

В другому розділі дисертації викладені наукові напрацювання автора, які стосуються автотрансформаторного перетворення високої напруги в режимах, наближених до режиму холостого ходу, розглянуто вплив ємнісних струмів, що виникають у багатошарових обмотках високовольтних автотрансформаторів напруги, на розподіл напруги по витках цих обмоток.

Запропоновано новий метод, що дозволяє розраховувати основну частину індуктивності розсіювання при моделюванні активної частини автотрансформатора напруги в циліндричній системі координат. Даний метод дозволяє визначати приведену еквівалентну індуктивність розсіювання обмоток автотрансформаторів напруги як різницю величин одного порядку (з величиною, що визначається) та, відповідно, збільшувати точність розрахунків.

Запропоновано метод визначення місця розташування витків вихідної частини обмотки високовольтного автотрансформатора напруги, який базується на досягненні заданого значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання, яке необхідно одержати для високовольтного автотрансформатора напруги, що проектується. Даний метод є корисним при проектуванні вимірювальних автотрансформаторів напруги, для яких номінальний коефіцієнт автотрансформаторного перетворення необхідно розраховувати за співвідношенням витків (що можливо при близькому до нуля значенні приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання).

Удосконалено математичну модель високовольтного автотрансформатора напруги при використанні циліндричної системи координат шляхом додаткового врахування складових магнітного потоку розсіювання в різних частинах перерізу обмотки. Запропоновано

застосування дольових коефіцієнтів «стрижневого» і «ярмового» розсіювання, що дозволяє наблизити відповідність комплексної вісесиметричної моделі високовольтного автотрансформатора напруги за параметрами розсіювання його тривимірній моделі. Використання дольових коефіцієнтів магнітного поля розсіювання у комплексній вісесиметричній моделі автотрансформатора напруги дозволяє також забезпечити адекватність цієї моделі реальному виконанню його активної частини та підвищити точність розрахунків параметрів автотрансформаторного перетворення напруги на етапі проектування.

Виконано аналіз впливу ємнісних струмів в обмотках високовольтних автотрансформаторів напруги на розподіл напруги по витках їх шарів. Виявлено їх нелінійний характер та запропоновано векторну діаграму для розрахунку внеску ємнісних струмів у розподіл напруги по витках обмотки високовольтного автотрансформатора напруги. Для високих напруг до 10 кВ такі струми можна розглядати, як малі збурення у порівнянні зі струмом холостого ходу. Для автотрансформаторів напруги вищих класів напруги ці струми можуть досягати значень одного порядку зі струмами холостого ходу.

В третьому розділі дисертації розглянуті питання теорії випробувальних трансформаторів, в яких використовується комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення напруги, на прикладі високовольтного випробувального трансформатора з високовольтною обмоткою, побудованою з використанням автотрансформаторного перетворення напруги. Особлива увага приділена питанням автотрансформаторного перетворення високої напруги при різному навантаженні випробувального трансформатора. Визначено раніше не пояснені особливості режимів таких високовольтних випробувальних трансформаторів при їх суттєвому ємнісному навантаженні та запропонований метод коригування похибки автотрансформаторного перетворення високої напруги в них. Новизна запропонованого методу

коригування похибки високовольтного випробувального трансформатора напруги підтверджена патентом України на винахід.

Уведена в теорію автотрансформаторів система рівнянь, що дозволяє проводити визначення розподілу напруги в обмотках автотрансформаторів до рівня одиничних витків або груп витків. Використання цієї системи рівнянь, а також подібної до неї модернізованої системи рівнянь трансформатора напруги, вперше дозволяє розраховувати складні режими комплексного трансформаторного та автотрансформаторного перетворення напруги в обмотках, розташованих на спільному магнітопроводі.

В четвертому розділі дисертації виконано порівняння результатів розрахунків характеристик автотрансформаторного перетворення високої напруги за теоретичними положеннями, викладеними у другому та третьому розділах дисертації, з результатами експериментальних досліджень. Також в цьому розділі наведена детальна інформація про впровадження експериментальних зразків високовольтної техніки, які використовують автотрансформаторне перетворення напруги, та розроблені з використанням теоретичних положень дисертації.

Виконано порівняння одержаних розрахункових значень стосовно розподілу напруги по витках обмотки розробленого еталонного автотрансформатора класу напруги 10 кВ класу точності 0,05 за запропонованою в дисертації комплексною моделлю активної частини автотрансформатора з тривимірною моделлю та проведено порівняння відповідних значень результатів розрахунків з тривимірною моделлю, при цьому суттєво більшу відповідність результатів розрахунків тривимірній моделі виявлено для комплексної моделі розсіювання магнітного поля автотрансформатора напруги. Також, в роботі виконано порівняння експериментально одержаних даних параметрів розсіювання обмоток трансформатора напруги з результатами розрахунків, одержаними для цього трансформатора з використанням комплексної математичної моделі, запропонованої в роботі. Результати порівняльного аналізу дозволяють

зробити висновок про можливість використання для інженерних розрахунків запропонованої в дисертаційній роботі комплексної моделі розсіювання магнітного поля автотрансформатора напруги.

Виконано порівняння експериментально одержаних даних коефіцієнтів масштабного перетворення високої напруги випробувального трансформатора з високовольтною обмоткою, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, за різних видів його навантаження (у тому числі, з використанням запропонованого методу коригування коефіцієнту автотрансформаторного перетворення напруги) з результатами теоретичних розрахунків, виконаних за уведеною в дисертації системою рівнянь автотрансформатора. Експериментально одержані дані підтвердили результати теоретичних розрахунків, виконаних в роботі за запропонованою математичною моделлю комплексного трансформаторного та автотрансформаторного перетворення напруги.

З використанням теоретичних положень дисертаційної роботи розроблено, виготовлено та впроваджено в метрологічну службу України експериментальний зразок високовольтного автотрансформатора напруги класу 10 кВ, призначений для роботи у складі Вторинного еталона електричної напруги змінного струму частоти 50 Гц класу 110кВ.

З використанням теоретичних положень дисертаційної роботи також розроблено, виготовлено та впроваджено в ЦЕС ДП «НЕК «Укренерго» унікальний високовольтний випробувальний трансформатор на напругу до 180 кВ, в якому реалізовано комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення напруги.

*Ключові слова: автотрансформаторне перетворення напруги, випробування високою напругою, високовольтний автотрансформатор, ємнісний струм, індуктивність розсіювання, точність масштабного перетворення напруги.*

## Summary

Haran Ya. O. Improvement of high-voltage measuring devices using autotransformer voltage conversion. Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.09.13 "Technics of strong electric and magnetic fields". National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education of Ukraine. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education of Ukraine, Kyiv, 2018.

In the thesis the actual scientific task of improving the theory of autotransformer voltage transformation in high voltage measuring devices is solved by developing the methods of its mathematical modeling, determination of characteristics of autotransformer voltage transformation on the basis of carrying out by the PC numerical calculations of electric and magnetic fields, improving characteristics and improving the accuracy of the corresponding high-voltage measuring devices, using autotransformer voltage transformation. The obtained results of work, in aggregate, are essential for the development of the strong electric and magnetic fields equipment and measurements of high voltages.

In the first chapter of the thesis performed a review of the literature related to the subject of research. An review of the literature and modern scientific research has revealed a number of unresolved issues concerning autotransformer voltage transformations in high-voltage measuring devices: insufficient detail of the theory of autotransformer voltage transformation for multilayer windings, as well as the lack of theoretical positions for determining the parameters of complex transformer and autotransformer voltage transformations in windings located on a common magnetic core.

The second chapter of the thesis describes the author's scientific developments concerning the autotransformer high voltage transformation in modes close to the idle mode, the influence of capacitive currents arising in

multilayer windings of high voltage autotransformers, on the distribution of voltage across the coils of these windings.

A new method is proposed that allows to calculate the main part of the leakage inductance in the modeling of the active part of the voltage autotransformer in a cylindrical system of coordinates. This method allows to determine the given equivalent leakage inductance of voltage autotransformers windings as a difference of values of one order (in relation to the value that is defined) and, accordingly, to increase the accuracy of calculations.

The method of determining the location of the coils of a high voltage autotransformer output winding is proposed, which is based on the achievement of a value of the reduced equivalent leakage inductance, which is to be obtained for a designed high voltage autotransformer. This method is useful in the design of measuring voltage transformers for which the nominal coefficient of autotransformer transformation to be calculated by the ratio of turns (which is possible with a close to zero reduced equivalent leakage inductance value).

The mathematical model of a high voltage autotransformer in a cylindrical system of coordinates has been improved by additional taking into account the components of the magnetic flux leakage in different parts of the winding cross section. The use of fractional coefficients of "rod" and "yoke" magnetic flux leakage is proposed, which allows to approximate the conformity of a high voltage autotransformer complex axisymmetric model based on the magnetic flux leakage parameters of its three-dimensional model. The use of the magnetic flux leakage fractional coefficients in the complex axisymmetric model of the voltage autotransformer also allows to ensure the adequacy of this model for the real implementation of its active part and to increase the accuracy of autotransformer voltage transformation parameters calculations at the design stage.

An analysis of the capacitive currents influence in the windings of high voltage autotransformers on the voltage distribution along the coils of their windings layers is performed. Their nonlinear character was revealed and a vector diagram was proposed for calculating the influence of capacitive currents in

voltage distribution along the coils of a high voltage autotransformer. For high voltages up to 10 kV, such currents can be considered as small disturbances in comparison with the idle current. For voltage autotransformers of higher classes of voltages, these currents can reach values of the same order with currents of idling.

In the third chapter of the thesis, the questions of the theory of test transformers, which use a complex transformer and autotransformer voltage transformation, are considered, for example, a high-voltage test transformer with a high-voltage winding, constructed according to use autotransformer voltage transformation. Particular attention is paid to the issues of autotransformer high voltage transformation at different load of the test transformer. The previously not explained features of the modes of such high-voltage test transformers with their significant capacitive load are determined and the method of the error correcting of autotransformer high voltage transformation in them is proposed. The novelty of the proposed method for correcting the error of a high-voltage test transformer is confirmed by a patent of Ukraine for an invention.

The system of equations is introduced into the theory of autotransformers, allowing to determine the voltage distribution in autotransformers windings to the level of single turns or groups of turns. Using this system of equations, as well as the modernized voltage transformer equations system similar to it, for the first time allows to calculate the complex modes of transformer and autotransformer voltages transformation of the windings located on a common magnetic core.

In the fourth chapter of the thesis, a comparison of the results of calculations of the characteristics of autotransformer high voltage transformation according to the theoretical positions set forth in the second and third chapters of the thesis, with the results of experimental research, was performed. Also, this chapter provides detailed information on the introduction of pilot samples of high-voltage equipment using autotransformer voltage transformations, and developed using the theoretical principles of the thesis.

A comparison of the obtained calculated values of the voltage distribution on the coils of the 10 kV of accuracy class 0.05 developed standard reference

autotransformer winding is proposed in the thesis the complex model of the autotransformer active part with a three-dimensional model, as well as a comparison of the corresponding values of the calculation results with a three-dimensional model, which is substantially larger conformity of the results calculations of the three-dimensional model was found for the complex model of leakage magnetic field of the voltage autotransformer. Also, in the thesis the comparison of experimentally obtained parameters of the voltage transformer windings leakage inductance with the calculated values obtained for this transformer is performed in accordance with the results of the calculations obtained for this transformer using a complex mathematical model proposed in the thesis. The results of the comparative analysis allow to conclude that it is possible to use proposed in the dissertation the complex model leakage magnetic field of autotransformer for the engineering calculations.

A comparison of experimentally obtained data of the high-voltage transformation coefficients of a test transformer with a high-voltage winding, constructed according to the scheme of autotransformer voltage transformation, for different types of its load (including using the proposed method of the autotransformer voltage transformation coefficient correction) with the results of theoretical calculations performed by the introduced in the thesis the autotransformer equations system. Experimentally obtained data confirmed the result of theoretical calculations performed in the research on the proposed mathematical model of complex transformer and autotransformer voltage transformation.

Using the theoretical positions of this thesis, the pilot sample of a high voltage autotransformer class 10 kV, designed for work in the Secondary Standard of the AC voltage of the 50 Hz frequency, class 110 kV, was developed, manufactured and introduced into the Metrology Service of Ukraine.

Using the theoretical positions of this thesis, a unique high-voltage test transformer for voltage up to 180 kV was developed, manufactured and implemented at the CES of the State Enterprise "NPC "Ukrenergo", in which a

complex transformer and autotransformer voltage transformation was implemented.

*Key words: autotransformer voltage transformation, high voltage test, high voltage autotransformer, capacitance current, leakage inductance, accuracy of scale voltage transformation.*

#### Список публікацій здобувача:

1. Бржезицький В. О. Трансформування вищих гармонічних складових напруги електромагнітними трансформаторами (експериментальне дослідження) / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Наукові праці НУХТ. – 2013. – № 49. – с. 98-103.

2. Бржезицький, В. О. Особливості характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №1. – с. 36-37.

3. Бржезицький, В. О. Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів напруги за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. М. Десятов // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – с.61-63.

4. Бржезицький, В. О. Аналіз ємнісних струмів в обмотці високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4. – с. 70-76.

5. Бржезицький, В. О. Коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 3. – с. 41-46.

6. Бржезицький, В. О. Деталізація рівнянь трансформатора до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1. – с. 32-37.

7. Brzhezitsky V. Mathematical model of high-voltage instrument autotransformer intended for use in Smart Grid networks / V. Brzhezitsky, Ya. Haran, Ye. Trotsenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – № 4/1 (36). – p. 50-54.

8. Патент України № 102864, МПК H01F 38/20, H01F 38/24. Високовольтний випробувальний трансформатор напруги / Бржезицький В. О., Гаран Я. О.; заявник та власник патента: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № 201103746; заявл. 28.03.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 4 с.

9. Бржезицький В. О. Визначення картини поля обмоток високовольтного трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – с. 21-23.

10. Анохин Ю. Л. Испытательные трансформаторы с требованиями точности измерения высокого напряжения / Ю. Л. Анохин, В. А. Бржезицкий, Я. А. Гаран, В. В. Копшин // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VII наук.-практ. конф. – К.: АВЕГА. – 2010. – с. 81-85.

11. В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран Експериментальна перевірка методу розрахунку індуктивності розсіювання високовольтних трансформаторів напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2014. – с. 326-328.

12. В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран До розрахунку індуктивності розсіювання високовольтного трансформатора напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2013. – с. 480-484.

13. Бржезицький В. О. Коректування високовольтного випробувального трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Доповіді за

матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т 2. – 453 с. – с. 280-282.

14. Бржезицький В. О. До розрахунку магнітного поля кругового контуру зі струмом з урахуванням феромагнітного осердя / В. О. Бржезицький, Я.О. Гаран, О. М. Десятов // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т2, с. 283-285.

15. Бржезицький В. О. Тестування аналітичних виразів складових напруженості магнітного поля кругового витка зі струмом / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. П. Дацюк // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2010, с. 483-485.

16. Бржезицький, В. О. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, М. Ю. Лапоша // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 6. – с. 50-54.

17. Абрамов В. Б. Испытательный трансформатор напряжением 180 кВ с гарантированной точностью его измерения / [Абрамов В. Б., Анохин Ю. Л., Бржезицкий В. А., Гаран Я. А. и др.] // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 5. – с. 100-101.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>16</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>17</b>
<b>РОЗДІЛ 1.....</b>	<b>25</b>
<b>ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....</b>	<b>25</b>
1.1. Високовольтні автотрансформатори.....	25
1.2. Масштабні перетворювачі високих напруг .....	27
1.3 Розрахунки характеристик високовольтних трансформаторів напруги	36
1.4 Висновки до розділу 1 .....	46
<b>РОЗДІЛ 2.....</b>	<b>48</b>
<b>ВПЛИВ МАГНІТНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА РОЗПОДІЛ НАПРУГИ В ОБМОТКАХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ .....</b>	<b>48</b>
2.1 Особливості розрахунку індуктивності розсіювання високовольтних автотрансформаторів напруги .....	48
2.2 Розрахунок індуктивності розсіювання автотрансформатора напруги за стрижневою моделлю .....	50
2.3 Розрахунок індуктивності розсіювання з урахуванням ярем магнітопроводу.....	67
2.4 Врахування ємнісних струмів в обмотках.....	77
2.5 Висновки по розділу 2 .....	85
<b>РОЗДІЛ 3.....</b>	<b>87</b>
<b>МАСШТАБНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРИСТРОЯХ, В ЯКИХ ВІДБУВАЄТЬСЯ КОМПЛЕКСНЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЕ ТА ТРАНСФОРМАТОРНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ .....</b>	<b>87</b>
3.1 Експериментальні дослідження високовольтного випробувального трансформатора з «вимірювальною обмоткою».....	87

3.2 Пояснення аномально високого значення похибки високовольтного випробувального трансформатора з «вимірювальною обмоткою» при ємнісному навантаженні.....	93
3.3 Деталізація рівнянь трансформаторів до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток .....	96
3.4 Коригування характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів з «вимірювальною обмоткою» .....	109
3.5 Висновки по розділу 3 .....	113
<b>РОЗДІЛ 4</b> .....	<b>115</b>
<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ</b> ....	<b>115</b>
4.1 Порівняння результатів розрахунків індуктивності розсіювання за запропонованими формулами з експериментальними даними .....	115
4.2 Розрахунок характеристик масштабного перетворення напруги високовольтного прецизійного автотрансформатора напруги .....	123
4.3 Розрахунок похибки визначення випробувальної напруги (за вимірювальною обмоткою) трансформатора ИОМ-100/25 за різних типів його навантаження .....	136
4.4 Висновки по Розділу 4 .....	156
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>158</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	<b>161</b>
Додаток А.....	175
Додаток Б .....	179
Додаток В.....	180
Додаток Г .....	181

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АТ – автотрансформатор;

АТН – автотрансформатор напруги;

ВН – висока напруга;

ЕРС – електрорушійна сила;

ЛЕП – лінія електропередачі;

МРС – магніторушійна сила;

НН – низька напруга;

ПЗ – програмне забезпечення.

ПК – персональний комп'ютер;

ТН – трансформатор напруги.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Розвиток електроенергетики потребує використання високих напруг і великих струмів. Однак, недостатнім є лише виробництво, перетворення, транспортування, розподілення та споживання електричної енергії. Необхідно також точно вимірювати високі напруги (**ВН**) та великі струми, щоб забезпечити облік електроенергії, контроль її потоків, якості, а також безпеку використання. Для вимірювання високих напруг використовують подільники напруги, трансформатори напруги (**ТН**) електромагнітного типу, електрооптичні трансформатори напруги, ємнісні трансформатори напруги, кіловольтметри, сферичні розрядники тощо. Сучасні підстанції та електромережі все частіше використовують мікроелектронні цифрові пристрої, призначені для обробки, передачі та зберігання даних з виходів первинних масштабних перетворювачів високих напруг та великих струмів. Такі пристрої дозволяють поєднувати інформацію з різних частин енергооб'єктів для подальшого її аналізу та керування. Як правило, в цьому випадку низьковольтне електронне обладнання, яке приєднують до виходів високовольтних масштабних перетворювачів напруги, має високий вхідний опір, тому стає важливим дослідження холостого ходу, або наближених до нього режимів електромагнітних ТН, які найбільш широко використовуються на підстанціях та в електромережах.

На відміну від високовольтних ТН, вимірювальні автотрансформатори напруги (**АТН**) дозволяють одержувати більшу кількість значень вихідної напруги при зменшених, ніж у аналогічних ТН габаритах та масі. Це є особливо привабливим при підключенні на вихід вимірювальних автотрансформаторів напруги аналогово-цифрових перетворювачів, які можуть мати різні вхідні напруги, що значно менші номінальних вихідних напруг типових ТН. В таких випадках використання АТН дозволяє уникнути встановлення додаткових проміжних перетворювачів напруги, які збільшують похибки та зменшують надійність систем з використанням

цифрових пристроїв. На жаль, до цього часу високовольтні автотрансформатори напруги практично не використовувались для вимірювання високих напруг.

Найбільш складною задачею при розрахунках характеристик високовольтних вимірювальних АТН є визначення потоків магнітного розсіювання, які впливають на розподіл напруги по витках обмоток і, відповідно, на точність масштабного перетворення високої напруги. Ця задача додатково ускладнюється тим, що для робочих режимів АТН, наближених до холостого ходу, неможливо використовувати в розрахунках їх параметрів відомі формули індуктивності розсіювання, які традиційно використовуються для силових автотрансформаторів, за умови рівності нулю сумарної магніторушійної сили (МРС) частин обмотки.

Велика кількість витків обмотки АТН створює додаткові ускладнення, пов'язані з появою міжшарових та міжвиткових ємнісних складових струмів, вплив яких на розподіл напруги по витках в усталених режимах ще детально не досліджувався.

Розроблення високовольтних автотрансформаторів напруги доцільно виконувати шляхом моделювання процесів в їх активних частинах, в тому числі, на етапі проектування. Визначення розподілення магнітного та електричного полів в обмотках АТН чисельними методами за допомогою відповідних програм з використанням персональних комп'ютерів (ПК) дозволяє розраховувати параметри розсіювання і інші параметри автотрансформаторів напруги, визначати розподіл напруги по окремих групах витків їхніх обмоток, удосконалювати математичні моделі таких пристроїв.

В Україні основи теорії високовольтних масштабних перетворювачів струму та напруги розроблені в Інституті електродинаміки НАНУ у працях академіка НАНУ Б.С. Стогнія, вчених Варського Г. М., Пилипенка Ю. В., Танкевича Є. М. У ПАТ «Український науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут трансформаторобудування» (м. Запоріжжя) В. К. Кілевим створена серія високовольтних трансформаторів

напруги вищих класів точності. Проте опублікованих досліджень з особливостей роботи високовольтних вимірювальних автотрансформаторів напруги не виявлено, в зв'язку з чим побудова теорії високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги, є актуальним науковим завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі техніки і електрофізики високих напруг (з 01.07.2018 р. – кафедра теоретичної електротехніки) факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у відповідності до плану науково-дослідних робіт по комплексній програмі «Енергетика сталого розвитку»: «Концепція створення та впровадження високовольтних масштабних перетворювачів напруги для моніторингу визначення якості електричної енергії в електричних мережах 220-750 кВ» (державний реєстраційний № **0110U006742**), «Зменшення масогабаритних показників трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН, розширення робочого діапазону та зменшення похибок трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН» (державний реєстраційний № **0113U008072**, де КМПЕН – коефіцієнт масштабного перетворення електричної напруги), в яких здобувач був відповідальним виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розвиток методів математичного моделювання автотрансформаторного перетворення напруги у високовольтних вимірювальних пристроях на основі уточнених ланцюгових та польових математичних моделей, удосконалення виконання цих пристроїв та зменшення їх похибок при вимірюванні високої напруги, створення на цій основі нових високоефективних експериментальних зразків високовольтної вимірювальної техніки, в яких використовується автотрансформаторне перетворення напруги.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступні задачі:

– розвинути метод математичного моделювання розсіювання магнітного поля в високовольтних вимірювальних автотрансформаторах напруги для визначення їх відповідних параметрів;

– виявити особливості масштабного перетворення напруги в високовольтних випробувальних трансформаторах, в яких відбувається комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення високої напруги, та визначити фактори, що суттєво впливають на їх характеристики;

– удосконалити систему рівнянь вимірювальних автотрансформаторів напруги для визначення розподілу напруги по окремих витках (групах витків) їх обмоток;

– розробити малогабаритний високовольтний багатодіпазонний автотрансформаторний масштабний перетворювач напруги класу точності 0,05;

– запропонувати метод коригування характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів, в яких відбувається комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення високої напруги.

**Об’єкт дослідження** – електричні та магнітні поля в обмотках високовольтних вимірювальних перетворювачів напруги автотрансформаторного типу.

**Предмет дослідження** – вплив розподілення електричних та магнітних полів на параметри автотрансформаторного перетворення високої напруги.

**Методи дослідження** пов’язані з використанням:

– теорії електромагнітного поля та його електричних і магнітних складових (аналіз розподілу електричної та магнітної складових електромагнітного поля в активній частині автотрансформатора напруги

дозволяє визначати фактори та ступінь їх впливу на розподіл напруги по витках та групах витків обмоток);

– теорії високовольтних електричних апаратів (визначення спільних особливостей режимів автотрансформаторів та трансформаторів напруги дозволяє пов'язувати теоретичний розгляд з особливостями розподілення електромагнітного поля в обмотках та магнітопроводах);

– теорії електроізоляційних та магнітних матеріалів (визначення граничних меж застосування електротехнічних матеріалів та змін їх властивостей в цих межах дозволяє зменшувати масогабаритні показники електротехнічного обладнання);

– теорії електричних вимірювань при високовольтних випробуваннях (визначення параметрів електричних та магнітних кіл високовольтних автотрансформаторів та трансформаторів за різних режимів роботи дозволяє в подальшому виконувати їх математичне моделювання);

– математичного моделювання та розрахунку електричних і магнітних полів за допомогою відповідних програм з використанням ПК (моделювання активної частини АТН та чисельні розрахунки за допомогою ПК дозволяють одержувати розрахункові значення параметрів АТН для їх порівняння з експериментальними даними);

– математичної статистики (оцінювання розбіжності серій експериментальних даних, результатів моделювання за різними математичними моделями та програмними засобами дозволяє оцінювати похибку визначених результатів та ступінь їх взаємної відповідності);

– обробки результатів натурних та модельних експериментів (обробка результатів експериментів та моделювання дозволяє виконувати їх співставлення за визначеними критеріями);

– виконанням метрологічних робіт з високовольтними засобами вимірювальної техніки (визначення метрологічних характеристик розробленого високовольтного вимірювального електрообладнання

експериментальним шляхом дозволяє підтверджувати чи спростовувати запропоновані в роботі положення).

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– Вперше запропоновано метод вибору оптимального розташування вихідної частини обмотки високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги, який забезпечує отримання з високою точністю заданих параметрів приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання автотрансформатора напруги.

– Вперше виявлено причину аномально великих похибок при вимірюванні (з використанням вимірювальної обмотки) випробувальної напруги при ємнісному навантаженні високовольтних випробувальних трансформаторів та обґрунтовано метод їх усунення.

– Вперше розроблено математичну модель високовольтного автотрансформатора напруги, що, на відміну від існуючих моделей, дозволяє визначати розподіл напруги по окремих витках (або групах витків) обмотки.

– Удосконалено математичну модель розсіювання магнітного поля для високовольтного автотрансформатора напруги з використанням вісесиметричних моделей у циліндричній системі координат, що дозволяє увести дольові коефіцієнти впливу «стрижневої» та «ярмової» складових розсіювання для розрахунку параметрів АТН.

– Отримав подальший розвиток аналіз ємнісних струмів в обмотках високовольтних автотрансформаторів напруги та запропоновано векторну діаграму для розрахунку їх впливу на розподіл напруги по витках (групах витків) обмоток.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

– Запропоновано пристрій компенсації надлишкової індуктивності розсіювання «вимірювальної обмотки» випробувального трансформатора з

високовольтною обмоткою, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, на що одержано патент України на винахід № 102864 «Високовольтний випробувальний трансформатор».

– Створено високовольтний вимірювальний автотрансформатор з максимальною робочою напругою 19 кВ класу точності 0,05, впроваджений у Вторинному еталоні України змінного струму частоти 50 Гц класу 110 кВ в Державному підприємстві «Укрметртестстандарт». Результати розрахунків характеристик високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги, виконані за теоретично розробленими в дисертації матеріалами, підтверджені даними державної метрологічної атестації.

– Створений та метрологічно атестований високовольтний випробувальний трансформатор на напругу 180 кВ зі зменшеними масогабаритними показниками, з вихідною частиною обмотки, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, що дозволяє вимірювати випробувальну напругу на об'єкті випробувань з похибкою, що відповідає вимогам міжнародних стандартів, при зміні номінальної потужності навантаження трансформатора від 0 до 8000 Вт.

**Особистий внесок здобувача.** Результати, викладені у дисертаційній роботі, одержані автором особисто під науковим керівництвом професора, д. т. н. Бржезицького В. О. В наукових публікаціях, які підготовлені у співавторстві, здобувачу належать: вивід одержаних математичних виразів та побудова векторних діаграм [82, 93, 96, 98, 110, 112, 116, 117], проведення експериментальних досліджень й обробка їх результатів [41, 57, 93, 100, 111, 113, 115, 120], обґрунтування використання двоскладової вісесиметричної моделі автотрансформатора напруги для врахування «стрижневої» та «ярмової» складових розсіювання [112], розрахунки параметрів розсіювання високовольтного автотрансформатора напруги за допомогою програм на ПК [82, 111, 112, 118], визначення впливу ємнісних складових струмів в обмотці високовольтного АТН на розподіл напруги по витках [85].

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідались:

– на Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», (м. Київ) у 2008, 2009 рр.;

– на Міжнародному симпозиумі SIEMA`2009 «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів» (м. Харків);

– на VII науково-практичній конференції «Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні», 9 – 10 червня 2009 р. (м. Київ);

– на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки»: у м. Вінниця, 2012 р. та у м. Київ, 2014 р;

– на Міжнародному симпозиумі SIEMA`2016 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях (з них 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на винахід, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 1 стаття в інших виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 181 сторінці, ілюстрована 51 рисунком по тексту, 6 таблицями по тексту, містить список використаних джерел зі 120 найменувань на 14 сторінках та 4 додатки.

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1.1. Високовольтні автотрансформатори

Переваги силових автотрансформаторів, у порівнянні з силовими трансформаторами, ґрунтовно описані в [1]. В своїй роботі [1] автор пропонує розглядати обмотки силового понижуючого автотрансформатора, як показано на рис. 1.1:

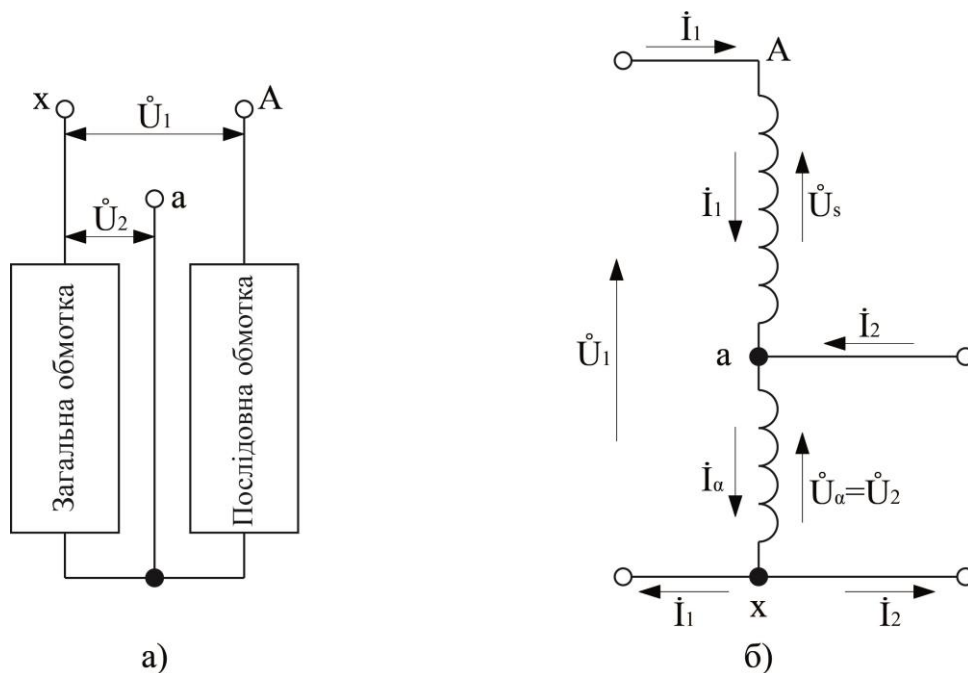


Рис. 1.1 Однофазний понижуючий автотрансформатор за [1]: а) – розташування обмоток; б) – схема з'єднань

Якщо позначити загальну кількість витків обмотки  $A - x$  як  $W_1$ , а обмотки  $a - x$  як  $W_2$ , тоді кількість витків у обмотці  $A - a$  буде дорівнювати  $W_s = W_1 - W_2$ . Коефіцієнт трансформації між первинною та вторинною сторонами автотрансформатора  $k = W_1 / W_2$ . Рівняння магніторушійних сил для автотрансформатора за [1] записується у вигляді:

$$\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2 = \dot{I}_m \cdot W_1, \quad (1.1)$$

де  $\dot{I}_m$  – «уявний» (фактично, фіктивний) намагнічуючий струм (реактивна складова струму холостого ходу), що протікає по всій обмотці  $A - x$ . Відповідно, рівняння [1] для напруг обмоток  $A - x$  та  $A - a$  мають вигляд:

$$\dot{u}_1 = \dot{I}_1(Z_s - Z_\alpha(k-1)) + \dot{I}_m(Z_m + k \cdot Z_\alpha); \quad (1.2)$$

$$\dot{u}_2 = \dot{I}_2 \cdot Z_\alpha(1 - 1/k) + \dot{I}_m(Z_m/k + k \cdot Z_\alpha), \quad (1.3)$$

де комплексний опір розсіювання обмотки  $A - a$ :  $Z_s = r_s + jx_s$  ( $r_s$  та  $x_s$  – активна та реактивна складові опору розсіювання обмотки  $A - a$ ); комплексний опір розсіювання обмотки  $a - x$ :  $Z_\alpha = r_\alpha + jx_\alpha$  ( $r_\alpha$  та  $x_\alpha$  – активна та реактивна складові опору розсіювання обмотки  $a - x$ );  $Z_m$  – комплексний опір намагнічуючого контуру. Для приведення напруг та струмів у виразі (1.3) до кількості витків первинної сторони автотрансформатора автор приводить наступний вираз [1]:

$$\dot{u}'_2 = \dot{I}'_2 \cdot Z_\alpha(1 - 1/k) + \dot{I}_m(Z_m/k + k \cdot Z_\alpha), \quad (1.4)$$

де  $\dot{u}'_2 = \dot{u}_2 \cdot k$ ;  $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2/k$ .

Для розгляду процесів у активній частині автотрансформатора в [1] пропонується використовувати наступну схему заміщення:

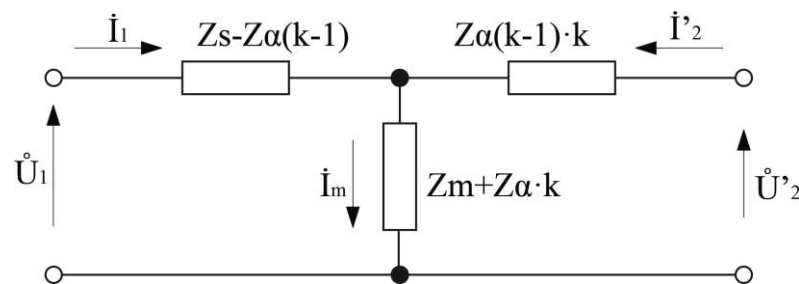


Рис. 1.2 Схема заміщення силового автотрансформатора

Особливістю автотрансформатора є те, що, на відміну від трансформатора, в якому енергія між обмотками передається лише магнітним полем, в автотрансформаторі частина енергії передається у вторинне коло безпосередньо. Чим меншим є коефіцієнт трансформації для силового автотрансформатора, тим вигіднішим є його використання, у порівнянні з трансформатором, оскільки зменшується потужність, яку необхідно передавати магнітним полем, відповідно, зменшується кількість сталі

магнітопроводу, необхідна менша кількість міді для обмоток, що приводить до зменшення масогабаритних показників. Однак, ці переваги силових автотрансформаторів стосуються лише високовольтних електромереж з заземленою нейтраллю (110 кВ і вище) та коефіцієнтів трансформації, які не перевищують 3-4 [1].

Слід відзначити, що в [1] автор не наводить методики розрахунку індуктивності розсіювання для режимів холостого ходу АТ. Це звужує область застосування наведених автором [1] формул індуктивності розсіювання лише для силових автотрансформаторів, при виконанні умови  $I_1 \cdot W_1 + I_2 \cdot W_2 = 0$ , яка, фактично, не виконується та суперечить формулі (1.1).

Некоректними вихідними положеннями [1] пояснюється і те, що при певному підборі параметрів  $Z_s, Z_a$  параметр  $Z_s - Z_a \cdot (k-1)$  в схемі рис. 1.2 може стати від'ємним (навіть, по активному опору!), що протирічить основоположним поняттям електротехніки. Бажання у багатьох роботах привести розрахунок режимів трансформаторів до розрахунку певної схеми заміщення не завжди є продуктивним, оскільки більш точним є опис трансформаторів за системою рівнянь.

## 1.2. Масштабні перетворювачі високих напруг

У високовольтних електромережах, на підстанціях, відбувається не тільки передача або трансформація потужності. Необхідно контролювати рівні напруг і струмів, щоб забезпечити безперебійну роботу енергосистеми та попереджувати аварійні або нештатні режими її роботи. З цією метою використовується низка високовольтних засобів вимірювальної техніки, які застосовуються для певних цілей: вимірювання напруг та струмів для обліку електроенергії, масштабного перетворення напруг та струмів для кіл керування, релейного захисту та автоматики, контролю показників якості електроенергії, згідно відповідних стандартів України та міжнародних стандартів [2 – 7], тощо.

Поширеною категорією високовольтних засобів вимірювальної техніки є високовольтні трансформатори напруги, які ґрунтовно розглядаються в [8, 9]. Довідкові матеріали стосовно конструкцій типових ТН наведені в [10 – 12]. Конструкції таких типових трансформаторів, як НОМ-6, НОМ-10, ЗНОМ-35, НКФ-110, НКФ-220 тощо розглянуті в [10, 11], що дозволяє розраховувати їх характеристики за типовими методиками, викладеними в [10, 11], а також мати уявлення про просторові конструкції й геометричні розміри магнітопроводів та обмоток найбільш поширених типів таких ТН. Окрім цих трансформаторів для вимірювання високої напруги також використовуються серійні трансформатори електромагнітного типу НАМИ (антирезонансний), НОГ (з елегазовою ізоляцією), закордонні аналоги таких трансформаторів. Проте, в зазначених вище джерелах немає жодних відомостей про те, яким чином розраховувати індуктивності розсіювання обмоток високовольтних ТН, які є одними з основних параметрів розрахунку характеристик трансформаторів. В [10] наведена векторна діаграма напруг, струмів та електрорушійних сил (ЕРС), які діють в активній частині трансформатора напруги на холостому ході, яка представлена на рис. 1.3.

Прикладену до первинної обмотки ТН високу напругу пропонується за [10] розкласти на вектор електрорушійної сили з від'ємним знаком  $-E_{10}$  та результуючий вектор активної та реактивної складових спаду напруги від протікання струму холостого ходу  $f_{U0}$ . Також, в [10] викладені формули для розрахунку похибок ТН при холостому ході та при приєднанні до вторинної обмотки навантаження, однак, методу визначення параметрів розсіювання, необхідних для розрахунку відповідних складових напруги, для цих формул не наведено. Крім того, виділення струму  $\dot{I}_m$  у «магнітному контурі  $\dot{Z}_m$ » є помилковим, оскільки в ньому протікає струм холостого ходу  $\dot{I}_0$  (за рис. 1.3). Схема заміщення ТН, згідно [1], може бути представлена відповідно до рис. 1.4.



основним допущенням для визначення розсіювання в силових трансформаторах та автотрансформаторах [1, 13]. Тому, для розрахунку індуктивності розсіювання вищезазначених обмоток АТН (ТН) не придатні відомі формули розрахунку індуктивності розсіювання для силових трансформаторів, викладені, наприклад, в [1, 13].

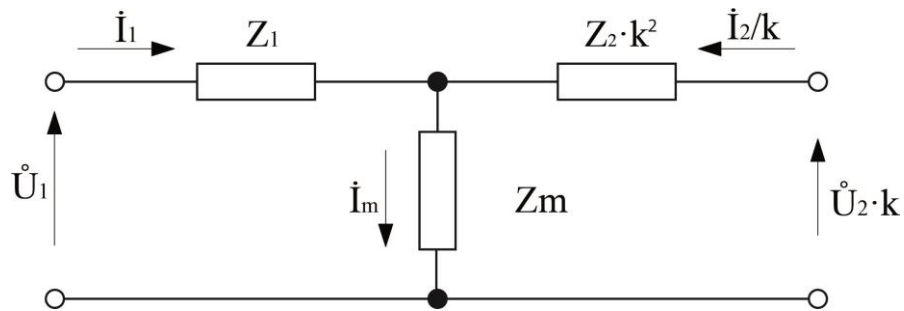


Рис. 1.4 Схема заміщення трансформатора напруги за [1]:  $Z_1$ ,  $Z_2$  – комплексні опори від втрат у первинній та вторинній обмотках, відповідно

Спроби розраховувати індуктивність розсіювання за допомогою комп'ютерних програм виконуються вже достатньо давно. Наприклад, в [14] для визначення індуктивності розсіювання обмоток силового трансформатора авторами використовувалась формула для векторного потенціалу магнітного поля в циліндричній системі координат та метод побудови відображень витків для створення матриці індуктивностей. В [14] також наведена методика обчислення ємностей витків на заземлені частини конструкції трансформатора. Хоча запропонований в [14] авторами метод розрахунку індуктивності розсіювання був на той час достатньо прогресивним, тим більше, що дозволяв визначати залежності параметрів трансформатора від частоти, однак, такий метод неприйнятний для сучасних ТН, що мають десятки тисяч витків. Також метод [14] не враховує вплив ярем на потоки розсіювання. Згадана проблема частково досліджувалась авторами в [15], де для аналізу впливу форми та розташування витків обмоток трансформаторів на потоки розсіювання та, відповідно, на розподіл напруги по витках обмоток використовувались чисельні розрахунки на основі скінченно-елементного моделювання. Більш детально аналітичні та

чисельні методи розрахунку індуктивності розсіювання для багатообмоткових трансформаторів розглянуто в [16]. В цій роботі автори запропонували спрощені чисельні розрахунки, побудовані на скінченно-елементному моделюванні, з використанням вісесиметричної моделі обмоток трансформатора (замість моделі у тривимірній системі координат). Додатково авторами в [16] запропонований метод моделювання впливу ярем магнітопроводу у запропонованій вісесиметричній моделі.

Для високовольтного вимірювального АТН ґрунтовна теорія розрахунку потоків розсіювання та їх впливу на розподіл струмів та напруги по обмотці відсутня, й можуть бути лише опосередковано задіяні для цього рівняння, викладені в [1, 13] та інших аналогічних джерелах. Автотрансформаторне перетворення напруги використовується, переважно, для прецизійного масштабного перетворення низької напруги – в індуктивних подільниках напруги [17 – 20], або в комбінованих пристроях трансформаторного та автотрансформаторного перетворення напруги, таких, наприклад, як серійні випробувальні трансформатори ИОМ-100/25 з високовольтною обмоткою, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги.

Високовольтні подільники напруги, призначені для вимірювання високих напруг [21], порівняно із АТН (ТН), мають певні переваги та недоліки. До їх переваг можна віднести відносно стабільні показники точності в широкому діапазоні частоти вхідної високої напруги для ємнісно-омічних подільників напруги, що досліджено в [21 – 25]. Принципова схема подільника напруги ємнісно-омічного типу [25] наведена на рис. 1.5.

Вхідна висока напруга  $U_{вх}$  подається на вхід кола зосереджених елементів подільника напруги, інший вихід якого заземлений. Струм, який протікає крізь коло зосереджених елементів, створює спадання напруги на кожній ділянці, які, в основному, є пропорційними комплексному опорі цих ділянок [21]. Такі високовольтні широкосмугові подільники напруги ємнісно-омічного типу за певним класом точності можуть бути використані в якості масштабних перетворювачів високої напруги для визначення показників

якості електроенергії у відповідності до [2]. Однак, в [26] виявлено чутливість кола зосереджених елементів високовольтних широкосмугових подільників напруги ємнісно-омічного типу до впливу зовнішніх електричних полів, і це питання на даний час потребує додаткових досліджень.

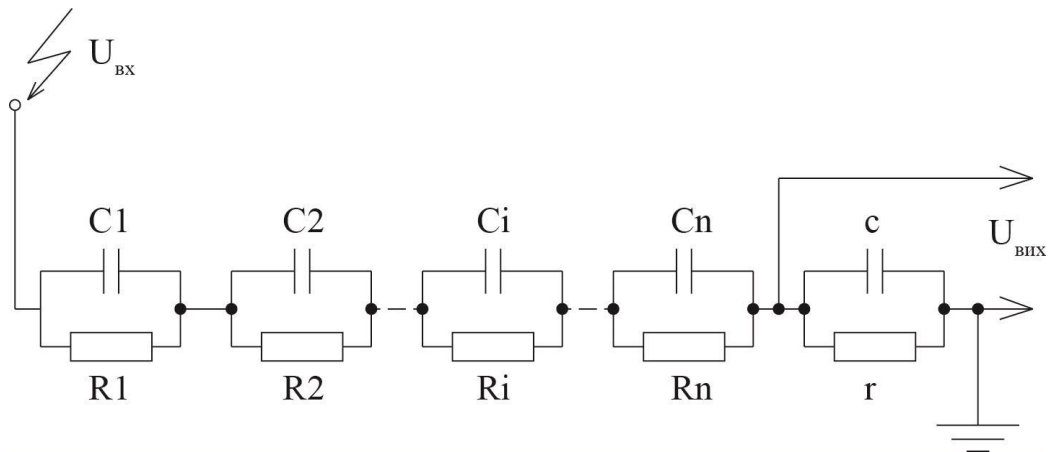


Рис. 1.5 Схема високовольтного подільника напруги ємнісно-омічного типу [25]:  $C_1 \dots C_n$  – ємності зосереджених елементів високовольтного плеча;  $R_1 \dots R_n$  – активні опори зосереджених елементів високовольтного плеча;  $c$ ,  $r$  – ємність та опір у низьковольтному плечі подільника напруги (з урахуванням його навантаження)

Оптоелектронні трансформатори напруги не мають широкого застосування внаслідок недостатньої вивченості особливостей їх характеристик [27], залежностей цих характеристик від впливу температур, зовнішніх електромагнітних полів, недостатньої стійкості електронних компонентів до тривалої стабільної роботи в умовах впливу електромагнітних завад. Проте, переваги оптоелектронних трансформаторів струму є корисними [27] на надвисоких напругах, де суттєвою є вартість високовольтної ізоляції, або при вимірюванні дуже значних струмів.

Виконання оптоелектронного трансформатора напруги, згідно [28], являє собою високовольтний подільник напруги, між елементами активної частини якого розташовані оптоелектронні датчики – комірки Поккельса, які реагують на зміну напруженості електричного поля зміною кута повороту

площини поляризації світлового променя, який направлений крізь низку датчиків з області високовольтного електроду до приймача поляризованого променя світла в області низьковольтного електроду. Як відмічається в [29], розробки оптоелектронних трансформаторів струму й напруги проводились ще за часів СРСР, проте, невирішеність ряду питань температурної залежності, чутливості до вібрацій та ряду інших не дозволили перейти до серійного виготовлення оптоелектронних ТН. На рис. 1.6 наведено конструкцію комбінованого оптоелектронного трансформатора напруги та струму NXVCT-230 [28].

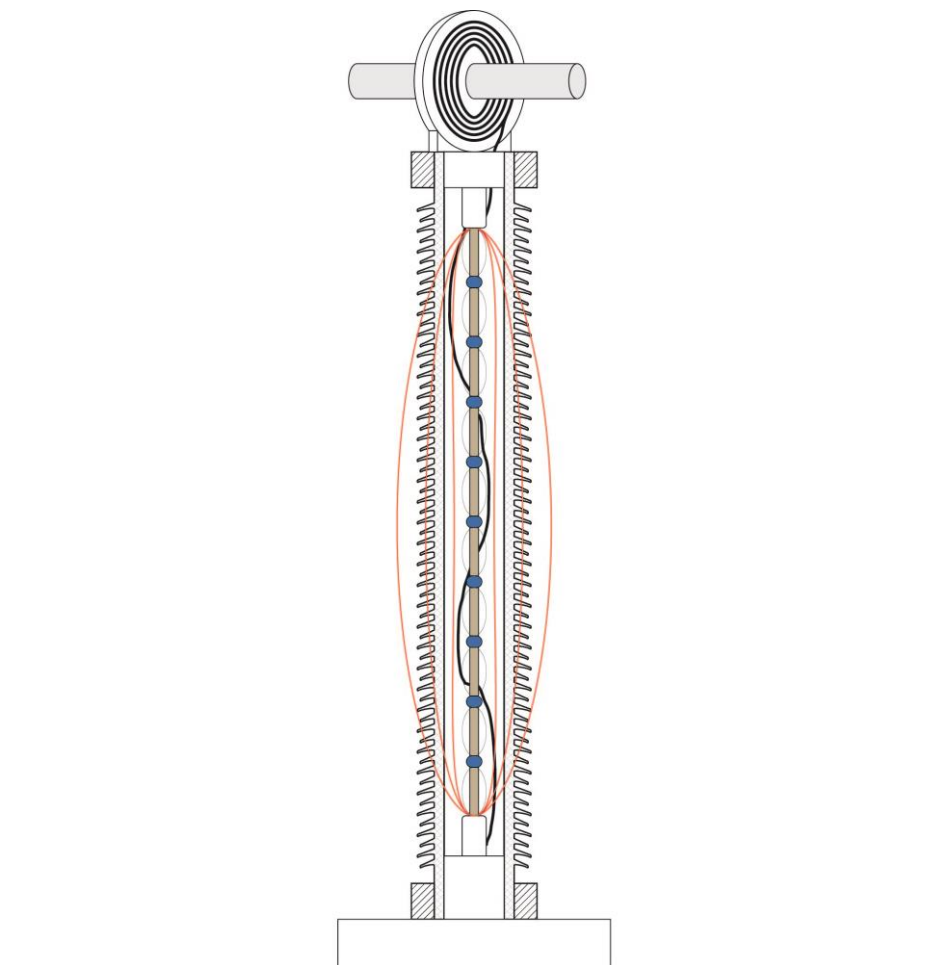


Рис. 1.6 Конструкція комбінованого оптоелектронного трансформатора напруги та струму NXVCT-230 [28]

Як можна бачити, активна частина такого ТН не захищена від впливу зовнішніх електричних полів, отже, якими б не були чутливими датчики розташованого всередині діелектричної покритишки подільника напруги, вплив

зовнішніх електричних полів в цій конструкції буде призводити до тих самих наслідків, що описані в [26].

Використання високочутливих мікроелектронних компонентів у складі оптоелектронних трансформаторів напруги, як це відзначено в [29], не може підвищувати надійність таких високовольтних засобів виміральної техніки.

Ємнісні трансформатори напруги, які використовують для вимірювання надвисоких напруг змінного струму та для високочастотного зв'язку по високовольтних лініях електропередач (ЛЕП), являють собою поєднання ємнісного подільника напруги та електромагнітного ТН. В [10] наведені структурна та принципова схеми ємнісного трансформатора напруги. На рис. 1.7 [10] наведені ці схеми ємнісного трансформатора напруги.

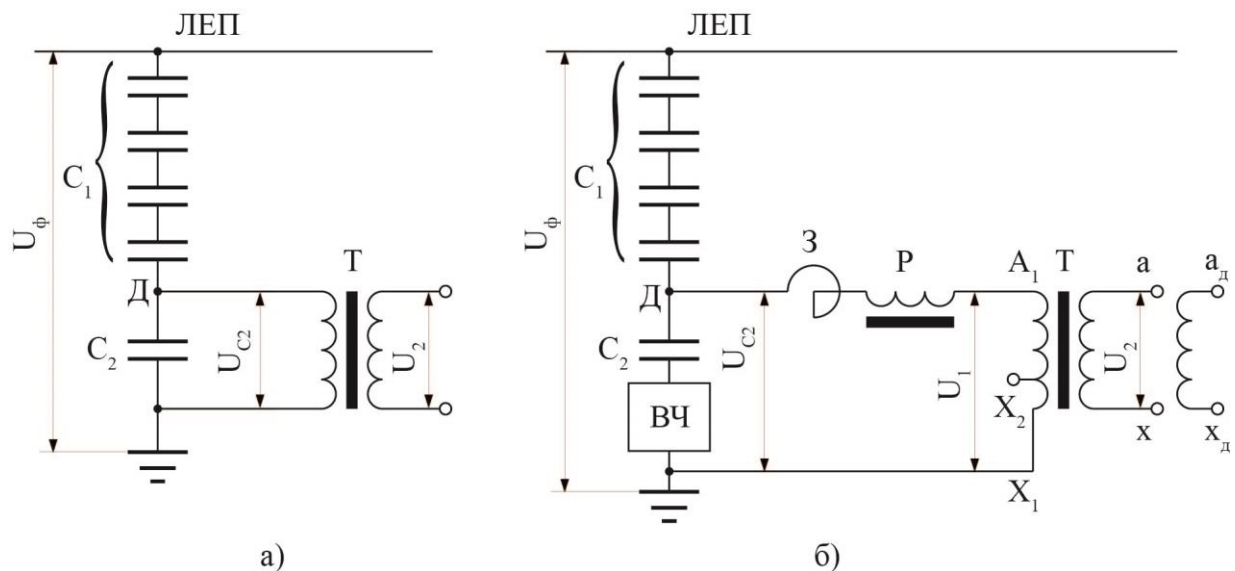


Рис. 1.7 [10] Ємнісний трансформатор напруги: а) структурна схема; б) принципова схема;  $C_1$ ,  $C_2$  – конденсатори ємнісного подільника напруги; Т – електромагнітний трансформатор напруги; З – високочастотний загороджувач; Р – реактор; ВЧ – блок високочастотного зв'язку

Висока напруга з ЛЕП  $U_\phi$  розподіляється на ємнісному подільнику напруги обернено пропорційно складовим його ємностям  $C_1$ ,  $C_2$ . Точка Д на рис. 1.7 є точкою ділення високої напруги. Конденсатор  $C_2$  називають конденсатором відбору потужності. Напруга на цьому конденсаторі за допомогою понижуючого трансформатора Т перетворюється до рівня низької

напруги, що дозволяє не тільки вимірювати високу напругу ЛЕП, а й використовувати перетворену напругу в колах релейного захисту та автоматики. Ємність  $C_1$  складається з ємнісних конденсаторів зв'язку, які використовуються на підстанціях. В принциповій схемі ємнісного ТН за рис. 1.7 б) блок високочастотного зв'язку приєднується не безпосередньо до колони конденсаторів зв'язку, а включається між точкою заземлення та конденсатором відбору потужності  $C_2$ . Для компенсації ємнісних струмів між точкою  $D$  та високовольтним відводом первинної обмотки трансформатора  $T$  включають реактор  $P$ . Для запобігання впливу роботи трансформатора  $T$  на блок високочастотного зв'язку  $ВЧ$  між реактором  $P$  та точкою  $D$  додатково включають високочастотний загороджувач  $З$ . Значення індуктивного опору реактора  $P$  підбирають за формулою [10]:

$$X_p = \frac{1}{\omega \cdot (C_1 + C_2)} - X_T, \quad (1.5)$$

де  $\omega$  – кутова частота напруги;  $C_1$  – загальна ємність послідовно з'єднаних конденсаторів зв'язку;  $C_2$  – ємність конденсатора відбору потужності;  $X_T$  – індуктивний опір понижуючого трансформатора, який визначають з досліду короткого замикання.

Оптимальна, на перший погляд, описана конструкція ємнісного трансформатора напруги, що поєднує одразу декілька функцій, має ряд недоліків [30]. По-перше, ємнісний подільник напруги, що входить до складу ємнісного ТН, має недоліки, зазначені вище для подільників напруги. Крім цього, як видно з рис. 1.7, схема ємнісного ТН має коливальний контур, а отже, має резонансні частоти і, як підтверджують дослідження [29], це може у різних режимах роботи електромережі та ємнісного ТН призводити до ферорезонансних явищ. Дослідження цих явищ та методи їх протидії викладені у численних вітчизняних та закордонних дослідженнях з цієї тематики, наприклад, в [31 – 35].

Окрім електромагнітних, ємнісних, оптоелектронних ТН та подільників напруги для вимірювань високої напруги використовують також

кіловольтметри та сферичні розрядники, однак, виконання цих високовольтних вимірювачів напруги дозволяють використовувати їх лише в лабораторних умовах. Крім того, будова цих високовольтних пристроїв не передбачає приєднання до них інших вимірювальних або фіксуєчих приладів, тобто, висока напруга з використанням кіловольтметрів та розрядників визначається оператором безпосередньо. З цієї причини в подальшому огляді кіловольтметри та сферичні розрядники не розглядаються.

Оскільки найбільш застосовуваними серед високовольтних масштабних перетворювачів напруги залишаються трансформатори напруги електромагнітного типу, подальший огляд досліджень високовольтних засобів вимірювальної техніки буде зосереджений саме на характеристиках високовольтних ТН цього типу.

### **1.3 Розрахунки характеристик високовольтних трансформаторів напруги**

Основним документом, який регламентує сучасні вимоги до високовольтних ТН електромагнітного (індуктивного) типу, є стандарт ДСТУ ІЕС 60044-2:2008 [36] (в Загальних положеннях цього нормативного документу зазначається: «Хоча стандарт стосується в основному трансформаторів з окремими обмотками, його також можна поширити, де це доречно, на автотрансформатори» [36]). В цьому документі містяться вимоги до похибки визначення напруги у відсотках за формулою:

$$\Delta = \frac{K_n \cdot U_s - U_p}{U_p} \cdot 100, \quad (1.6)$$

де  $K_n$  – номінальний коефіцієнт трансформації;  $U_p$  – дійсна первинна напруга;  $U_s$  – дійсна вторинна напруга, яка, в ідеальному випадку, повинна дорівнювати  $U_p / K_n$ . В цьому ж стандарті містяться вимоги до похибок напруги та кутових похибок ТН класів точності від 0,1 до 3,0. Окрім вимог стосовно похибок, нормативний стандарт [36] також містить вимоги до

стійкості ізоляції ТН до випробувальної напруги промислової частоти, впливу повного та зрізаного грозового імпульсів, вимоги до часткових розрядів в ізоляції та інші. Для лабораторних трансформаторів напруги є чинним аналогічний стандарт [37], в якому містяться вимоги до лабораторних ТН класів точності 0,05; 0,1; 0,2.

Виконання ізоляції високовольтних обмоток ТН, згідно [10, 12], залежить від багатьох факторів, як то клас напруги, наявність каскадування обмоток, наявність рідинного, твердого чи газового діелектрику тощо. Однак, спільним для конструкцій високовольтних ТН є виконання високовольтних обмоток багат шаровими (може виконуватись також поділ високовольтної обмотки ТН на окремі котушки). На рис. 1.8 [10] представлені типові виконання одношарової та багат шарової обмоток ТН.

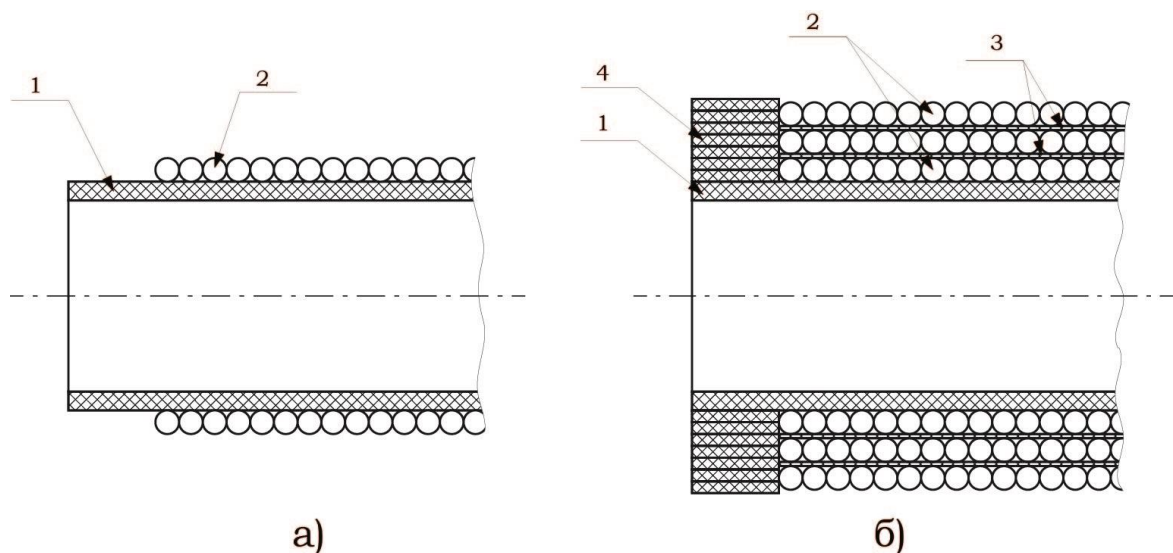


Рис. 1.8 Обмотки трансформатора напруги [10]: а) одношарова; б) багат шарова; 1 – ізоляційний циліндр; 2 – обмотковий провід; 3 – міжшарова ізоляція; 4 – кінцева (торцева) ізоляція

Циліндр 1 з обмоткою (згідно рис. 1.8) розміщується на стрижні магнітопроводу. Для трансформаторів класів напруг 110 кВ і вище потенціал на витках високовольтної обмотки збільшується з віддаленням від стрижня, тому, для збільшення відстані витків обмотки від ярем магнітопроводу виконують ступінчасте зменшення кількості витків у шарах обмотки ВН

(обмотка ВН у перерізі має форму, близьку до трапеції). Крім цього, вхідні шари обмотки ВН екранують електростатичним екраном з метою вирівнювання розподілення напруженості електричного поля в ізоляції обмотки. Також у деяких типах конструкцій ТН використовують ємнісні кільця для вирівнювання розподілення електричного поля поблизу ярем магнітопроводу. В [10] також наведені дані кількості витків обмоток різних типів серійних ТН, марок та діаметрів обмоткових проводів, використуваної ізоляції обмоток. Не зважаючи на ґрунтовну інформацію щодо конструкцій обмоток ТН в [10], автор так і не визначив методик розрахунку параметрів розсіювання для розрахунку реактивних складових втрат напруги, які пропонує використовувати в розрахунку ТН.

Магнітопроводи ТН виконуються шихтуванням з пластин електротехнічної сталі, переріз стрижнів – ступінчастий, переріз ярем – прямокутний або ступінчастий. Дані про розміри магнітопроводів типових ТН також наведені в [10].

Крім цього, в [10] наведені відомості про типові високовольні вводи та покриття, які використовуються в ТН з паперово-масляною ізоляцією. Слід відзначити, що хоча високовольні порцелянові покриття досі виробляються й використовуються, в конструкціях сучасних ТН все більше застосування знаходять покриття з полімерних матеріалів та силіконових гум.

Як відомо [38], сигнал напруги промислової частоти має форму, що відрізняється, в загальному випадку, від форми синусоїдної залежності у часі для робочої частоти. Це пов'язано не тільки з особливостями виконання та роботи генераторів напруги промислової частоти [39], а й з такими факторами, як перетворення постійної напруги в змінну інверторами й змінної в постійну випрямлячами [40], експлуатація силових та вимірювальних трансформаторів при підвищених значеннях магнітної індукції в елементах магнітопроводів (при підвищеній нарузі на вводах) [41], наявність споживачів з нелінійним навантаженням, несиметричні навантаження тощо. В роботах [41 – 44] показано, що електромагнітні

трансформатори напруги не тільки спотворюють вхідні гармонічні складові високої напруги промислової частоти, а й є джерелами додаткових гармонічних складових напруги на вихідних обмотках трансформаторів. В [45] показано вплив характеристик магнітної системи ТН на перетворення гармонічних складових напруги.

Складна будова ізоляції високовольтних ТН обумовлює велику кількість міжвиткових та міжшарових ємностей, ємностей на заземлені частини конструкції ТН частин обмоток, що знаходяться під різними потенціалами. Внаслідок нерівномірного розподілення напруги по витках (групах витків) обмоток, високовольтні обмотки ТН становлять собою складні системи коливальних контурів [46], що складаються з активних опорів ділянок обмоткового проводу, індуктивностей витків та міжвиткових (міжшарових) ємностей, а також ємностей на заземлені частини конструкції. Внаслідок існування резонансів для кожного такого коливального контуру [38] трансформатори напруги мають низку резонансних частот, на яких суттєво змінюються розподіл напруги по витках і, відповідно, похибка масштабного перетворення високої напруги та кутлова похибка. Результати досліджень з цієї тематики представлені в [46 – 53]. Слід відзначити, що ці дослідження стосуються типових ТН, які працюють в умовах реальних електричних мереж, станцій та підстанцій, та не охоплюють високоточні лабораторні ТН.

Високовольтні вимірювальні ТН працюють в режимах, близьких до режиму холостого ходу, окрім випадків застосування ТН, до обмоток НН яких приєднуються прилади релейного захисту та автоматики, що створюють на ці обмотки певне навантаження. Режими холостого ходу ТН стають переважними для первинних масштабних перетворювачів напруги в сучасній концепції «Цифрова підстанція» [54], оскільки цифровим пристроям властивий високий вхідний опір. Саме тому важливим стає дослідження масштабного перетворення високої напруги вимірювальних ТН та АТН в режимах холостого ходу. Слід зазначити, що в [36] містяться вимоги до точності масштабного перетворення напруги ТН в режимах, наближених до

холостого ходу, хоча в попередній редакції цього стандарту [55] були визначені аналогічні вимоги лише за певних вторинних навантажень. Відсутність таких вимог раніше [55] унеможлилювала створення нових ТН та АТН, призначених для використання в концепції «Цифрова підстанція» (Smart Grid) [54], що свідчить про перспективність сучасної постановки досліджень режимів холостого ходу (та наближених до них режимів) АТН (ТН).

Залежність фактичного коефіцієнта масштабного перетворення ТН від виду навантаження пояснюється в [10, 56]. Також, в [56] відзначається, що існують випадки, коли похибка по напрузі ТН проявляється не в зменшенні вторинної напруги у порівнянні з первинною (при номінальному коефіцієнті трансформації, що дорівнює 1), а в її збільшенні, що відбувається при ємнісному навантаженні ТН.

Зазначена в [56] особливість роботи трансформатора з ємнісним навантаженням проявляється не тільки в роботі ТН, а й в роботі високовольтних випробувальних трансформаторів. Так, дослідження режимів високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з високовольтною обмоткою, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги (яка містить у своєму складі вихідну частину – так звану «вимірювальну обмотку»), проведені в [57], відзначають суттєвий вплив ємнісного навантаження на похибку вимірювання високої випробувальної напруги за допомогою вихідної частини високовольтної обмотки ИОМ-100/25, що досягає десяти і більше відсотків.

Слід відзначити, що випробувальні трансформатори ИОМ-100/25 випускалися за часів СРСР як з високовольтною обмоткою, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, так і із високовольтною обмоткою, побудованою за звичайною схемою (тобто, без виокремлення її вихідної частини – «вимірювальної обмотки»). Використання в ИОМ-100/25 високовольтної обмотки, побудованої за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, дозволяє при випробуваннях на високовольтному полі обійтись без необхідності

використання додаткового високовольтного вимірювального трансформатора напруги, наприклад, типу НКФ-170, який має вагу 1460 кг, висоту більше 4 м, діаметр більше 0,7 м та коштує близько 2400 євро. При цьому, вартість випробувального комплексу на основі трансформатора ИОМ-100/25 (його вартість – близько 3700 євро) зростає в 1,65 разів, необхідна мінімальна площа випробувального поля зростає в 1,4 рази і гостродефіцитна висота приміщення у 2,2 рази. Крім того, фактично, втрачається можливість створення мобільних високовольтних випробувальних лабораторій. Незважаючи на актуальність розглянутих питань, проблема точності вимірювання високої випробувальної напруги за допомогою використання вихідної частини високовольтної обмотки, побудованої за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, для трансформаторів типу ИОМ-100/25 та інших, аналогічних типів, за різного характеру навантаження до цього часу залишається не вирішеною. Відмітимо, що, останнім часом виробництво високовольтних випробувальних трансформаторів типу ИОМ-100/25 з високовольтною обмоткою, побудованою за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, поновлено [58], хоча зазначені вище питання не мають наукового рішення.

З питань розрахунку характеристик ТН до цього часу залишаються єдиними матеріали [10], які розглядаються нижче. Оскільки до виходу трансформатора напруги може бути приєднане навантаження (прилади релейного захисту та автоматики, обліку електроенергії), векторна діаграма струмів та напруг ТН, згідно [10], набуває вигляду, відповідного до рис. 1.9.

На рис. 1.9 позначені:  $U_{a10}$  – активна складова спаду напруги в первинній обмотці від струму холостого ходу  $I_0$ ;  $U_{a1}$  – активна складова спаду напруги в первинній обмотці від струму навантаження  $I'_1$ ;  $U'_{a2}$  – активна складова спаду напруги у вторинній обмотці (приведена до первинної обмотки);  $U_{p10}$  – індуктивна складова спаду напруги в первинній обмотці від струму холостого ходу  $I_0$ ;  $U_{p1}$  – індуктивна складова спаду напруги в первинній обмотці від струму навантаження  $I'_1$ ;  $U'_{p2}$  – індуктивна

складова спаду напруги у вторинній обмотці (приведена до первинної обмотки);  $U_1$  – первинна напруга;  $-E_{10}$  – первинна ЕРС з від’ємним знаком при холостому ході;  $-E_1$  – первинна ЕРС з від’ємним знаком при навантаженні;  $E'_2$  – приведена до кількості витків первинної обмотки вторинна ЕРС при навантаженні;  $U'_2$  – приведена до кількості витків первинної обмотки вторинна напруга;  $I'_1, I'_2$  – первинний та приведений вторинний струми при навантаженні;  $I_1$  – загальний первинний струм;  $I_0$  – струм холостого ходу;  $f_U$  – похибка напруги, у вольтах;  $\delta$  – кутова похибка.

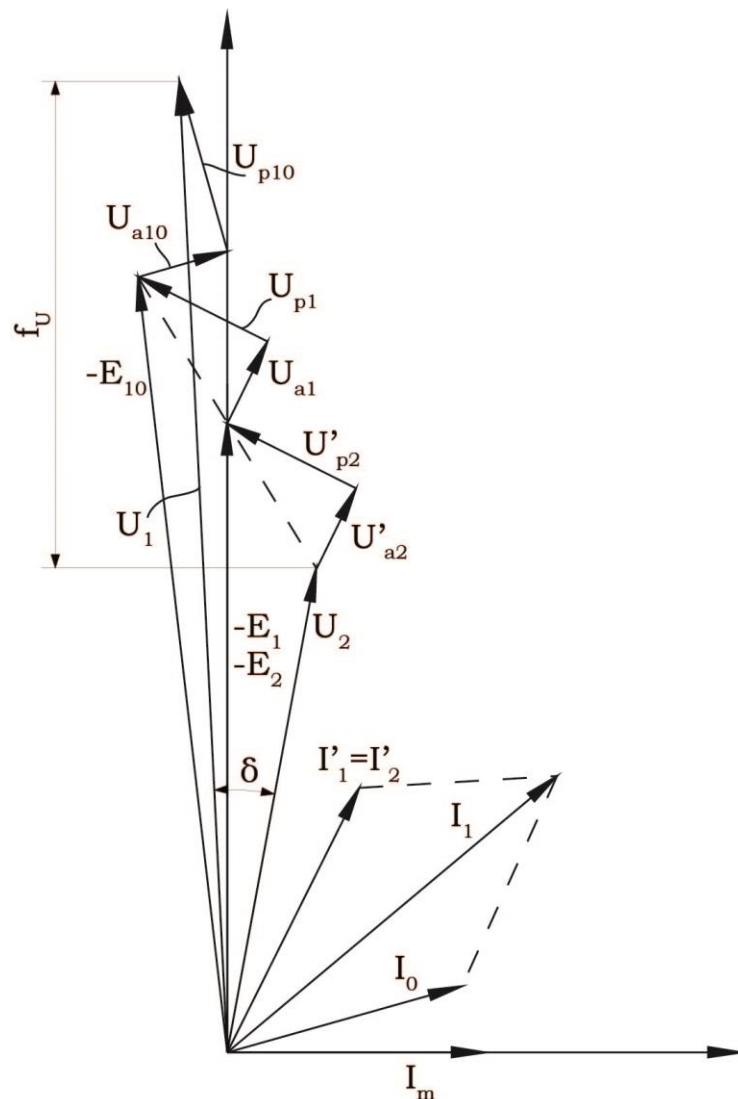


Рис. 1.9 Векторна діаграма струмів та напруг ТН при його активно-індуктивному навантаженні [10].

Для режиму холостого ходу в [10] автор пропонує визначати похибку напруги за рис. 1.3 та виразом:

$$f_{U0} = -E_{I0} - U_1, \quad (1.7)$$

або, якщо вважати, що кут між векторами  $U_1$  та  $-E_{I0}$  дуже малий, можна вважати, що вектор  $U_1$  за своєю величиною дорівнює (згідно рис. 1.3) своїй проекції на вісь ординат. В цьому випадку можемо записати для похибки у відсотках [10]:

$$f_{U0} = -(U_{a10} \cdot \sin \alpha + U_{p10} \cdot \cos \alpha), \quad (1.8)$$

де  $U_{a10}$ ,  $U_{p10}$  – активна та індуктивна складові спаду напруги в первинній обмотці у відсотках від первинної напруги  $U_1$ ;  $\alpha$  – кут між вектором струму холостого ходу  $I_0$  та його реактивною складовою  $I_M$  (кут магнітного запізнення).

Цю ж похибку автор [10] пропонує визначати й за формулою:

$$f_{U0} = -(U_{a1} \cdot i_a + U_{p1} \cdot i_p), \quad (1.9)$$

де  $i_a$ ,  $i_p$  – відношення активної та реактивної складових струму холостого ходу до номінального струму (активна та реактивна складові струму холостого ходу в долях від номінального струму);  $U_{a1}$ ,  $U_{p1}$  – активна та індуктивна складові спаду напруги в первинній обмотці при номінальному навантаженні, виражені у відсотках від первинної напруги  $U_1$ .

Оскільки кут  $\delta_0$  (рис. 1.9) є малим, можна вважати, що  $\operatorname{tg} \delta_0 \approx \delta_0$ . В цьому випадку, кутова похибка у хвилинах, згідно [10], може бути обчислена аналогічно похибці по напрузі за формулою:

$$\delta_0 = \frac{108}{\pi} \cdot (U_{a10} \cdot \cos \alpha - U_{p10} \cdot \sin \alpha) = \frac{108}{\pi} \cdot (U_{a1} \cdot i_p - U_{p1} \cdot i_a). \quad (1.10)$$

Кутова похибка вважається позитивною, якщо вектор  $-E_I$  випереджує вектор  $U_1$  (проти годинникової стрілки).

Похибка напруги, що викликана навантаженням, визначається [10] за формулою:

$$f_{Uн} = -(U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2), \quad (1.11)$$

де  $U_a = U_{a1} + U_{a2}$  й  $U_p = U_{p1} + U_{p2}$  – сумарні активні й індуктивні складові спаду напруги в первинній та вторинній обмотках від навантаження;  $\cos\varphi_2$  – коефіцієнт потужності навантаження.

Аналогічно (1.10) визначається кутова похибка, в хвилинах, викликана навантаженням [10]:

$$\delta_n = \frac{108}{\pi} \cdot (U_a \cdot \sin\varphi_2 - U_p \cdot \cos\varphi_2). \quad (1.12)$$

Загальна похибка при навантаженні ТН визначається як сума похибок від струмів холостого ходу та струму навантаження.

Слід відзначити, що в публікаціях по трансформаторах напруги [10 – 12] взагалі не розглядається такий важливий параметр, як взаємоіндуктивність розсіювання, що має (за порядком) такі ж значення, як і індуктивність розсіювання обмоток, хоча необхідність врахування взаємоіндуктивності розсіювання підкреслена в класичній праці по трансформаторам [59].

Розрахунки характеристик трансформаторів напруги за формулами (1.7 – 1.11) на стадії проектування можуть призводити до суттєвих помилок внаслідок значних похибок розрахунку реактивних складових спадань напруги в обмотках, викликаних потоками розсіювання, та, взагалі, відсутністю будь-яких рекомендацій відносно визначення параметрів розсіювання ТН. Формули ж наближеного розрахунку значення індуктивності розсіювання, що використовуються в розрахунках за існуючими схемами заміщення та векторними діаграмами, забезпечують прийнятні результати при розрахунках характеристик тільки силових трансформаторів [13, 39, 59]. Проте, їх використання для розрахунків характеристик обмоток ТН з великою кількістю витків, зі складними формами перерізу, для режимів ТН, наближених до холостого ходу, стає, фактично, неможливим. Ряд публікацій [60 – 65] свідчить про те, що пошук методів більш точного визначення індуктивності розсіювання (у тому числі, і для силових трансформаторів) і досі є актуальним, а розрахункові формули для індуктивності розсіювання трансформаторів напруги взагалі відсутні.

Слід відзначити, що ще за часів СРСР такі видатні науковці, як Сирота І. М., Лейтес Л. В., Руденко В. І., Казанський В. Є., Борю Н. В., Гельфанд Я. С., Карасьов В. В., Зіхерман М. Х. брали участь у спеціалізованій дискусії стосовно індуктивності розсіювання обмоток трансформаторів, опублікованій в журналі «Электричество» [66], відзначаючи важливе значення розрахунку цього параметру та його використання в схемах заміщення. Слід відзначити те, що зазначені вище автори в публікації [66] не дійшли єдиної думки відносно методів визначення індуктивності розсіювання в трансформаторах. В більш сучасному дослідженні [67] автор не тільки відмітив можливу для триобмоткового трансформатора особливість – наявність від’ємної індуктивності розсіювання в схемі заміщення, яку обговорювали і в [66] відомі радянські вчені, а й запропонував спосіб позбутися чисельних нестабільностей, які виникають при моделюванні трансформатора з такими параметрами.

Для визначення індуктивності розсіювання могли б бути використані чисельні розрахунки магнітного поля для математичної моделі реальної конструкції високовольтного ТН. За допомогою методів скінченних елементів або скінченних різниць, або іншими методами [68 – 70], можна вирішувати чисельно задачі розподілу магнітного поля, знаходити значення індукції або напруженості магнітного поля в будь-яких точках конструкції ТН.

Існує значна кількість програмних пакетів, що використовують метод скінченних елементів для вирішення задач розрахунку електричного та магнітного полів, наприклад, комерційні програми Comsol Multiphysics [71], ANSYS Maxwell [72], або некомерційні Agros2D [73], Elmer [74] тощо. Використання таких програм для визначення електричних та магнітних характеристик об’єктів знайшло своє відображення у ряді досліджень [75 – 79] з визначення параметрів трансформаторів чисельними методами. Вирішальним критерієм для оцінки достовірності одержаних розрахункових

результатів можна вважати результати експериментальних досліджень, проведених для певних моделей обмоток [57].

Підсумовуючи вищезазначене, можна стверджувати, що дослідження характеристик високовольтних масштабних перетворювачів високої напруги електромагнітного типу (вимірювальних автотрансформаторів та трансформаторів напруги) є актуальним з огляду на зростання вимог до точності масштабного перетворення високих напруг, надійності ізоляції, стабільності характеристик, а також в контексті їх інтеграції у цифрові системи обробки інформації. Особливо гостро стоїть питання вимірювання високої напруги у схемах з використанням високовольтних випробувальних трансформаторів, де використовується комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення напруги.

## **1.4 Висновки до розділу 1**

1.4.1 Тема точності вимірювання високої напруги промислової частоти досліджується в багатьох джерелах, оскільки є важливою та актуальною в умовах підвищення вимог до якості електроенергії та точності її обліку. З ряду відомих типів масштабних перетворювачів високої напруги, електромагнітні ТН є найбільш широко застосовуваними для вимірювання високої напруги і перспективними для підстанцій з цифровими системами управління, проте недостатньо досліджені питання визначення індуктивності розсіювання їх обмоток в режимах холостого ходу (або наближених до нього режимах).

1.4.2 З досліджених джерел не виявлено застосування високовольтних автотрансформаторів напруги в якості вимірювальних масштабних перетворювачів високої напруги промислової частоти (виявлено дослідження застосування вимірювальних АТН лише як низьковольтних прецизійних індуктивних подільників напруги), хоча, порівняно з високовольтними ТН, вони мають переваги з огляду на можливості їх виконання

багатодіпазонними масштабними перетворювачами високої напруги (без використання вторинних обмоток).

1.4.3 Розрахунки характеристик високовольтних вимірювальних автотрансформаторів (та трансформаторів) напруги на етапі проектування з використанням формул традиційного визначення індуктивності розсіювання за умови рівності нулю суми МРС обмоток є неприйнятними, в зв'язку з чим існує потреба знаходження нових методів розрахунку цих характеристик для АТН.

1.4.4 При розрахунках параметрів розсіювання високовольтних автотрансформаторів напруги необхідно переходити від класичних наближених аналітичних виразів, застосовуваних для силових трансформаторів, до спеціалізованих програм на основі моделювання магнітних та електричних полів АТН (ТН) на ПК.

1.4.5 Досліджень, присвячених комплексному трансформаторному та автотрансформаторному перетворенню високої напруги у високовольтних випробувальних трансформаторах з «вимірювальною обмоткою» взагалі не виявлено, що визначає проведення досліджень з цього питання особливо актуальним.

## РОЗДІЛ 2

### ВПЛИВ МАГНІТНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА РОЗПОДІЛ НАПРУГИ В ОБМОТКАХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

#### 2.1 Особливості розрахунку індуктивності розсіювання високовольтних автотрансформаторів напруги

Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних автотрансформаторів (трансформаторів) напруги суттєво відрізняється від розрахунків, які виконуються для силових автотрансформаторів. Це пов'язано з великою кількістю витків (зазвичай, високовольтна обмотка АТН (ТН) може мати десятки тисяч витків) та особливою формою перерізу цих обмоток. Характерною особливістю високовольтних обмоток АТН (ТН) є значна кількість витків та шарів витків, значна різниця між діаметрами зовнішніх і внутрішніх витків, а також значні відмінності у висоті окремих шарів витків високовольтної обмотки [10, 12], що обумовлює значні потоки розсіювання всередині обмоток. Розподіл цих магнітних потоків розсіювання не є рівномірним і суттєво змінюється у перерізі, як у радіальному, так і у вісьовому напрямках. Розрахунок таких потоків за методикою розрахунку силових трансформаторів [1, 13], коли визначальною є умова рівності нулю сумарної МРС обмоток, є неприпустимим, оскільки така умова в режимі холостого ходу (або наближених до нього режимах) взагалі не існує.

В дослідженій дисертантом літературі не відзначалося використання автотрансформаторів для вимірювання високих напруг. Відомі дослідження автотрансформаторів стосуються їх використання у силових колах [9, 22], або у якості низьковольтних індуктивних подільників напруги [17 – 20].

Дослідження магнітного поля обмотки високовольтного автотрансформатора напруги дозволяє оцінити вплив магнітних потоків розсіювання в режимі холостого ходу автотрансформатора на його

коефіцієнт масштабного перетворення, куту похибку, та визначити можливість його (автотрансформатора) виконання з певними геометричними параметрами та характеристиками для вимірювання високої напруги з заданою точністю.

Типове виконання обмотки високовольтного автотрансформатора напруги у перерізі являє собою трапецію (така форма дозволяє зменшувати напруженість електричного поля поблизу ярем магнітопроводу). Оскільки обмотка є циліндричною, обґрунтованим є представлення вісесиметричної моделі цієї обмотки у циліндричній системі координат. Однак, повну розрахункову модель для двострижневого магнітопроводу однофазного автотрансформатора у такій системі координат побудувати неможливо [14], тому необхідно користуватись певними припущеннями щодо розрахункової моделі: наприклад, спочатку використовувати однострижневу модель без врахування ярем та враховувати вплив ярем та другого стрижня додатково. Так, в [14] автори пропонують вважати, що 90% потоків розсіювання розрахункової моделі можна представляти, лише враховуючи «стрижньове» розсіювання, і тільки 10% відповідає потокам розсіювання у «вікні» магнітопроводу, поблизу ярем та другого стрижня. Недоліком розрахунку, запропонованого в [14], є те, що не завжди розрахунок, який враховує лише 90% моделі магнітного поля розсіювання ТН, задовольняє вимогам точності розрахунків. Крім того, переріз стрижня магнітопроводу не є циліндричним, тому це теж треба враховувати, замінюючи у вісесиметричній моделі стрижень циліндром еквівалентного (за площею перерізу [80]) діаметру. При цьому, для визначення магнітного поля обмоток високовольтного вимірювального автотрансформатора (як і силових трансформаторів [80]) на промисловій частоті припустимо для розрахунків параметрів розсіювання користуватись картиною квазістаціонарного магнітного поля в його складових елементах.

Слід відзначити, що в сучасних закордонних публікаціях з розрахунків розсіювання у трансформаторах [81] частіше використовується лише

вісесиметрична «стрижнева» модель трансформатора у циліндричній системі координат. Однак, існують роботи, наприклад, [16], в яких запропоновано метод моделювання магнітної системи ТН у циліндричній системі координат, з урахуванням впливу ярем та другого стрижня, шляхом зміни геометрії моделі. В даній роботі буде розглянуто спочатку «стрижневу», а потім, додатково – запропоновану комплексну вісесиметричну модель магнітного поля розсіювання в АТН.

## 2.2 Розрахунок індуктивності розсіювання автотрансформатора напруги за стрижневою моделлю

Вісесиметричну модель активної частини високовольтного автотрансформатора напруги (за прикладом розділу 4) у циліндричній системі координат за «стрижневою» моделлю представимо відповідною до рис. 2.1.

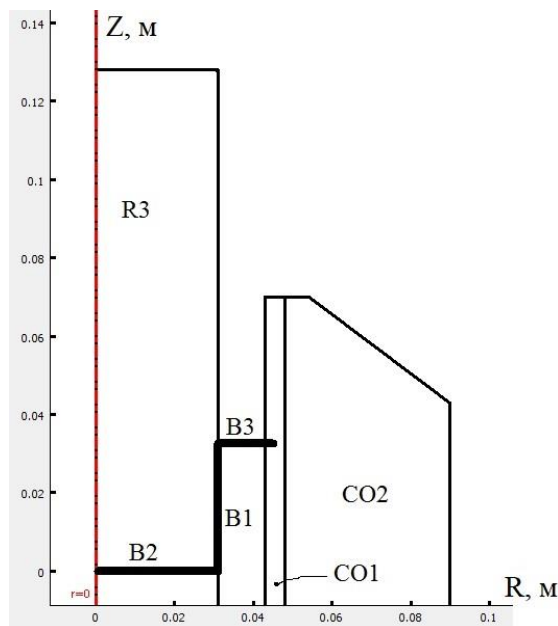


Рис. 2.1 Вісесиметрична модель активної частини високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги, створена у програмному пакеті Comsol Multiphysics (в циліндричній системі координат ROZ): R3 – стрижень магнітопроводу; CO1 – низьковольтна (вихідна) частина обмотки; CO2 – високовольтна частина обмотки; B1, B2, B3 – перерізи поверхонь інтегрування розрахункових значень магнітної індукції поля.

На рис. 2.1 зображена лише верхня частина вісесиметричної моделі обмотки реальної конструкції автотрансформатора (Розділ 4), оскільки, у більшості випадків, обмотка є симетричною відносно площини перерізу середини стрижня магнітопроводу. Розміри по горизонтальній та вертикальній вісях наведені в метрах. Оскільки намотування обмотки обмотковим проводом виконується, як правило, щільно та рівномірно, можна припустити, що струм у перерізі обмотки є рівномірно розподіленим по всій площі перерізу та дорівнює, в цілому, струму в одному витку, помноженому на кількість витків, або МРС:

$$I = i_0 \cdot W, \quad (2.1)$$

де  $i_0$  – струм у одному витку;  $W$  – кількість витків обмотки.\*

В моделі за рис. 2.1 всі магнітні потоки, які створюються струмом, що протікає крізь переріз обмотки перпендикулярно до площини перерізу в напрямку від спостерігача, є потоками розсіювання, оскільки всі вони частково (або повністю) замикаються по повітрю. Тому, за допомогою такої моделі можна розраховувати індуктивність розсіювання обмоток [80] високовольтного автотрансформатора або трансформатора. Така модель є досить поширеною для магнітних систем з циліндричними обмотками, якщо немає потреби у більш точних розрахунках індуктивності розсіювання, з урахуванням ярем і інших елементів. Для розрахунку додаткового впливу «ярмового» розсіювання на загальний потік розсіювання необхідно розробити окрему модель, яка буде розглянута у наступному підрозділі 2.3.

Магнітні потоки, створені струмом  $I$ , який вважаємо рівномірно розподіленим у перерізі обмотки автотрансформатора, зчеплені з витками обмотки  $i$ , в загальному випадку, є різними для кожного витка. Сумарне потокозчеплення  $\Psi_\Sigma$  дорівнює сумі потокозчеплень окремих витків (або груп витків) обмотки  $\Psi_i$ . Оскільки потокозчеплення кожного окремого витка визначається потоком  $\Phi_i$ , який проходить крізь площину витка (або його

---

\* В даному підрозділі тексту вважаємо, що струм  $i_0$  є незмінним для всіх витків обмотки.

проекцією на нормаль до цієї площини), цей потік можемо розділити на три складові, у відповідності до рис. 2.2.

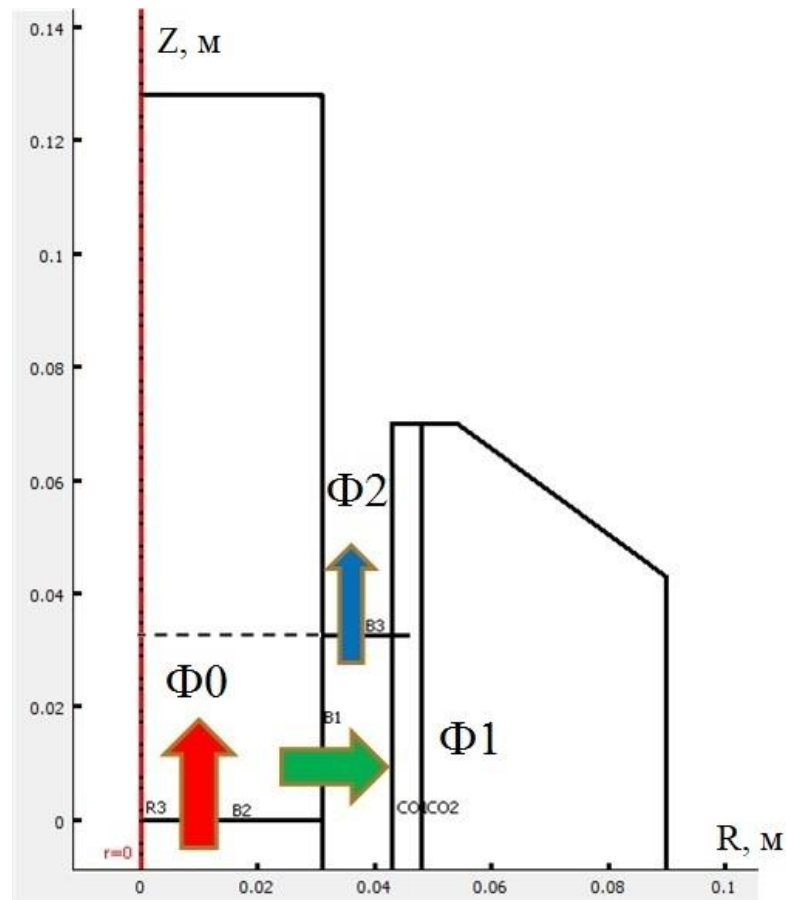


Рис. 2.2 Виокремлення складових магнітного потоку  $\Phi_i$  для окремого  $i$ -витка обмотки високовольтного автотрансформатора напруги

Складова магнітного потоку, який проходить крізь поверхню, позначену у циліндричній системі координат лінією  $B2$ , перпендикулярно до цієї поверхні, яка виділена на рис. 2.2 червоною стрілкою та може бути надалі позначена  $\Phi_0$  – це магнітний потік крізь переріз стрижня магнітопроводу в його середині (для симетричних відносно площини  $Z = 0$  обмоток). Цей потік є максимальним в перерізі стрижня для розглянутої моделі. Слід відзначити, що для обмоток, які не є симетричними відносно площини середини стрижня, розташування перерізу, крізь площу якого проходить максимальний потік всередині стрижня, необхідно визначати окремо.

Складова магнітного потоку, що проходить крізь бічну поверхню стрижня магнітопроводу, позначену на рис. 2.2 лінією  $B1$ , перпендикулярно

до цієї поверхні, яка виділена на рис. 2.2 зеленою стрілкою та може бути надалі позначена  $\Phi 1$  – це магнітний потік, який замикається, не охоплюючи даного  $i$ -витка обмотки, оскільки не перетинає площину цього витка. Тобто, ця частина загального потоку не є зчепленою з відповідним  $i$ -витком.

Складова магнітного потоку, який проходить крізь частину площі витка, позначену на рис. 2.2 лінією  $B3$ , за межами стрижня, перпендикулярно до площини витка, яка виділена на рис. 2.2 блакитною стрілкою, може бути надалі позначена  $\Phi 2$ . Ця складова не включає потік в площині витка, який проходить в перерізі стрижня магнітопроводу (позначений на рис. 2.2 пунктирною лінією).

Таким чином, загальний потік крізь площу кожного  $i$ -го витка обмотки може бути визначений як

$$\Phi_i = \Phi 0 - \Phi 1_i + \Phi 2_i^*), \quad (2.2)$$

з урахуванням напрямів потоків, вказаних на рис. 2.2.

Прийmemo загальну кількість витків у обмотці високовольтного автотрансформатора напруги рівною  $W1$ . Позначимо  $\Psi 1 = \sum_{i=1}^n \Psi_i$  суму потокозчеплень всіх витків обмотки автотрансформатора, де  $i = 1 \dots n$  означає розбиття перерізу всієї обмотки автотрансформатора на сегменти, а  $\Psi 2 = \sum_{j=1}^m \Psi_j$  – суму потокозчеплень  $W2$  витків вихідної частини обмотки, де  $j = 1 \dots m$  означає розбиття перерізу вихідної частини цієї обмотки. Якщо модель обмотки автотрансформатора є симетричною відносно площини визначення потоку  $\Phi 0$  (перпендикулярної до вісі  $OZ$ ), тобто, площини  $Z = 0$ , сумарні потокозчеплення  $\Psi 1$ ,  $\Psi 2$  розраховують як подвійні суми потокозчеплень відповідних сегментів половини обмотки (та, відповідно, половини її вихідної частини).

---

\*) Позитивний напрям потоку  $\Phi 1_i$ , якщо  $Z_i$  є від'ємним по відношенню до координати  $Z$  перерізу стрижня з максимальним значенням магнітного потоку в ньому, змінюється на протилежний.

В подальшому, наприклад, для режиму холостого ходу, який є характерним для високовольтних еталонних автотрансформаторів (та трансформаторів) напруги з високоомним навантаженням, необхідно розраховувати приведену еквівалентну індуктивність розсіювання

$$Ls'_{екв} = L_{11} - M'_{21}, \quad (2.3)$$

(див. Розділ 3), при цьому  $L_{11}$  пов'язується з потокозчепленням  $\Psi_1$  всієї обмотки:  $L_{11} = \frac{\Psi_1}{i_0}$ , а  $M'_{21} = \frac{\Psi_2}{i_0} \cdot \frac{W_1}{W_2}$  (для трансформатора напруги  $\Psi_2$  пов'язується із потокозчепленням вторинної обмотки). При цьому, для АТН обмотка  $W_2$  знаходиться «на полі» обмотки  $W_1$  (є її частиною), а для трансформатора напруги обмотка  $W_2$  знаходиться за межами обмотки  $W_1$ .

Тоді еквівалентну індуктивність розсіювання  $Ls'_{екв}$ , приведену до загальної кількості витків обмотки автотрансформатора, можна розрахувати за формулою:

$$Ls'_{екв} = \frac{\Psi_1 - \Psi_2 \cdot \frac{W_1}{W_2}}{i_0}, \quad (2.4)$$

де  $i_0$  – струм у одному витку обмотки.

Насправді, формули (2.3 – 2.4) фактично, не можливо на практиці застосовувати при використанні чисельних розрахунків для визначення  $\Phi_i$ ,  $\Phi_j$  для кожного окремого витка через їх кількість, що досягає десятків тисяч (і більше). Тому виконуємо умовний поділ обмотки (у перерізі) на певну кількість сегментів, при цьому вважаємо, що струм у перерізі кожного такого сегменту розподілений рівномірно, хоча кількість, розміри та форма сегментів, з яких складатимуться низьковольтна та високовольтна частини обмотки автотрансформатора, у загальному випадку, можуть бути різними. Для цих сегментів необхідно визначати площу та координати їх геометричних центрів. В такій моделі кожен сегмент розглядається як такий, в якому зосереджена така кількість витків по відношенню до загальної кількості витків обмотки, яка дорівнює відношенню площі перерізу сегмента

$S_i$  за рис. 2.3 до площі перерізу обмотки  $S1$  (якщо вважати, що струм по всьому перерізу обмотки розподілений рівномірно,  $S1 = \sum S_i$ ):

$$\frac{W_i}{W1} = \frac{S_i}{S1}. \tag{2.5}$$

Слід зазначити, що від кількості сегментів розрахункової моделі обмотки залежить точність та швидкість розрахунків, тому обирати цю кількість необхідно виходячи з обсягу розрахунків та потужності обчислювальної техніки.

Розподіл перерізу обмотки автотрансформатора на сегменти на прикладі моделі, зображеної на рис. 2.1, можна представити зображенням на рис. 2.3.

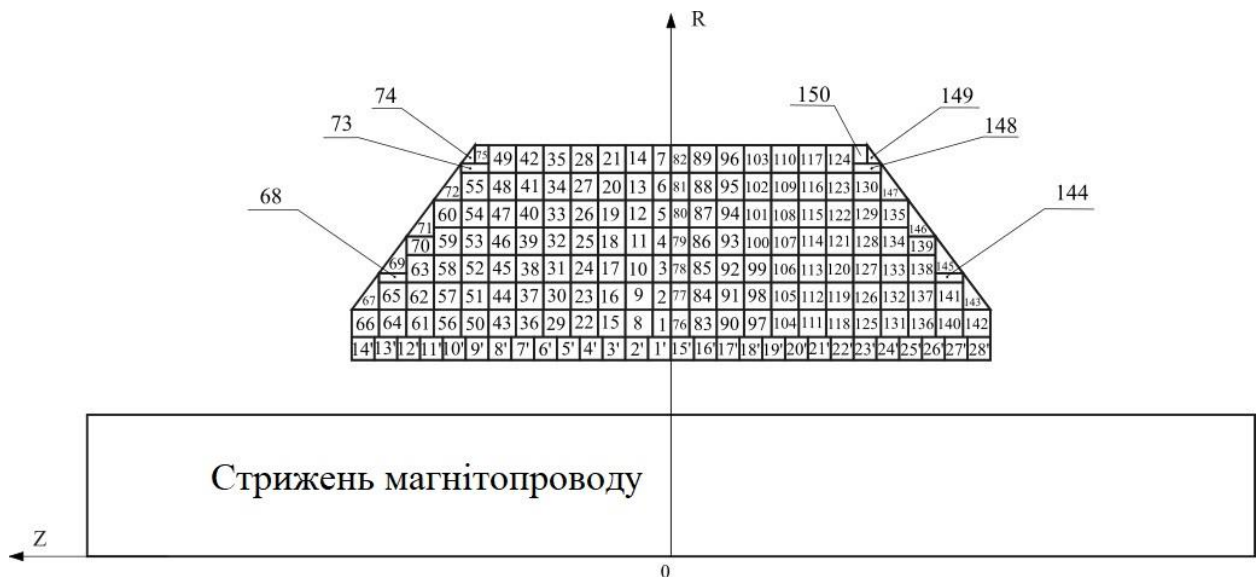


Рис. 2.3 Розподіл перерізу обмотки автотрансформатора напруги на нумеровані сегменти: числами зі штрихом позначені сегменти низьковольтної частини обмотки, які також відносяться і до всієї обмотки автотрансформатора напруги

Введемо поняття умовної кількості витків для кожного з сегментів всієї обмотки автотрансформатора та її вихідної частини за рис. 2.3:

$$W_i = \frac{W1 \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \tag{2.6}$$

де  $n$  – кількість сегментів всієї обмотки автотрансформатора (включаючи високовольтну та низьковольтну частини) та  $S_i$  – площа її  $i$ -го сегмента;

$$W_j = \frac{W_2 \cdot S_j}{\sum_{j=1}^m S_j}, \quad (2.7)$$

де  $m$  – кількість сегментів перерізу низьковольтної частини обмотки автотрансформатора та  $S_j$  – площа її  $j$ -го сегмента.

Потокозчеплення для всієї обмотки автотрансформатора та для її низьковольтної частини можуть бути розраховані, з урахуванням (2.6, 2.7) за формулами:

$$\Psi_1 = \sum_{i=1}^n ((\Phi_0 - \Phi_{1_i} + \Phi_{2_i}) \cdot W_i), \quad (2.8)$$

$$\Psi_2 = \sum_{j=1}^m ((\Phi_0 - \Phi_{1_j} + \Phi_{2_j}) \cdot W_j), \quad (2.9)$$

де  $\Phi_0$  – максимальний потік крізь переріз стрижня магнітопроводу;  $\Phi_{1_i}$ ,  $\Phi_{1_j}$  – складові потоків крізь бічну поверхню магнітопроводу, у відповідності до рис. 2.2;  $\Phi_{2_i}$ ,  $\Phi_{2_j}$  – складові потоків в площях виокремлених горизонтальних дисків з максимальними радіусами  $r_i$  ( $r_j$ ) на висотах  $z_i$  ( $z_j$ ), у відповідності до рис. 2.2.

Особливістю розрахунку за формулами (2.4, 2.8, 2.9) є те, що зі складу формули приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання може бути повністю виключена складова магнітного потоку  $\Phi_0$ , яка, як правило, є набагато більшою за  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$ .

Тоді з (2.4, 2.8, 2.9) можемо записати:

$$L_{S'_{екв}} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot (\Phi_{2_i} - \Phi_{1_i}) - \frac{W_1}{W_2} \cdot \sum_{j=1}^m W_j \cdot (\Phi_{2_j} - \Phi_{1_j})}{i_0}. \quad (2.10)$$

Таким чином, формула (2.10) дозволяє досягти високої точності розрахунку приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання шляхом

використання чисел одного порядку (у тому числі, з визначуваною величиною).

Використовуючи (2.6, 2.7), представимо:

$$\alpha_i = \frac{W_i}{W1} = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (2.11)$$

$$\alpha_j = \frac{W_j}{W2} = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^m S_j}. \quad (2.12)$$

Підставляючи (2.11) та (2.12) у (2.10) та враховуючи (2.1, 2.4), можемо записати формулу еквівалентної індуктивності розсіювання високовольтного автотрансформатора напруги, приведеної до загальної кількості витків його обмотки (для ТН – кількості витків його первинної обмотки):

$$Ls'_{екв} = \frac{W1^2 \cdot \left( \sum_{i=1}^n (\Phi2_i - \Phi1_i) \cdot \alpha_i - \sum_{j=1}^m (\Phi2_j - \Phi1_j) \cdot \alpha_j \right)}{I}, \quad (2.13)$$

де  $I = i_0 \cdot W1$  – магніторухійна сила обмотки  $W1$  зі струмом  $i_0$ . Для випадку

$i_0 = \frac{1A}{W1}$ ,  $I = 1A$ , отже складові  $\Phi2_i$ ,  $\Phi1_i$ ,  $\Phi2_j$ ,  $\Phi1_j$  необхідно обраховувати для

МРС обмотки  $W1$ , що дорівнює 1 А.

Формула (2.13) запропонована вперше і дозволяє у простий спосіб обраховувати складний параметр приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання, який відноситься як до автотрансформатора напруги, так і до трансформатора напруги (Розділ 3), обмотки якого (на відміну від автотрансформатора) не мають електричного зв'язку.

Слід відзначити, що коефіцієнти за формулами (2.11, 2.12) можна обчислювати за питомими площами сегментів перерізу обмотки лише у випадку рівномірного розподілу просторової «густини» струму у перерізі обмотки. У випадку, якщо в реальній конструкції автотрансформатора напруги обмотка виконана в різних частинах проводом різного перерізу або з різною міжвитковою та міжшаровою ізоляцією, коефіцієнти  $\alpha_i$ ,  $\alpha_j$  необхідно

обчислювати за цими формулами з використанням відношень витків  $\frac{W_i}{W_1}$ ,

$\frac{W_j}{W_2}$  для кожного з сегментів.

Якщо умовно представити, що низьковольтна обмотка АТН представлена двома симетричними витками (або групами витків), геометричні центри яких характеризуються точками вісесиметричної системи координат  $(R, Z)$  та  $(R, -Z)$ , то можна знайти такі точки простору у цій системі координат, для яких приведена еквівалентна індуктивність розсіювання за формулою (2.13) дорівнюватиме нулю. Розташування витків вихідної частини обмотки АТН в таких точках дозволить мінімізувати приведену еквівалентну індуктивність розсіювання для такого виконання обмотки АТН. Також, можна розраховувати геометричні місця точок, для яких різниця між поточкозчепленнями обмотки та її вихідної частини становитиме певне, заздалегідь задане, значення [82]. Приклад розрахунку геометричних місць точок, яким відповідають певні значення різниць поточкозчеплень, наведений на рис. 2.4 [82] (у відсотках до першої частини складових у дужках (2.13)). Слід наголосити, що від'ємні значення на рис. 2.4 відносяться не до фактичних значень індуктивності розсіювання, а до значень приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання, яка визначається різницею значень власної та приведеної взаємної індуктивностей частин обмотки, і використовується при дослідженнях трансформаторів [66].

Найбільше (за абсолютною величиною) від'ємне значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання  $L_{екв}'$  буде одержане при розташуванні витків вихідної (низьковольтної) частини обмотки автотрансформатора в районі точки А (рис. 2.4).

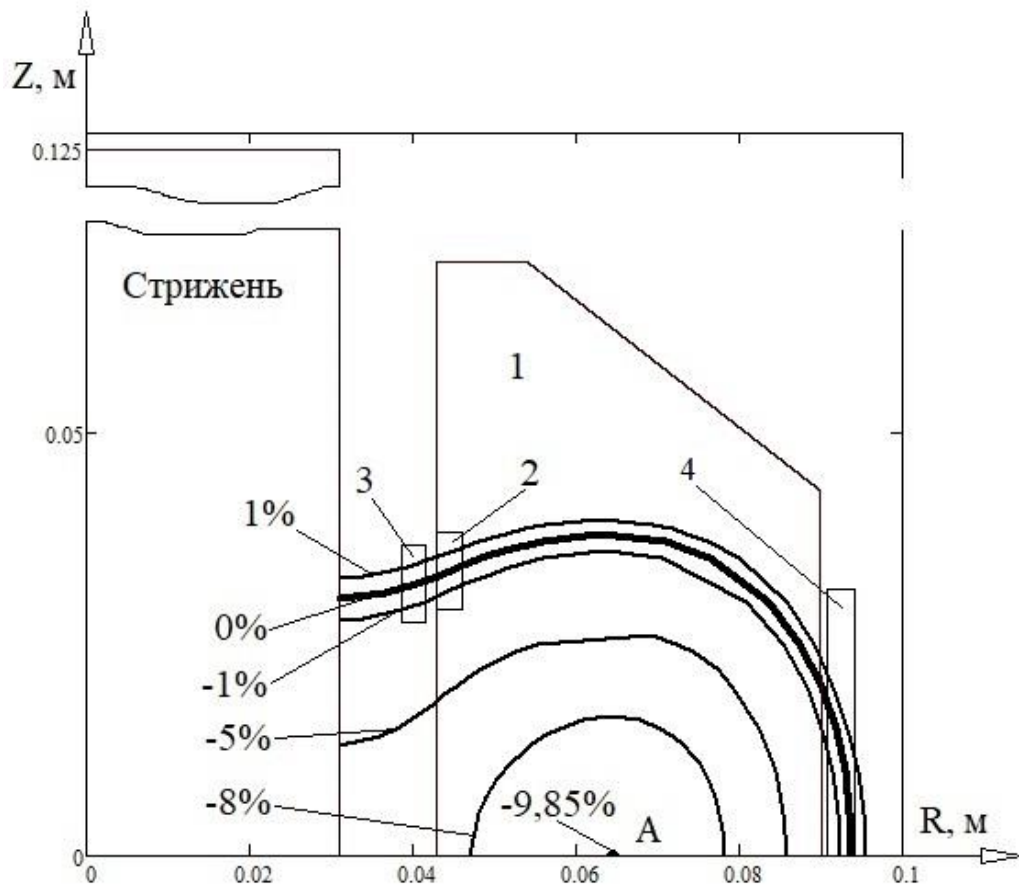


Рис. 2.4 Геометричні місця точок, яким відповідають певні сталі значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання для конфігурації моделі первинної обмотки та магнітопроводу за рис. 2.1: 1 – обмотка зі струмом; 2 – прогнозоване розташування витків вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги; 3 – прогнозоване розташування витків вторинної обмотки трансформатора; 4 – прогнозоване розташування витків обмотки для каскадного з'єднання трансформаторів.

Аналіз даних рис. 2.4 показує, що можливим є проектування розташування витків обмоток високовольтних автотрансформаторів напруги таким чином, щоб заздалегідь мінімізувати (або навпаки, збільшити) приведену еквівалентну індуктивність розсіювання шляхом розташування витків низьковольтної (вихідної) частини обмотки автотрансформатора у певній частині її перерізу. Також, формули (2.2 – 2.13) можуть бути використані для визначення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання обмоток трансформаторів напруги. При цьому, рис. 2.4 пояснює

підхід до визначення просторового розташування як вихідної частини обмотки АТН (позначення 2 на рис. 2.4), так і вторинної обмотки ТН (позначення 3 на рис. 2.4) або обмотки, яка використовується для з'єднання каскадів ТН (позначення 4 на рис. 2.4).

Одержання (вперше) такого результату може бути використано для вибору нових схем розташування вихідних частин обмоток автотрансформаторів напруги та вторинних обмоток трансформаторів напруги, а також для вибору розташування зв'язуючих обмоток для каскадних з'єднань високовольтних трансформаторів напруги. Такий вибір може бути здійснений за наступним методом:

*Метод вибору розташування вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги, який дозволяє на етапі проектування забезпечувати необхідне значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання*

Даний метод дозволяє на етапі проектування активної частини автотрансформатора напруги одержувати значення його приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання шляхом параметричного математичного моделювання та чисельних розрахунків. Змінюваними величинами в ітераціях розрахунку є геометричні параметри вихідної частини обмотки АТН. Результатом є геометричні параметри активної частини автотрансформатора напруги, яким відповідає необхідне значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання його обмотки.

1) Проектування за даним методом пропонується для активних частин однофазних автотрансформаторів напруги з циліндричними вісесиметричними обмотками, розташованими на стрижні двострижневих або броньових магнітопроводів з круговим або ступінчастим перерізами стрижня, які проектуються для напруги промислової частоти. Вхідними даними для розрахунку є:

а) Відносна магнітна проникність стрижня магнітопроводу за тих режимів роботи автотрансформатора, для яких виконується розрахунок,  $\mu_{ст.}$ ,

відносних одиниць. Для спрощення інженерних розрахунків параметрів розсіювання можна обирати деяке «усереднене» (для електротехнічних сталей) значення  $\mu_{ст.}$ , наприклад, 5000 відносних одиниць.

б) Фактична площа перерізу трансформаторної сталі стрижня магнітопроводу,  $S_{ст.}$ , м<sup>2</sup>.

в) Висота стрижня магнітопроводу (дорівнює загальній висоті магнітопроводу),  $H_{ст.}$ , м.

г) Значення струму в обмотці  $i_0$ , А, яке слід обирати близьким до очікуваного середньоквадратичного значення струму холостого ходу в обмотці автотрансформатора напруги.

д) Координати геометричних центрів ( $R_i, Z_i$  та  $R_j, Z_j$ ) для  $i$ -сегментів та  $j$ -сегментів обмотки, для яких густина витків в перерізі (кількість витків / м<sup>2</sup>) є сталою величиною. Поділ перерізу обмотки на сегменти можна виконувати довільно, або за прикладом рис. 2.3 (на рис. 2.3 обмотка автотрансформатора поділена на дві групи сегментів з можливістю вибору різної густини витків в перерізах низьковольтної та високовольтної частин обмотки).

е) Повна кількість витків обмотки АТН,  $N1$ .

ж) Кількість витків вихідної частини обмотки АТН,  $N2$ .

2) Створення вісесиметричної «стрижневої» математичної моделі активної частини автотрансформатора в циліндричній системі координат  $ROZ$  для визначення магнітних потоків розсіювання в частинах обмотки. Вісь  $OZ$  є віссю симетрії моделі.

а) Математична модель описується рівнянням стаціонарного магнітного поля:  $\nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu^{-1} \cdot \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}$ , де  $\nabla$  – диференційний оператор Гамільтона (оператор набла);  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – відносна магнітна проникність;  $\vec{A}$  – векторний магнітний потенціал, Вб/м;  $\vec{J}$  – вектор густини сторонніх струмів, А/м<sup>2</sup> [38, 71, 72, 73].

б) На зовнішніх границях області розрахунку магнітного поля встановлюються умови «магнітної ізоляції», тобто  $A_\varphi = 0$ , границя  $r = 0$  позначається як вісь симетрії. Всі інші внутрішні границі елементів моделі позначаються умовою неперервності:  $\vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0$ , де  $\vec{n}$  – вектор нормалі до границі розподілу двох середовищ;  $\vec{H}_1, \vec{H}_2$  – вектори напруженості магнітного поля в граничних середовищах.

в) Зовнішні границі області розрахунку стаціонарного магнітного поля встановлюють для вісесиметричної «стрижневої» моделі на відстані, що не менш ніж в 10 разів перевищує розміри активної частини автотрансформатора по відповідній вісі в просторі.

г) Густина струмів, що відповідає  $i, j$ -сегментам перерізу обмотки з можливою різною густиною витків, визначають як  $J_i = N_i \cdot i_0 / S_i, J_j = N_j \cdot i_0 / S_j$ , де  $N_i, N_j$  – кількості витків у  $i$  та  $j$  сегментах;  $i_0$  – значення струму, зазначене вище, А;  $S_i, S_j$  – площі  $i, j$ -сегментів, м<sup>2</sup>. Вектор густини струму обирається нормальним до площини  $ROZ$ .

д) Стрижень магнітної системи автотрансформатора напруги моделюється циліндричним стрижнем кругового перерізу, висота якого відповідає фактичній висоті магнітопроводу (висота  $H_{cm}$  з вхідних даних), а радіус стрижня  $R_{cm}$  обирається таким, щоб площа перерізу стрижня моделі дорівнювала площі перерізу трансформаторної сталі стрижня магнітопроводу ( $S_{cm}$  із вхідних даних).

е) Відносні магнітні проникності виокремлених об'ємів моделі, визначених в площині  $ROZ$  відповідними перерізами, встановлюються рівними або 1, або фактичним відносним магнітним проникностям матеріалів цих об'ємів.

3) Визначення магнітних потоків розсіювання в обмотці та її складових частинах у створеній вісесиметричній «стрижневій» математичній моделі активної частини автотрансформатора напруги в циліндричній системі координат.

а) Розрахунок індукції магнітного поля розсіювання для будь-яких точок, що належать вісесиметричній моделі активної частини автотрансформатора повинен виконуватись чисельними методами, наприклад, методом скінченних елементів. Для реалізації цього методу прийнятне програмне забезпечення, що дозволяє виконувати в одному програмному пакеті всі три етапи розрахунків: моделювання параметрів вісесиметричної моделі активної частини автотрансформатора напруги з графічним представленням цієї моделі у площині  $ROZ$ ; вирішення системи рівнянь стаціонарного магнітного поля за параметрами моделі; обробку та візуалізацію результатів розрахунку в числовому та графічному вигляді. Програмне забезпечення повинно давати можливість визначення індукції магнітного поля в будь-якій точці з координатами  $(R, Z)$  у вигляді складових по вісях  $R$  та  $Z$ , або у вигляді модуля вектора індукції поля та його кутової характеристики. Бажано, щоб програмне забезпечення мало вбудовані інструменти інтегрування значення індукції магнітного поля по поверхнях, які є перпендикулярними координатній вісі  $Z$ , а також по циліндричним поверхням, паралельним вісі  $Z$ , та представленим у площині  $ROZ$  перерізу вісесиметричної моделі відповідними відрізками прямих з довільними координатами  $(R, Z)$ .

б) Шляхом інтегрування  $Z$ -складової індукції магнітного поля в перерізі стрижня магнітної системи моделі, що є перпендикулярним до вісі  $Z$ , визначити  $Z$ -координату площини перерізу стрижня, для якої сумарний магнітний потік в перерізі стрижня є максимальним, та позначити цю координату  $Z_0$ .

в) За аналогією з рис. 2.3 виконати умовне сегментування складових перерізу обмотки з загальною сумою  $n$  елементів для всієї обмотки автотрансформатора напруги та  $m$  сегментів для вихідної частини обмотки АТН. Рекомендується виконувати сегментування перерізу обмотки та її частин таким чином, щоб сегменти не перетинались площиною  $Z = Z_0$ . Кількість сегментів, на які поділяється переріз обмотки, рекомендується

обирати таким чином, щоб площа будь-якого сегменту не перевищувала 1% загальної площі перерізу обмотки. Для кожного  $i$ -сегмента обмотки АТН та для кожного  $j$ -сегмента вихідної частини обмотки АТН визначити  $(R_i, Z_i)$  та  $(R_j, Z_j)$  – координати їх геометричних центрів, а також обчислити площі  $S_i, S_j$  кожного з сегментів, загальні площі перерізів  $S1 = \sum_{i=1}^n S_i, S2 = \sum_{j=1}^m S_j$  всієї обмотки та вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги, відповідно, а також питомі кількості витків  $\alpha_i, \alpha_j$  для кожного з сегментів за формулами (2.11 – 2.12), враховуючи кількість витків  $N_i, N_j$ , що містить кожна складова перерізу обмотки. Слід враховувати також те, що сегменти обмотки АТН, які відносяться до перерізу витків вихідної частини обмотки, можуть мати відмінну від іншої частини обмотки густину витків у перерізі, тому для визначення коефіцієнтів  $\alpha_i$  цих сегментів слід використовувати формулу (2.11) в частині відношення витків, а не площ.

г) Виконати розрахунок  $R$ -складової магнітного потоку розсіювання  $\Phi 1_i$  для кожного центру сегменту з координатами  $(R_i, Z_i)$  та  $\Phi 1_j$  для кожного центру сегменту з координатами  $(R_j, Z_j)$  шляхом інтегрування  $R$ -складової індукції магнітного поля по циліндричній поверхні, паралельній вісі  $Z$ , яка має радіус, що дорівнює радіусу стрижня магнітопроводу  $R_{cm}$  та висоту, яка визначається координатами  $(Z_i - Z_0), (Z_j - Z_0)$ , відповідно. Нормаль до цієї циліндричної поверхні обирається в напрямку вісі  $R$ , якщо  $Z$ -координата центру сегмента є більшою  $Z_0$ , і в протилежному напрямку, якщо  $Z$ -координата центру сегмента є меншою  $Z_0$ .

д) Виконати розрахунок  $Z$ -складової магнітного потоку розсіювання  $\Phi 2_i$  для кожного центру сегменту з координатами  $(R_i, Z_i)$  та  $\Phi 2_j$  для кожного центру сегменту з координатами  $(R_j, Z_j)$  шляхом інтегрування  $Z$ -складової індукції магнітного поля по поверхні дисків, площини яких характеризуються координатами  $Z = Z_i, Z = Z_j$ , та відповідними координатами по  $R$ :  $R_{cm} \leq R \leq R_i, R_{cm} \leq R \leq R_j$ . Нормаль до цих поверхонь обирається в

напрямку  $Z$ -складової магнітного потоку крізь переріз стрижня моделі в площині  $Z = Z_0$ .

4) Визначення різниці поточкозчеплень розсіювання, що формує знак та величину (або нульове значення), в дужках у формулі (2.13) для обмотки автотрансформатора напруги. Значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання АТН може бути як позитивним, так і негативним, або нульовим. Рівність нулю приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання автотрансформатора напруги дозволяє розраховувати коефіцієнт його масштабного перетворення напруги, фактично, лише за співвідношенням витків первинного та вторинного кіл, враховуючи, як величини другого порядку, активні складові спаду напруги у витках.

а) Визначити першу складову за формулою (2.13)  $\Phi I^* = \frac{\sum_{i=1}^n (\Phi 2_i - \Phi 1_i) \cdot \alpha_i}{i'_0}$  (де  $i'_0$  – кратність вибраного струму  $i_0$  по відношенню до струму  $1A / WI$ ), яка відповідає питомому поточкозчепленню розсіювання на один виток для всієї обмотки автотрансформатора напруги.

б) Визначити другу складову за формулою (2.13)  $\Phi 2^* = \frac{\sum_{j=1}^m (\Phi 2_j - \Phi 1_j) \cdot \alpha_j}{i'_0}$ , яка відповідає питомому приведеному поточкозчепленню на один виток всієї обмотки для потоку розсіювання, зчепленого з витками вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги.

в) Визначити різницю  $\Phi^* = \Phi I^* - \Phi 2^*$ . Також можна визначити цю величину у відсотках від  $\Phi I^*$ :  $\Delta \Phi^* = \frac{\Phi I^* - \Phi 2^*}{\Phi I^*} \cdot 100\%$ . Величина  $\Phi^*$  ( $\Delta \Phi^*$ ) може мати позитивне, негативне, або нульове значення.

5) Якщо значення або знак одержаного  $\Phi^*$  і, відповідно, приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання відрізняються від необхідного для автотрансформатора напруги, що проектується, виконується параметричне

моделювання зі змінюваними геометричними параметрами вихідної частини обмотки АТН.

а) Якщо необхідно одержати значення  $\Phi^*$  менше, ніж на попередній ітерації моделювання, геометричні параметри вихідної частини обмотки автотрансформатора змінюють таким чином, щоб зменшити її розміри вздовж вісі  $Z$  та (або) розташувати її вздовж вісі  $OR$  наближено до геометричного центру обмотки АТН. Після зміни геометричних параметрів виконують всі пункти 1 – 5 даного методу і порівнюють одержане значення  $\Phi^*$  зі значенням  $\Phi^*$  на попередній ітерації, а значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання за формулою (2.13) з необхідним.\*)

б) Якщо необхідно одержати значення  $\Phi^*$  більше, ніж на попередній ітерації моделювання, геометричні параметри вихідної частини обмотки автотрансформатора змінюють таким чином, щоб збільшити її розміри вздовж вісі  $Z$ , та (або) віддалити вздовж вісі  $OR$  від геометричного центру обмотки АТН. Після зміни геометричних параметрів виконують всі пункти 1 – 5 даного методу і порівнюють одержане значення  $\Phi^*$  зі значенням  $\Phi^*$  на попередній ітерації, а значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання за формулою (2.13) з необхідним.

в) Результатом використання запропонованого методу є одержання на етапі проектування геометричних параметрів вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги у поєднанні з вхідними параметрами його активної частини, які відповідають необхідному значенню приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання обмотки АТН.

Слід зазначити, що запропонований метод може бути аналогічно застосований також для визначення розташування вторинної обмотки трансформатора напруги (або обмотки, призначеної для зв'язку каскадів ТН). В цьому випадку,  $N1$  позначається кількість витків первинної обмотки ТН,

---

\*) Можливе також виконання вихідної частини обмотки АТН у вигляді двох частин, аналогічно позиції 2 на рис. 2.4.

$N_2$  – кількість витків вторинної обмотки (або обмотки, призначеної для зв'язку каскадів) ТН.

Одержані результати є також перспективними в зв'язку з необхідністю розробки прецизійних високовольтних автотрансформаторів (або трансформаторів) напруги з вихідними напругами в одиниці вольт (з кількістю вихідних витків 1, 2, 3,... при кількості вхідних витків до 100000 і більше), які можна використовувати в концепції «цифрова підстанція» [54].

### **2.3 Розрахунок індуктивності розсіювання з урахуванням ярма магнітопроводу**

Для того, щоб визначати потоки розсіювання у відповідності до тривимірної конструкції високовольтного автотрансформатора напруги з необхідною точністю, недостатньо визначати значення лише «стрижньового» розсіювання за розглянутою вище вісесиметричною моделлю. Разом з тим, розрахунок потоків розсіювання у 3-вимірному наближенні може складати (тільки для одного варіанту!) для сучасних ПК кілька годин, або навіть діб, тому, з урахуванням того, що вклад «ярмового» розсіювання (у «вікні» магнітопроводу) є додатковим (на рівні ~10 %) до стрижньового [16], доцільно розглянути його спрощену модель для розрахунку приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання (в цілому).

«Викривлення» магнітного потоку обмотки автотрансформатора напруги у вікні магнітопроводу, між ярмами, можна наближено врахувати, використовуючи умовну «капсульну» вісесиметричну модель магнітопроводу з обмоткою у циліндричній системі координат. Така модель відповідатиме «замкненій капсулі» (з властивостями матеріалу магнітопроводу) з обмоткою на стрижні, в якій потоки розсіювання переважно замкнені всередині капсули, між бічною поверхнею стрижня, внутрішньою вертикальною поверхнею зовнішньої циліндричної «стілки» та горизонтальними внутрішніми поверхнями «кришки» та «дна» капсули. На

рис. 2.5 представлений переріз магнітопроводу «капсульного» типу з обмоткою, магнітними потоками в магнітопроводі та у його вікні.

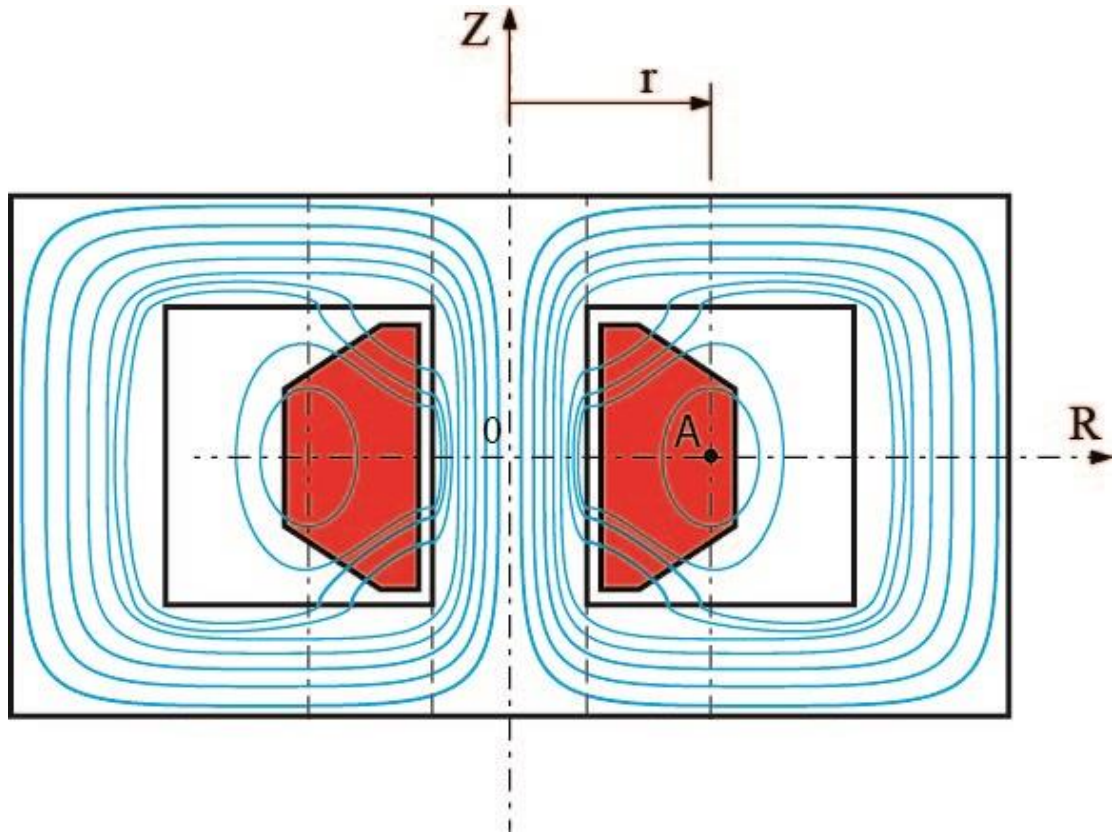


Рис. 2.5 Замкнена «капсульна» вісесиметрична модель магнітопроводу автотрансформатора напруги у циліндричній системі координат. Лінією (— —) показані виокремлені розміри стрижня за розглядом підрозділу 2.2; точка А – відповідна точка в перерізі обмотки АТН з розподіленням в ній струмом (див. рис. 2.4).

Слід зазначити, що потоки розсіювання ззовні феромагнітної капсули, представленої на рис. 2.5, є на 2-3 порядки меншими, ніж потоки розсіювання всередині капсули (при відносній магнітній проникності феромагнетика  $3000 \div 10000$ ), тому цими потоками в розрахунках можна нехтувати.

Магнітні потоки розсіювання трансформатора з циліндричними обмотками на магнітопроводі мають складне просторове розподілення. На рис. 2.6 представлена картина магнітного поля у тривимірній моделі автотрансформатора напруги, розрахована в програмному пакеті Comsol Multiphysics. Можна бачити, що лінії магнітного поля (окрім тих, що

замикаються всередині магнітопроводу й представляють основний магнітний потік) замикаються за межами стрижня як всередині «вікна» магнітопроводу, так і безпосередньо в обмотці.

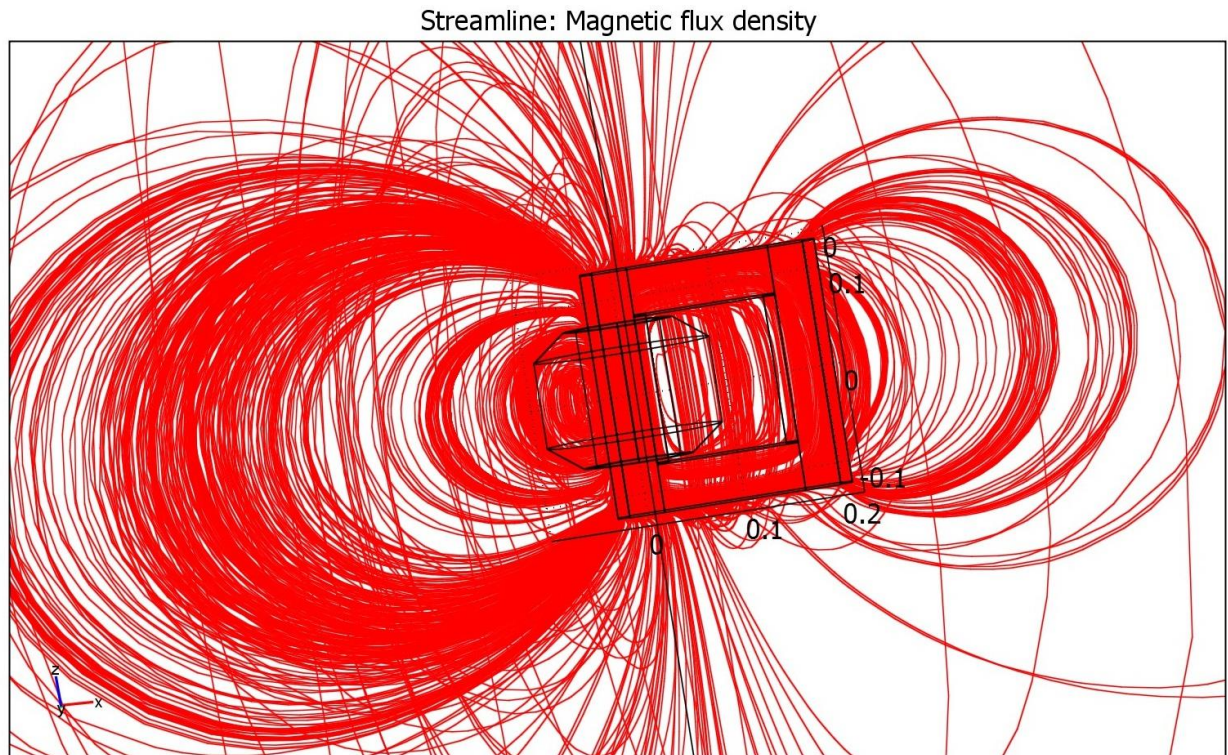


Рис. 2.6 Картина магнітного поля тривимірної моделі автотрансформатора напруги за розділом 4.

На відмінність від моделі, представленої на рис. 2.5, в [16] запропоновано використовувати аналогічну модель у циліндричній системі координат, в якій висота ярем в перерізі (по зовнішньому контуру) зменшується з радіусом за нелінійним законом, а товщина зовнішньої стінки замкненої вісесиметричної «капсули», яка в перерізі повинна відповідати другому стрижню магнітопроводу, розраховується в залежності від відстані між всіма стрижнів реального магнітопроводу.

На рис. 2.7 представлена модель двострижневого магнітопроводу у циліндричній системі координат, у відповідності до [16].

Можна бачити, що, на відміну від моделі за рис. 2.5, висота ярем зменшується з радіусом нелінійно. Така зміна висоти ярма, при незмінній

висоті «вікна» магнітопроводу, повинна моделювати магнітний потік у перерізі ярем, який відповідає магнітному потоку в реальній тривимірній моделі магнітопроводу. Те саме стосується й перерізу другого стрижня магнітопроводу, при його моделюванні у циліндричній системі координат.

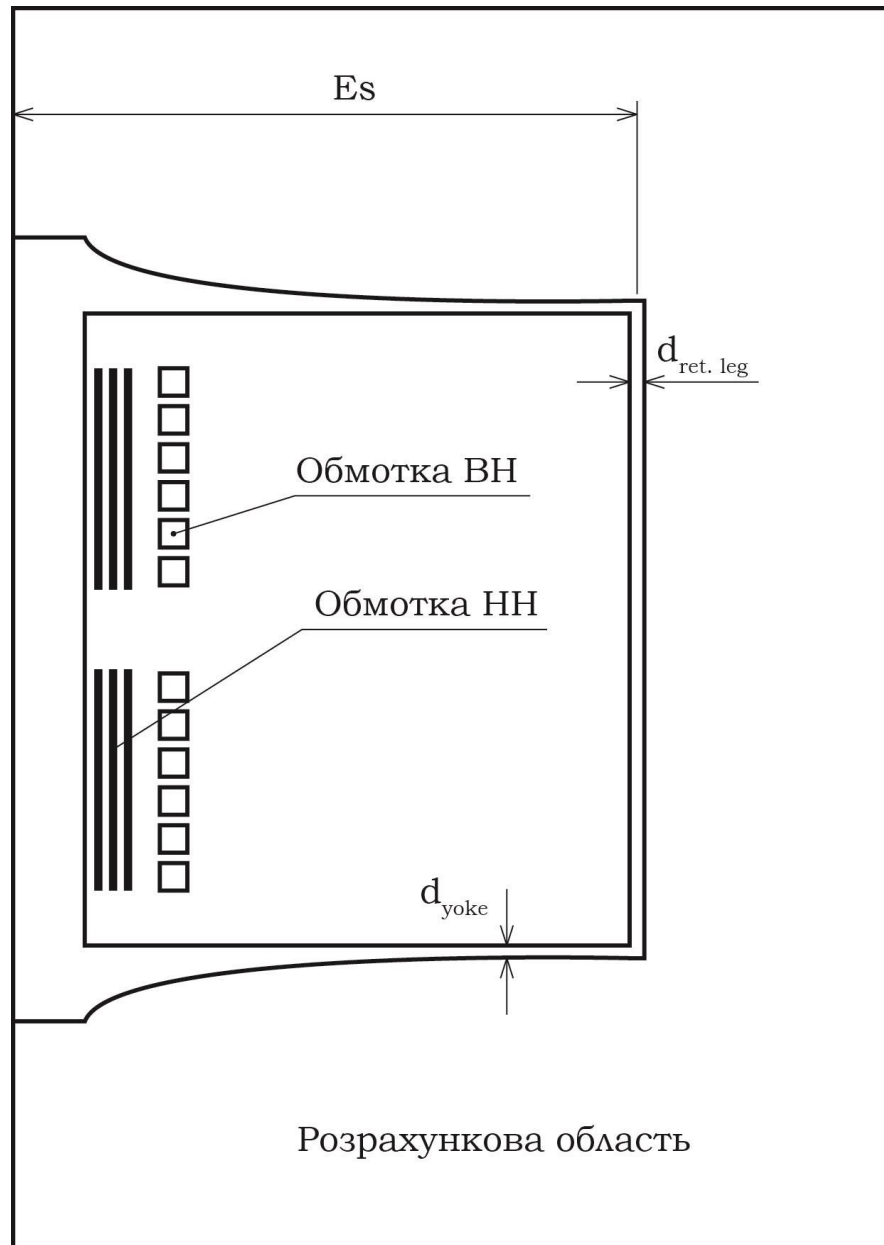


Рис. 2.7 Приклад моделювання у циліндричній системі координат ярем та другого стрижня магнітопроводу трансформатора за [16]

Для розрахунку параметрів  $d_{yoke}$  та  $d_{ret. leg}$  на рис. 2.7 авторами [16] пропонується використовувати формули:

$$d_{yoke} = (r_0)^2 / 2R; \quad (2.14)$$

$$d_{ret. leg} = (r_0)^2 / 2Es, \quad (2.15)$$

де  $r_0$  – еквівалентний радіус стрижня, на якому розташована обмотка;  $Es$  – відстань між вісями двох стрижнів магнітопроводу.

Хоча моделювання магнітопроводу ТН з параметрами, розрахованими за (2.14 – 2.15) для циліндричної системи координат, дозволяє з певною похибкою визначати потоки розсіювання у вікні магнітопроводу, все ж, така методика має суттєві недоліки, оскільки потік розсіювання у вікні магнітопроводу складає (у відповідності до [14]) близько 10% від загального потоку розсіювання, і тому за моделлю за рис. 2.7 не може бути розрахований, у загальному випадку, оскільки не враховує потік розсіювання, що замикається поза межами вікна магнітопроводу.

В межах вікна магнітопроводу потоки розсіювання за конфігурацією можуть суттєво відрізнитись від потоків поза межами вікна, тому, для більш точного врахування значень потоків розсіювання пропонується визначати потоки «стрижневого» розсіювання та потоки, обумовлені впливом ярем та другого стрижня, як окремі складові та визначати їх сумарне значення.

Модель за рис. 2.5, яка пропонується в даній роботі в якості «капсульної» складової комплексної вісесиметричної моделі, умовно відповідає перерізу реального двострижневого магнітопроводу з обмоткою у площині вісей симетрії обох стрижнів магнітопроводу. Принциповим для цієї моделі є те, що вісь симетрії  $Z$  «капсульної» моделі співпадає з віссю симетрії стрижня магнітопроводу, на якому розташована обмотка АТН. Також принциповим є зберігання висоти вікна магнітопроводу та відстані між вісями стрижнів в перерізі. Стрижень, на якому розташовані обмотки, моделюється циліндричним стрижнем еквівалентного за площею кругового перерізу. Другий стрижень магнітопроводу в такій моделі замінений циліндричною трубою з феромагнетику, яка за товщиною стінки вздовж вісі  $OR$  відповідає товщині «пакету» стрижня, а ярма магнітопроводу представлені циліндричними дисками, висота яких в перерізі, що містить вісь

$Z$ , відповідає висоті ярем. Висота магнітопроводу у вісесиметричній моделі відповідає висоті реального магнітопроводу (див. рис. 2.8).

Для виконання розрахунку індуктивності розсіювання із застосуванням комплексної вісесиметричної моделі, в даній роботі пропонується використовувати дві вісесиметричні моделі: «стрижневу» (за виконаним раніше розрахунком, рис. 2.1 – 2.3, формули (2.1 – 2.13), пп. 1 – 3 «Методу вибору розташування витків вихідної частини обмотки автотрансформатора, який дозволяє на етапі проектування забезпечувати необхідне значення його приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання») та «капсульну», з магнітопроводом за рис. 2.5, з відповідним розрахунком складових потоку розсіювання, який є аналогічним розрахунку складових потоку розсіювання для «стрижневої» моделі. Для одержання результуючих складових магнітного потоку розсіювання комплексної вісесиметричної моделі  $\Phi_{1i}$ ,  $\Phi_{1j}$ ,  $\Phi_{2i}$ ,  $\Phi_{2j}$  за формулою (2.13) складаються відповідні результати розрахунків «стрижневої» та «капсульної» моделей з певними дольовими коефіцієнтами. Суть розрахунку цих коефіцієнтів розглянемо за рис. 2.8.

Оскільки внесок «капсульного» розсіювання складає  $\sim 10\%$  по відношенню до «стрижневого», можемо його вираховувати достатньо наближено. У виді зверху за рис. 2.8 виділимо цій складовій потоку розсіювання сектор з кутом  $\alpha$  та радіусом  $r_A$ , визначеним точкою А за рис. 2.4, 2.5. Радіус  $r_A$  цієї точки визначається радіусом відповідної точки на вісі  $OR$  в площині максимального магнітного потоку в перерізі стрижня з обмоткою вісесиметричної «капсульної» моделі, в якій відбувається зміна знаку  $Z$ -складової індукції розрахованого магнітного поля на вісі  $OR$ .

У відповідності до рис. 2.8, дольова частка потоку магнітного поля, створюваного моделлю з «капсульним» магнітопроводом у циліндричній системі координат, дорівнюватиме відношенню:

$$K_2 = \alpha / 2\pi. \quad (2.16)$$

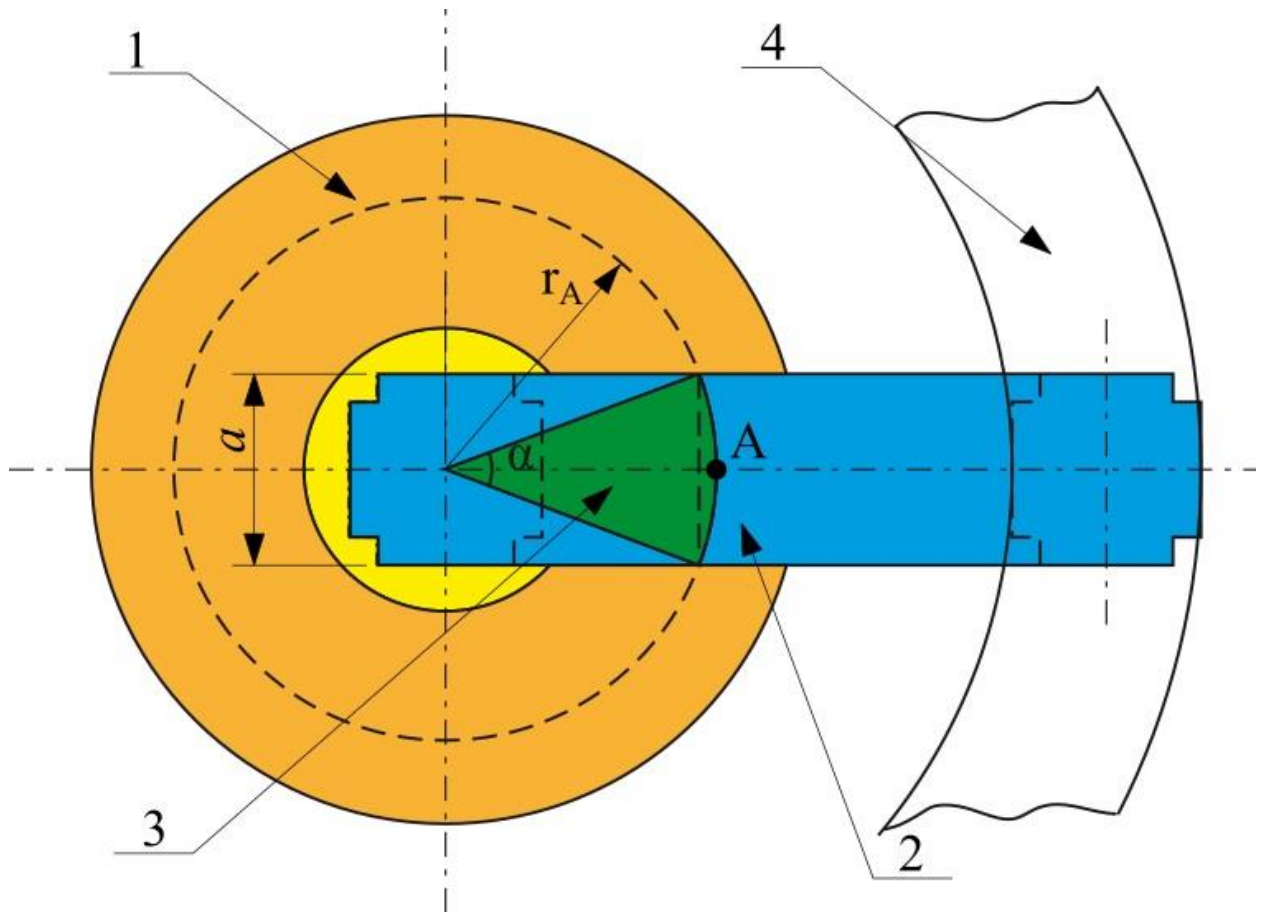


Рис. 2.8 До розрахунку дольових коефіцієнтів «стрижневого» та «ярмового» потоків розсіювання у циліндричній системі координат (рисунок в площині, перпендикулярній вісі  $Z$ ): 1 – область розташування витків обмотки; 2 – ярмо магнітопроводу; 3 – сектор «впливу» магнітного потоку «капсульного» магнітопроводу; 4 – зовнішня стінка «капсульного» магнітопроводу;  $A$  – точка в перерізі моделі обмотки.

Відповідно, частка потоку, створюваного «стрижневою» моделлю (за рис. 2.4, 2.5) у циліндричній системі координат, буде визначатись коефіцієнтом:

$$K1 = 1 - K2. \quad (2.17)$$

Згідно рис. 2.8, коефіцієнт  $K2$  можна виразити через розміри  $r_A$  та  $a$ :

$$K2 = \arcsin(a / 2r_A) / \pi. \quad (2.18)$$

Таким чином, тривимірну модель потоків розсіювання двострижневого магнітопроводу з обмоткою еквівалентуємо двома вісесиметричними

моделями у циліндричній системі координат: «стрижневою» моделлю та «капсульною» моделлю, а результуючий магнітний потік розсіювання комплексної моделі визначаємо як суму потоків розсіювання «стрижневої» та «капсульної» моделей, помножених на відповідні дольові коефіцієнти за формулами (2.16 – 2.18):

$$\Phi_{рез} = \Phi' * K1 + \Phi'' * K2, \quad (2.19)$$

де  $\Phi'$  – потік, розрахований для «стрижневої» моделі;  $\Phi''$  – потік, розрахований для «капсульної» моделі.

В публікаціях також використовують інші способи моделювання «ярмового» розсіювання без використання формул (2.16 – 2.19) у циліндричній системі координат, наприклад, змінюють геометрію «капсульної» моделі таким чином, щоб, не змінюючи геометрію «вікна» магнітопроводу (як пропонують автори в [16]), забезпечити рівність площ перерізу ярма та «кришки» й «дна» «капсули» на будь-якому радіусі перетину циліндричною поверхнею, що паралельна вісі  $z$ . Так само за [16] необхідно забезпечити рівність площ перерізу бічної «стінки» «капсули» й другого стрижня магнітопроводу. Більш складним є спосіб моделювання «кришки», «дна» та бічної «стінки» «капсули» зі змінними в просторі магнітними проникностями, які залежать від радіальної координати та забезпечують в моделі магнітний опір, що відповідає магнітному опору в ярмі та другому стрижні реальної магнітної системи. Слід відзначити, що кожна з цих методик врахування «ярмового» розсіювання не є строго обґрунтованою, проте, їх застосування може дозволити підвищувати точність розрахунків індуктивності розсіювання, які виконуються лише за «стрижневою» моделлю. В подальшому будемо використовувати для врахування ярмового розсіювання модель «капсульного» магнітопроводу за рис. 2.5, та рис. 2.8, як найбільш спрощену за реалізацією.

Близьке до (2.18) визначення дольового коефіцієнта  $K2$  можна одержати із співвідношення площ, виокремлених за рис. 2.9.

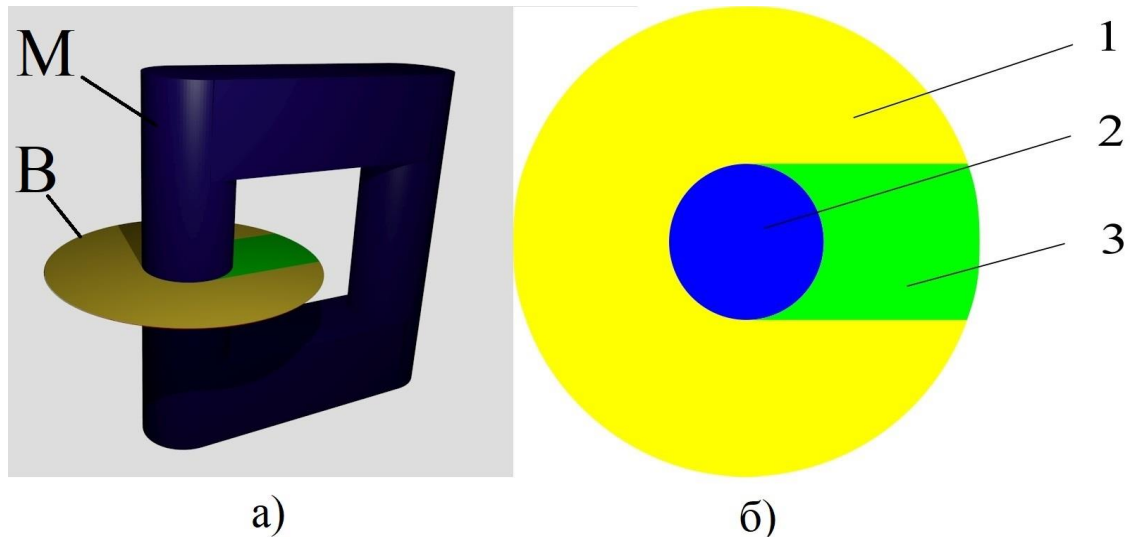


Рис. 2.9 Складові площі витка обмотки з магнітопроводом: а) – за просторовою моделлю; б) – за її сегментацією; В – виток обмотки; М – магнітопровід; 1 – площа сегменту «стрижньового» розсіювання; 2 – площа перерізу стрижня магнітопроводу; 3 – площа внеску «ярмового» розсіювання (у перерізі вікна магнітопроводу).

У відповідності до рис. 2.9, дольовий коефіцієнт сегменту, позначений на рис. 2.9 б) цифрою **3**, може бути визначений за формулою:

$$K_2 = \frac{r \cdot \sqrt{R^2 - r^2} + R^2 \cdot \arcsin\left(\frac{r}{R}\right) - \frac{\pi \cdot r^2}{2}}{\pi \cdot (R^2 - r^2)}, \quad (2.20)$$

де  $R$  – радіус витка  $B$ , для якого розраховується потокозчеплення;  $r$  – радіус еквівалентного стрижня магнітопроводу  $M$ . При цьому, розрахунки за формулами (2.17, 2.19) залишаються без змін.

Послідовність розрахунку магнітного потоку та потокозчеплень циліндричної обмотки двострижневої магнітної системи (з урахуванням ярмового розсіювання) за використанням вищезазначених особливостей математичного моделювання можна представити наступним алгоритмом:

1) Вибір програмного забезпечення, яке б в одному пакеті, або у комплексі від кількох виробників ПЗ забезпечувало:

а) можливість моделювання магнітопроводу та обмоток автотрансформатора у циліндричній системі координат;

б) можливість варіювати характеристики складових моделі – змінювати геометрію, задавати струми крізь перерізи окремих сегментів обмотки, активний опір витків обмотки, відносну магнітну проникність магнітопроводу, тощо;

в) можливість побудови сітки скінченних елементів;

г) можливість розрахунку картини магнітного поля та одержання шляхом інтегрування нормальних складових магнітних потоків  $\Phi_0$ ,  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  крізь поверхні, які у циліндричній системі координат зображуються лініями (у відповідності до рис. 2.2).

2) Розрахунок радіусу еквівалентного (центрального) стрижня у циліндричній системі координат, наприклад, за рівною площею перерізу стрижня реального магнітопроводу [80].

3) Розрахунок товщини зовнішньої циліндричної стінки «капсульного» магнітопроводу у відповідності до рис. 2.8.

4) Визначення висоти ярмових дисків («кришки» та «дна») «капсульного» магнітопроводу за висотою ярем реального магнітопроводу.

5) Зображення перерізу вісесиметричної обмотки у циліндричній системі координат, який повинен відповідати геометричному розташуванню витків у реальній обмотці. Кількість сегментів, на які поділяється обмотка при моделюванні, їх розташування, обираються в залежності від необхідної точності розрахунків та обчислювальної здатності ПК.

6) Розрахунок геометричних центрів для кожного з сегментів обмотки (пар координат  $r_i, z_i; r_j, z_j$ ).

7) Визначення струму в обмотці.

8) Розрахунок густини струмів у сегментах обмотки за питомою кількістю витків у сегменті.

9) Визначення магнітної проникності магнітопроводу для проведення розрахунків за п. 1.4 (для спрощених розрахунків може бути прийняте

«усереднене» значення відносної магнітної проникності для діапазону досліджуваних режимів роботи АТН).

10) Побудова математичної моделі автотрансформатора за параметрами, розрахованими відповідно пп. 2 – 9 у обраному програмному середовищі.

11) Визначення граничної поверхні («магнітного екрану») моделі, для розрахунків картини магнітного поля на ПК, на відстані не менш ніж 10 геометричних розмірів магнітопроводу з обмоткою.

12) Побудова сітки скінченних елементів створеної за пп. 10 – 11 моделі та розрахунок картини магнітного поля засобами обраного за п. 1 програмного забезпечення.

13) Визначення магнітних потоків  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  крізь поверхні інтегрування для центру кожного сегменту обмотки, у відповідності до рис. 2.2, 2.3.

14) Розрахунок параметрів індуктивності розсіювання для комплексної моделі за одержаними значеннями потоків для «стрижневої» моделі та моделі із «капсульним» магнітопроводом за формулами (2.6 – 2.17).

#### **2.4 Врахування ємнісних струмів в обмотках**

Ємнісні струми є обов'язковими складовими струмів в обмотках високовольтних трансформаторів, автотрансформаторів, реакторів [80]. Особливого значення такі струми набувають в обмотках високовольтних ТН та автотрансформаторів напруги з малою відстанню між шарами витків та значною міжшаровою ємністю. Наявність виникаючих (завдяки ємнісним струмам) в обмотках послідовних та паралельних коливальних контурів з індуктивностей та ємностей призводить до можливого виникнення резонансних явищ в обмотках трансформаторів напруги, які досліджуються, наприклад, в роботах [46 – 53]. Ці резонансні явища призводять не тільки до спотворень при визначенні вищих гармонічних складових високої напруги в ТН на певних частотах [41], які для кожного виготовленого вимірювального трансформатора можуть бути різними, хоча й близькими, а й до можливості

виникнення перенапруг в обмотках і пробою та руйнування їх ізоляції. На жаль, більшість дослідницьких робіт присвячується аналізу частотних характеристик вже існуючих високовольтних трансформаторів напруги та не пропонують методів розрахунку цих характеристик на етапі проектування. Однак, саме розробка таких питань могла б допомогти вітчизняному виробнику випускати конкурентоспроможну продукцію на міжнародному ринку високовольтного електрообладнання. В ряді закордонних джерел [83 – 84] вже піднімаються питання розрахунку таких характеристик на етапі проектування, проте, більшість робіт присвячується аналізу та коригуванню похибок вимірювальних трансформаторів за різних режимів їх роботи. В даній роботі не розглядаються фактори, що призводять до резонансних явищ, та визначається лише вплив ємнісних складових струмів на похибку визначення масштабного коефіцієнта та кутову похибку високовольтного автотрансформатора напруги.

Діаграму складових напруги на кожному витку обмотки високовольтного автотрансформатора в режимі холостого ходу можна представити у вигляді, представленому на рис. 2.10.

За рис. 2.10 напруга  $U_i$  на  $i$ -витку складається з активної складової, якій відповідає вектор  $I_0 \cdot R_i$ , індуктивної складової, викликаної розсіюванням, якій відповідає вектор  $I_0 \cdot X_{s_i}$ , та вектора  $-E_{PC_i}$ . Кут  $\varphi$  вектора  $-E_{PC_i}$  по відношенню до вісі  $jY$  дорівнює куту відставання основного магнітного потоку в магнітопроводі  $\Phi_0$  від МРС ( $I_0 \cdot WI$ ), який визначається за методиками розрахунку характеристик магнітопроводів, див. [13] та ін.

Однак, крім струму холостого ходу в обмотках високовольтних автотрансформаторів напруги (див. також Розділ 3.3) присутні і ємнісні струми, які виникають внаслідок різниці потенціалів між витками, шарами витків обмотки, між витками обмотки та заземленими частинами конструкції. Особливого значення ємнісні струми набувають між стрижнем (або заземленим екраном) та першим, найближчим до нього шаром витків обмотки АТН, оскільки в ньому перебуває основна вихідна частина обмотки,

що визначає вихідну напругу автотрансформатора. Також, суттєві ємнісні струми спостерігаються в області високовольтного екрану обмотки, але їх вплив нівелюється, в цілому, оскільки вони відносяться до незначної частини високовольтної обмотки АТН.

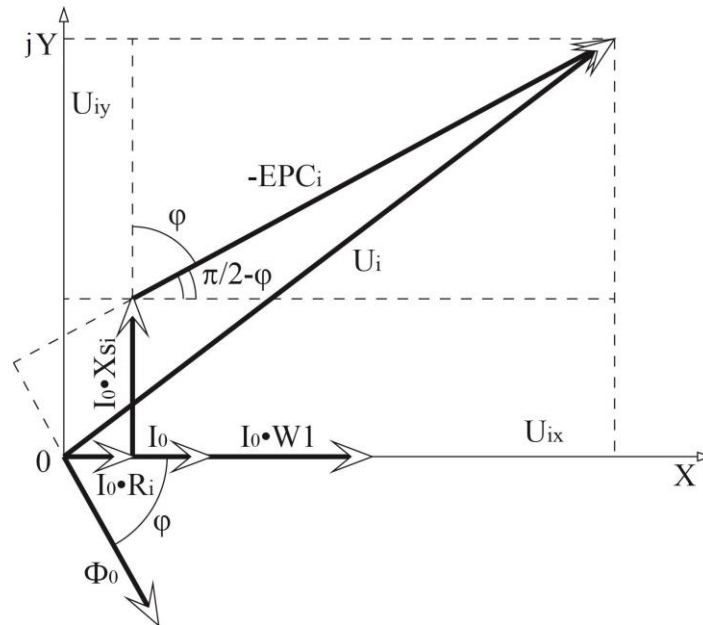


Рис. 2.10 Векторна діаграма складових напруги на  $i$ -витку обмотки високовольтного автотрансформатора напруги в режимі холостого ходу.

На рис. 2.11 представлено зображення розподілу ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги (за умови, що основний розподіл потенціалів по витках формує основний магнітний потік, пов'язаний зі струмом холостого ходу).

Як можна бачити з рис. 2.11, частина ємнісних струмів між витками різних шарів обмотки (у міжшаровій ізоляції) входить у витки з зовнішнього (вищого за потенціалом) шару, частина виходить з витків у внутрішній (менший за потенціалом) шар. Різниця між цими струмами протікає по витках одного шару. Аналогічний детальний розгляд ємнісних струмів, що протікають між витками та між шарами циліндричних обмоток при різному розташуванні цих витків та шарів, розглянуто в [85, 86]. Метою проведеного в [86] розгляду ємнісних струмів в обмотках високовольтного трансформатора є визначення умов виникнення резонансу при частотах

живлення порядку сотень кілогерц, які використовуються в трансформаторах при перетвореннях типу «постійний струм – змінний струм – постійний струм». В публікації дисертанта [85] показано, що у високовольтному автотрансформаторі напруги при робочій частоті 50 Гц, умови для виникнення резонансу відсутні, оскільки струм холостого ходу, орієнтовно, на 2 порядки перевищує ємнісні струми в обмотці. Але, з огляду на необхідну високу точність АТН (клас точності 0,05), врахування ємнісних струмів в обмотці є необхідним. При цьому, ємнісні струми можуть розглядатись як малі збурення (по відношенню до струму холостого ходу). Для класів напруги АТН 110 кВ і вище ємнісні струми в обмотці необхідно розглядати нарівні зі струмом холостого ходу.

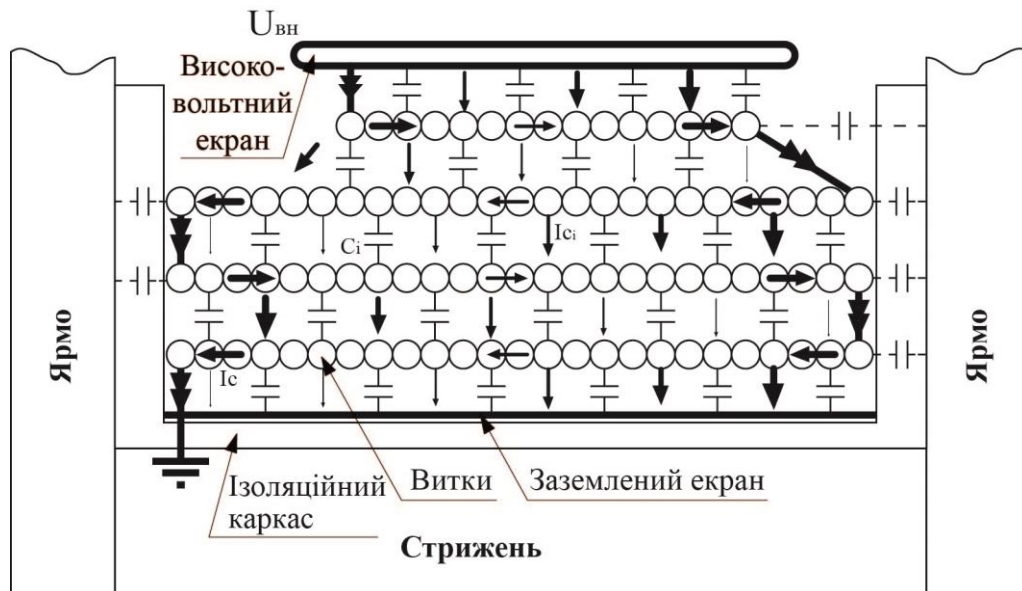


Рис. 2.11 Розподіл ємнісних складових струмів між витками обмотки високовольтного автотрансформатора напруги:  $C_i$  – міжвиткова ємність між шарами витків;  $I_{c_i}$  – міжвитковий ємнісний струм між витками в різних шарах (показаний вертикальними стрілками між шарами);  $I_c$  – інтегральний наскрізний ємнісний струм у витках (показаний горизонтальними стрілками);  $U_{вн}$  – прикладена висока напруга до обмотки автотрансформатора; подвійними стрілками зображені контактні з'єднання витків обмотки між шарами. Штриховими лініями показані ємнісні опори між крайніми витками шарів та заземленими ярами магнітопроводу.

З розглянутих у [86] характеристик витікає, що за частоти 50 Гц ємнісними струмами з крайніх витків шарів на заземлені ярма магнітопроводу можна нехтувати. Практично, можна вважати, що різницева ємнісна складова струму, яка визначається втікаючими та витікаючими ємнісними складовими струму у поперечному до розташування шарів обмотки напрямку, перетікає по витках вздовж шарів обмотки. Результуючий розподіл міжшарових ємнісних струмів у витках першого (найближчого до стрижня) шару витків обмотки високовольтного автотрансформатора напруги (за Розділом 4) можна представити графіком на рис. 2.12:

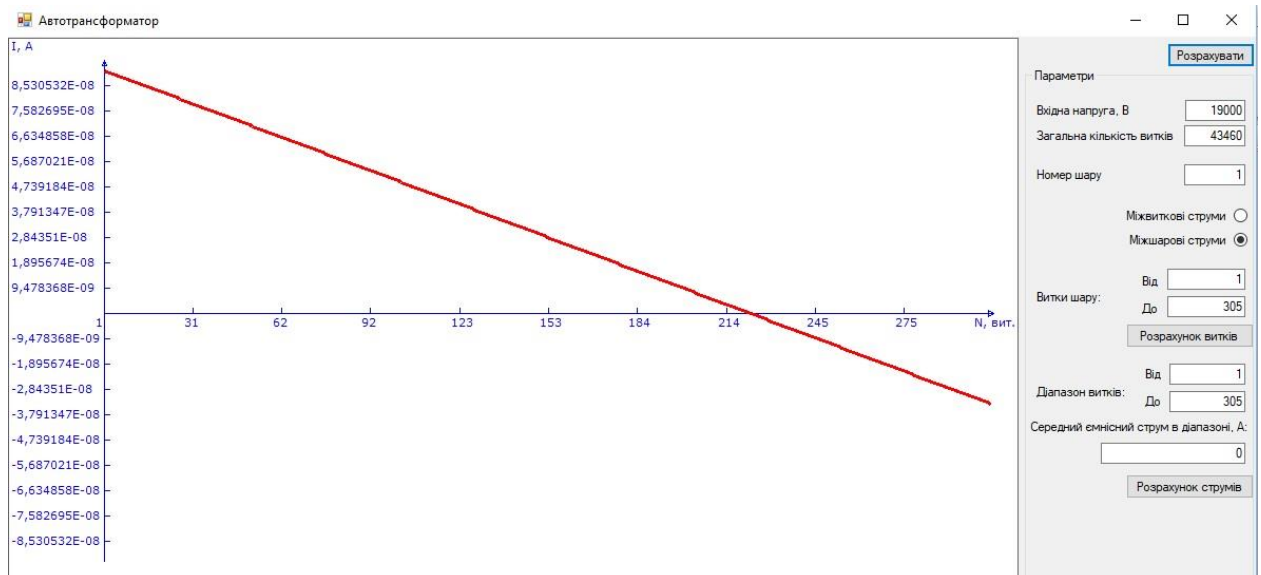


Рис. 2.12 Розподіл різницевого міжшарових ємнісних струмів по витках першого шару (найближчого до стрижня) обмотки високовольтного автотрансформатора напруги (за Розділом 4) при вхідній напрузі АТН 19 кВ. Від'ємні значення струмів відповідають ділянкам шару витків, на яких струми з зовнішнього (другого) шару обмотки менші за струми на заземлений екран стрижня. На горизонтальній вісі позначені номери витків першого шару обмотки, зліва – направо.

Значення струмів на рис. 2.12 визначались (Розділ 4) виходячи з розрахунку діючої напруги на міжшарову ізоляцію кожного витка та за

загальновідомою формулою ємності циліндричного конденсатора між двома шарами обмотки з урахуванням ємнісного опору міжшарової ізоляції  $X_c = 1 / \omega C$  на частоті 50 Гц, при цьому, одержаний результат для ємності  $X_c$  був поділений на кількість витків у шарі (305).

Особливе значення ємнісні струми мають для вихідних шарів обмотки, оскільки, саме в цих шарах розташовуються витки вихідної низьковольтної частини обмотки автотрансформатора напруги.

Після підсумовування ємнісних струмів витків першого та інших шарів обмотки [85] одержимо залежність наскрізного ємнісного струму у витках першого шару обмотки, представлену на рис. 2.13.

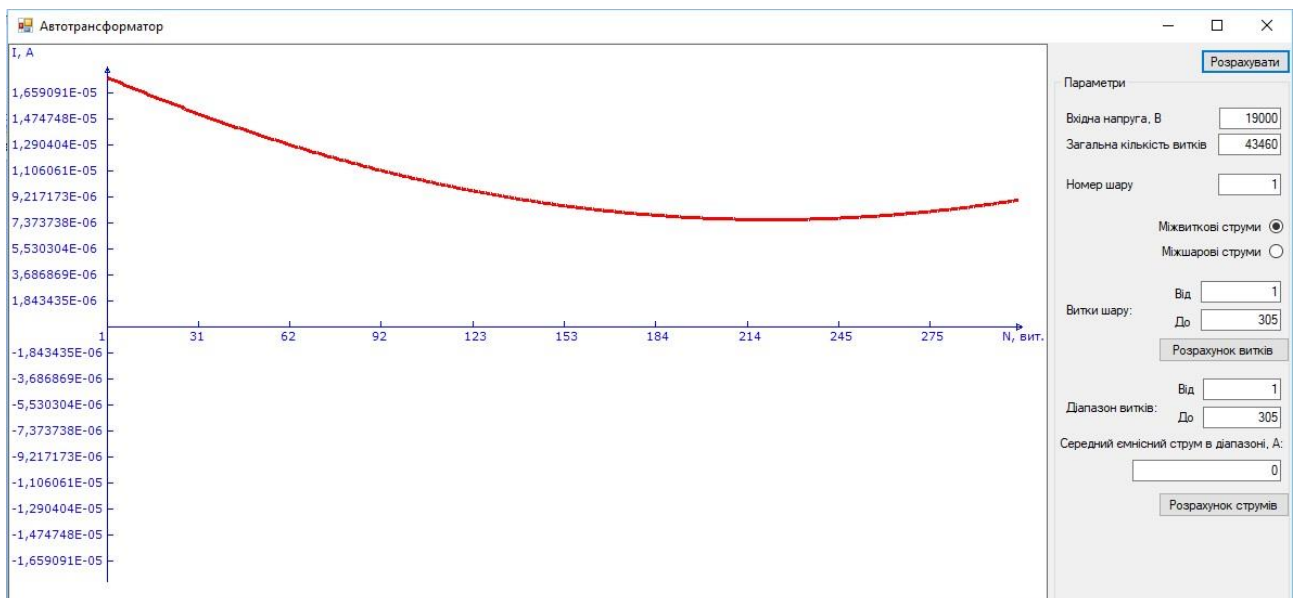


Рис. 2.13 Розподіл наскрізного ємнісного струму у витках першого шару обмотки високовольтного автотрансформатора напруги (за Розділом 4) при його вхідній напрузі 19 кВ.

Як можна бачити з рис. 2.13, найбільший внесок ємнісного струму спостерігається на початку обмотки високовольтного автотрансформатора, далі вздовж першого шару обмотки значення ємнісного струму зменшується нелінійно (за параболічним законом). Наприкінці першого шару витків обмотки ємнісний струм починає збільшуватись. Ємнісний струм в шарі не досягає нульового значення за рахунок перетікання ємнісних струмів з



протікання ємнісного струму по індуктивній складовій його опору, викликаній розсіюванням. Зазвичай, вектори  $U_{a_{ci}}$  та  $U_{p_{ci}}$  є малими у порівнянні з векторами  $I_0 \cdot R_i$  та  $I_0 \cdot X_{s_i}$ , тому для спрощення при розрахунках можна приймати, що вектор  $U_{a_{ci}}$  є перпендикулярним не до вектора  $U_i$ , а до вектора  $-EPC_i$ . Таке спрощення дає можливість при обчисленнях проєкцій векторів на вісі  $X$  та  $Y$  використовувати лише значення кута  $\varphi$ . Відповідно, складові напруги на кожному витку обмотки високовольтного автотрансформатора можна визначати за формулами:

$$U_{ix} = I_0 \cdot R_i - EPC_i \cdot \sin \varphi - U_{p_{ci}} \cdot \sin \varphi + U_{a_{ci}} \cdot \cos(\pi - \varphi), \quad (2.21)$$

$$U_{iy} = I_0 \cdot X_{s_i} - EPC_i \cdot \cos \varphi - U_{p_{ci}} \cdot \cos \varphi + U_{a_{ci}} \cdot \sin(\pi - \varphi). \quad (2.22)$$

З формул (2.21 – 2.22) витікають рівняння для визначення складових напруги на  $i$ -витку та рівняння для кута вектора напруги:

$$U_i = \sqrt{U_{ix}^2 + U_{iy}^2}; \quad (2.23)$$

$$\varphi_{U_i} = \arctg\left(\frac{U_{iy}}{U_{ix}}\right). \quad (2.24)$$

У формулах (2.21 – 2.22)  $I_0$  – струм холостого ходу, визначений для обраного магнітопроводу, обраної первинної напруги  $U_I$  та обраної кількості витків  $WI$ ;  $R_i$  – активна складова опору  $i$ -витка обмотки (розраховується за діаметром витка, діаметром провідника, питомим опором матеріалу провідника);  $X_{s_i}$  – реактивна складова опору  $i$ -витка обмотки (розраховується з виразів потокозчеплення розсіювання витка, у відповідності до Розділу 3);  $U_{a_{ci}} = I_{ci} \cdot R_i$ , де  $I_{ci}$  – ємнісний струм у  $i$ -витку обмотки;  $U_{p_{ci}} = I_{ci} \cdot X_{s_i}$ ;  $EPC_i$  – електрорушійна сила для  $i$ -витка обмотки (приймається рівною  $EPC_i = EPC / WI$ , де  $EPC$  – електрорушійна сила для всієї обмотки).

Застосування формул (2.21 – 2.24) при одночасному використанні формул (2.17 – 2.19) для «стрижневої» моделі та моделі із «капсульним» магнітопроводом у циліндричній системі координат дозволяє одержати відповідні комплекси напруги на вході високовольтної обмотки автотрансформатора та її на низьковольтній вихідній частині (за визначеного

співвідношення витків всієї обмотки та її вихідної частини), а також різницю кутів напруги для всієї обмотки та її низьковольтної частини. Такі розрахунки, проведені на етапі проектування високовольтного автотрансформатора напруги, дозволять заздалегідь прогнозувати кутову похибку автотрансформатора напруги та його похибку по напрузі.

Результати 2 розділу дисертаційної роботи опубліковані в статтях [82, 85, 110, 112, 116, 117, 118].

## **2.5 Висновки по розділу 2**

2.5.1 Вперше обґрунтовано визначення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання обмоток високовольтних автотрансформаторів напруги за допомогою математичного моделювання в циліндричній системі координат з використанням чисельних розрахунків на ПК, з урахуванням параметрів магнітопроводу та геометрії обмоток, при переважаючому внеску «стрижневого» розсіювання, що дозволило виключити з розрахунків значення магнітного потоку розсіювання в перерізі стрижня магнітопроводу.

2.5.2 Вперше запропоновано метод вибору розташування вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги, який дозволяє вже на етапі проектування забезпечувати задане значення його приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання. Запропонований метод може також бути поширеним на трансформатори напруги.

2.5.3 Удосконалено математичну модель розсіювання магнітного поля в високовольтному автотрансформаторі напруги, що дозволяє визначати дольові коефіцієнти впливу «стрижневого» та «ярмового» розсіювання на значення його приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання.

2.5.4 Отримав подальший розвиток аналіз впливу ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги, які розглядаються як малі збурення для АТН класу напруги 10 кВ, однак для автотрансформаторів класу 110 кВ і вище можуть бути порівняні зі струмом холостого ходу. Виявлено нелінійний характер розподілення ємнісної складової струму в

витках обмотки при робочій частоті та запропоновано векторну діаграму для визначення впливу цієї складової на розподіл напруги по витках обмотки високовольтного автотрансформатора напруги.

### РОЗДІЛ 3

## МАСШТАБНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ В ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРИБОРАХ, В ЯКИХ ВІДБУВАЄТЬСЯ КОМПЛЕКСНЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЕ ТА ТРАНСФОРМАТОРНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ НАПРУГИ

### 3.1 Експериментальні дослідження високовольтного випробувального трансформатора з «вимірювальною обмоткою»

Основне призначення високовольтних випробувальних трансформаторів – використання в колах живлення різноманітних високовольтних випробувальних установок, випробувальних стендів, а також використання у інших високовольтних схемах дослідження високовольтних об'єктів [87].

За своїм типом високовольтні випробувальні трансформатори є підвищувальними трансформаторами особливої конструкції. За струмами у високовольтній обмотці вони є набагато більш потужними, ніж трансформатори напруги на відповідний клас напруги. Особливістю випробувальних трансформаторів є здатність витримувати тривалі короткі замикання високовольтної обмотки, що є необхідною умовою при випробуванні високовольтної ізоляції на пробій або перекриття по поверхні. Тому ці трансформатори, як правило, мають більші значення напруги короткого замикання, ніж силові трансформатори аналогічної потужності і класу напруги.

Зазвичай, активну частину високовольтного випробувального трансформатора виконують на двострижньовому або броньовому магнітопроводі з однією низьковольтною та однією високовольтною обмоткою (а також з додатковою обмоткою «зв'язку», або «збуджувальною» обмоткою, призначеною для з'єднання випробувальних трансформаторів у каскад, у відповідності до рис. 3.1 [88]). Також, в [22, 87 – 88] відзначається, що послідовне з'єднання у каскад кількох випробувальних трансформаторів,

які мають відповідну обмотку збудження та виконані кожен в окремому корпусі, дає можливість одержувати значно більшу сумарну випробувальну напругу.

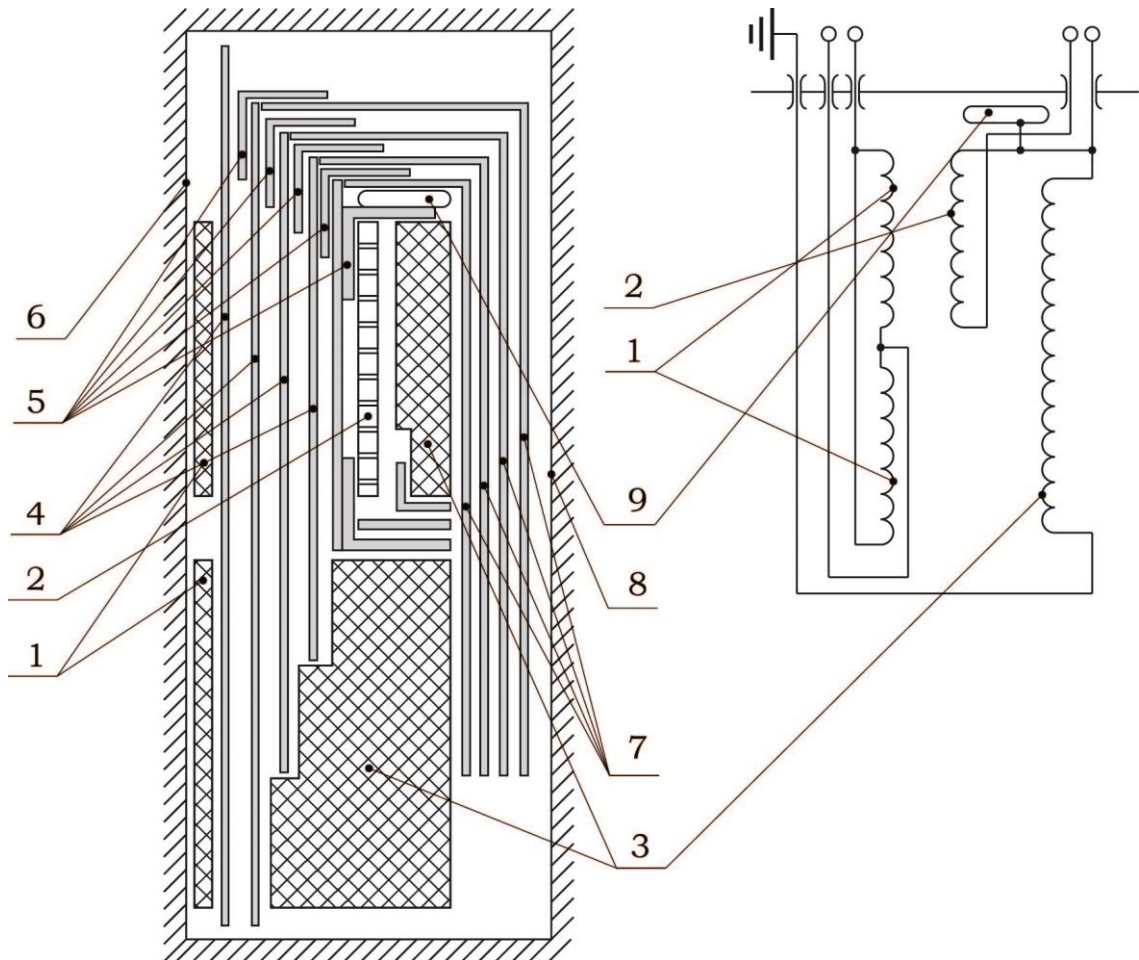


Рис. 3.1 Схема та виконання обмоток типового випробувального трансформатора класу напруги 500 кВ МТЗ [88]: 1 – обмотка низької напруги; 2 – обмотка збудження (наступної ступені каскаду); 3 – обмотка високої напруги; 4 – ізолюючі циліндри; 5 – кутові шайби; 6 – центральний стрижень магнітопроводу; 7 – ізолюючі бар'єри; 8 – бічний стрижень магнітопроводу; 9 – ємнісне кільце.

Випробувальні високовольтні установки та комплекси, зазвичай, включають високовольтне вимірювальне обладнання, яке необхідне для вимірювання вихідної напруги високовольтних випробувальних установок,

що діє на об'єкти випробувань. В якості такого обладнання для вимірювання вихідної напруги можуть застосовуватись трансформатори напруги, високовольтні подільники напруги, кіловольтметри, сферичні розрядники, тощо [10, 89]. При цьому, стандартизовані вимірювальні трансформатори напруги, як правило, за розмірами (наприклад, висотою) значно перевищують розміри високовольтних випробувальних трансформаторів. Так, розміри типового випробувального трансформатора ИОМ-100/25 відповідають:  $\varnothing 645 \times 1300$  мм, маса 350 кг, а розміри відповідного йому вимірювального трансформатора НКФ-170 складають:  $\varnothing 710$  мм, висота 4070 мм (в 3,1 рази більше!), маса 1460 кг (в 4,1 рази більше!). Тому, «доукомплектування» випробувального трансформатора високовольтним вимірювальним трансформатором потребує різкого удорожчання установки, збільшення її виробничої площі та, зокрема, «гостродефіцитної» висоти.

В зв'язку з цим, в експлуатації поширені високовольтні випробувальні трансформатори з вихідною «вимірювальною обмоткою» (що являє собою вихідну низьковольтну частину високовольтної обмотки, побудованої за схемою автотрансформаторного перетворення напруги, та знаходиться безпосередньо біля її заземлюваного відводу «Х»), які комплексно поєднують в собі як властивості підвищувального високовольтного випробувального трансформатора, так і властивості високовольтного вимірювального автотрансформаторного подільника напруги, виконаного на основі високовольтної обмотки. Такі випробувальні трансформатори (наприклад, типу ИОМ-100/25) випускались в СРСР в об'єднанні «Ленэнерго», а також знову випускаються в Російській Федерації [58]. Вищезазначене виконання високовольтних випробувальних трансформаторів дозволяє значно скоротити вартість високовольтного обладнання та витрати на виробничі площі для створення високовольтних випробувальних лабораторій (оскільки в одній високовольтній одиниці обладнання об'єднуються функції одержання високої випробувальної напруги та її вимірювання) та, крім того, переходити до створення високовольтних

мобільних випробувальних лабораторій, що є актуальним напрямком розвитку високовольтної техніки.

Згодом, в експлуатації з'ясувалось, що вимірювання випробувальної напруги за допомогою «вимірювальної обмотки» випробувального трансформатора (як часто називають вихідну частину високовольтної обмотки такого трансформатора, побудованої за схемою автотрансформаторного перетворення напруги) та з використанням типового низьковольтного вольтметра класу точності 0,5 забезпечує доволі високу точність (похибка  $\sim 2\%$ , що задовільняє вимогам ГОСТ 1516.2 [91], стандарту Міжнародної електротехнічної комісії ІЕС 60060-2 [92]) при незначному навантаженні випробувального трансформатора (тобто, фактично, в режимі холостого ходу), або при його навантаженні активними струмами ( $\cos \varphi_{\text{навант.}} \cong 0$ ).

При навантаженні ж випробувального трансформатора високовольтною ізоляцією випробуваного обладнання, яка, фактично, являє собою значну ємність (до 1 мкФ [90]), виникають суттєві (незрозумілі!) похибки до 10% та більше, які, до того ж, залежать від типу випробуваного обладнання (в той час, як за ГОСТ 1516.2 [91] та відповідним міжнародним стандартом ІЕС 60060-2 [92] допустима похибка вимірювання високої випробувальної напруги не повинна перевищувати 3%).

Це явище ніким не було пояснене. В зв'язку з цим в дисертаційній роботі були проведені експериментальні дослідження високовольтного випробувального трансформатора з «вимірювальною обмоткою» з використанням високоточного високовольтного вимірювального обладнання.

Сутність проведених експериментів з випробувальним трансформатором ИОМ-100/25 з «вимірювальною обмоткою» пояснюється на рис. 3.2 [93].

В якості навантаження використовувалось високовольтне обладнання з параметрами: активне навантаження 217 кОм, ємнісне навантаження 15,4 нФ, а також проводились дослідження на холостому ході [57]. За допомогою регулятора напруги РНО підвищувалась вхідна напруга на низьковольтній

обмотці ИОМ-100/25. Висока напруга на виході ИОМ-10/25 вимірювалась за допомогою еталонного вимірювача високої напруги ВВН-0,8-100М (вхідна ємність – 73 пФ, вхідний опір – 238 МОм), для якого похибка вимірювання змінної напруги на частоті 50Гц в діапазоні 0,8 – 100 кВ не перевищувала  $\pm 0,6\%$ . Напруга на виході «вимірювальної обмотки» ИОМ-100/25 контролювалась за допомогою атестованого вольтметра V1 (вольтметр В7-21А з класом точності 0,5). Додатково напруга на вході ИОМ-100/25 контролювалась за допомогою вольтметра V2. Конденсатор С1 по схемі рис. 3.2 був закорочений.

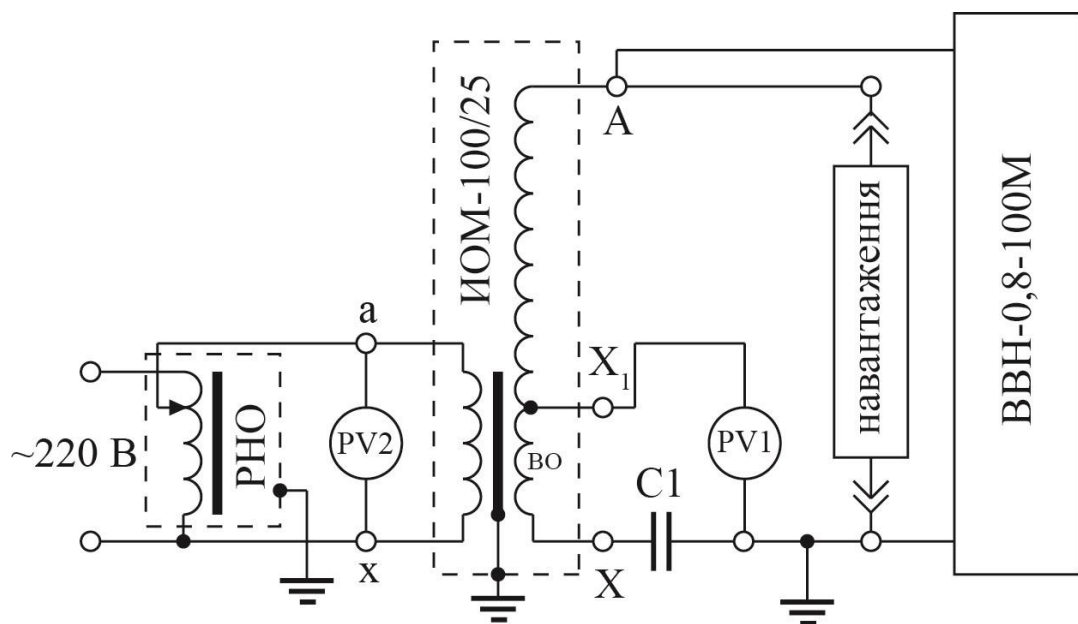


Рис. 3.2 Схема дослідження характеристик високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з вихідною вимірювальною обмоткою ВО: РНО – регулюючий автотрансформатор; ИОМ-100/25 – досліджуваний трансформатор; ВВН-0,8-100М – еталонний вимірювач високої напруги, атестований Державним підприємством «Укрметртестстандарт»; PV1 – вольтметр, приєднаний до виходу «вимірювальної обмотки»; PV2 – вольтметр живлячої низьковольтної обмотки трансформатора; навантаження – змінюване за умовами експерименту; С1 – ємність, значення якої буде пояснене у розділі 3.4 (при визначенні експериментальних даних за рис. 3.3 ємність С1 закорочувалась).

Виміряна вольтметром PV1 напруга помножувалась на номінальний коефіцієнт трансформації високовольтного автотрансформаторного перетворення напруги високовольтної обмотки ИОМ-100/25 (який становить  $Kd_{ном} = 1000$ ) та порівнювалась зі значенням напруги, одержаним за допомогою еталонної системи ВВН-0,8-100М.

Похибка визначення високої напруги за допомогою «вимірювальної обмотки» ИОМ-100/25 визначалась за формулою:

$$F_U = \frac{U_{V1} \cdot Kd_{ном} - U_{ВВН-0,8-100М}}{U_{ВВН-0,8-100М}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де  $U_{V1}$  – напруга на «вимірювальній обмотці»;  $U_{ВВН-0,8-100М}$  – напруга на виході ИОМ-100/25, виміряна за допомогою еталонного вимірювача високої напруги ВВН-0,8-100М.

Результати експериментального дослідження похибок визначення високої напруги з використанням «вимірювальної обмотки» випробувального трансформатора ИОМ-100/25 для його холостого ходу, активного (217 кОм) та ємнісного (15,4 нФ) навантажень представлені на рис. 3.3. Розкид результатів експериментального визначення похибки напруги розраховувався, виходячи з похибки вимірювальної системи ВВН-0,8-100М та вольтметра PV1 (В7-21А).

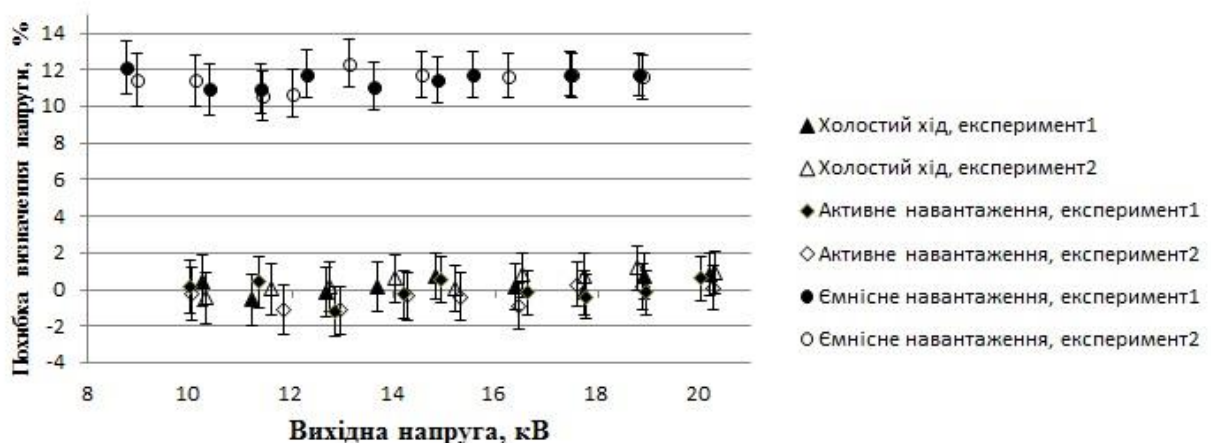


Рис. 3.3 Залежність похибки визначення високої випробувальної напруги ИОМ-100/25 за допомогою «вимірювальної обмотки» за режимів холостого ходу, активного та ємнісного навантажень.

Зазначена вище особливість високовольтного випробувального трансформатора з «вимірювальною обмоткою» не дозволяє використовувати переваги поєднання в ньому випробувального та вимірювального обладнання у випадках ємнісного навантаження (тобто, при «роботі» ИОМ-100/25 за основним призначенням – випробуванням високовольтної ізоляції).

### **3.2 Пояснення аномально високого значення похибки високовольтного випробувального трансформатора з «вимірювальною обмоткою» при ємнісному навантаженні**

Для того, щоб визначити причину зміни характеристик високовольтного автотрансформаторного подільника напруги у складі високовольтного випробувального трансформатора типу ИОМ-100/25 з «вимірювальною обмоткою» при зміні характеру навантаження розглянемо конструктивні особливості його виконання, схему заміщення активної частини та векторні діаграми струмів та напруг обмоток за різного навантаження.

Для визначення схемних особливостей трансформатора ИОМ-100/25 з «вимірювальною обмоткою» було прийнято рішення виконати демонтаж та огляд і обміри його активної частини. В результаті проведених заходів визначено, що високовольтна обмотка трансформатора ИОМ-100/25 виконана з 8 котушок, розташування яких є подібним до зображеного на рис. 3.1 та деталізовано подалі на рис. 3.7. Одержані геометричні розміри магнітопроводу та обмоток в подальшому застосовувались для визначення параметрів моделювання та чисельних розрахунків.

В [94] пропонуються схеми заміщення випробувальних трансформаторів з двома первинними (низьковольтними) обмотками, з'єднаними послідовно та з обмотками, з'єднаними паралельно, а також схема з частиною високовольтної обмотки, яка використовується для каскадного з'єднання випробувальних трансформаторів, та визначається, що розрахунок характеристик випробувального трансформатора є подібним до розрахунку

характеристик трансформатора напруги. Однак, визначення параметрів «вимірювальної обмотки» у матеріалах [94] відсутнє.

Слід зауважити, що навантаження «вимірювальної обмотки» ИОМ-100/25 (вольтметром *PVI*, або іншим вимірювальним обладнанням) є незначним і, практично, не впливає на розподіл струму по високовольтній обмотці, тобто, високовольтна обмотка випробувального трансформатора (щодо вимірювання її напруги за допомогою «вимірювальної обмотки» та номінального коефіцієнту ділення) «працює» в автотрансформаторному режимі із загальним навантаженням, під'єднаним до високовольтної обмотки. Тому причину нерівномірного розподілу напруги по витках високовольтної обмотки (як автотрансформаторного перетворювача напруги) слід шукати з огляду на нерівномірний розподіл потоків розсіювання в площині перерізу обмотки за рис. 2.4 та формулами (2.21 – 2.24).

Для виявлення причин різко нерівномірного розподілу напруги у високовольтній обмотці при суттєвому ємнісному навантаженні ИОМ-100/25 розглянемо векторні діаграми напруг та струмів для цієї обмотки.

В [9, 95] наведені векторні діаграми струму та напруги трансформаторів в режимі холостого ходу, а також при активному, індуктивному та ємнісному навантаженнях його вторинної обмотки.

На рис. 3.4 [93] наведені діаграми струму та складових напруги вторинної (високовольтної) обмотки високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з вимірювальною обмоткою (за аналогією з відомими діаграмами [1, 59]).

На рис. 3.4  $\Phi_{\Sigma}$  позначений результуючий основний магнітний потік у магнітопроводі ИОМ-100/25;  $I_2$  – струм у вторинній обмотці;  $I'_2$  – струм у вторинній обмотці, приведений до кількості витків первинної обмотки;  $E'_2$  – приведена ЕРС вторинної обмотки;  $U'_2$  – приведена напруга на вторинній обмотці;  $I'_2 \cdot R'_2$  – активна складова спаду напруги від струму  $I'_2$  у вторинній обмотці (приведена);  $I'_2 \cdot X'_2$  – індуктивна складова спаду напруги від струму  $I'_2$  у вторинній обмотці (приведена);  $X'_2$  – реактивна складова опору

вторинної обмотки, викликана потоками розсіювання, приведена до кількості витків первинної обмотки.

Як можна бачити з рис. 3.4 а), у випадку ємнісного навантаження високовольтного випробувального трансформатора, вектор  $-E'_2$  випереджає напругу на ємнісному навантаженні  $U'_2$  на певний невеликий кут. Вектор складової спаду напруги у вторинній обмотці  $I'_2 \cdot R'_2$  є, практично, перпендикулярним до вектора напруги на навантаженні та випереджає його (за кутом). Вектор складової спаду напруги у вторинній (високовольтній) обмотці  $I'_2 \cdot X'_2$  є, практично, паралельним до вектора напруги на навантаженні та протилежний йому за напрямком. Цей вектор пов'язаний з індуктивністю розсіювання високовольтної обмотки та обумовлює збільшення вихідної напруги випробувального трансформатора.

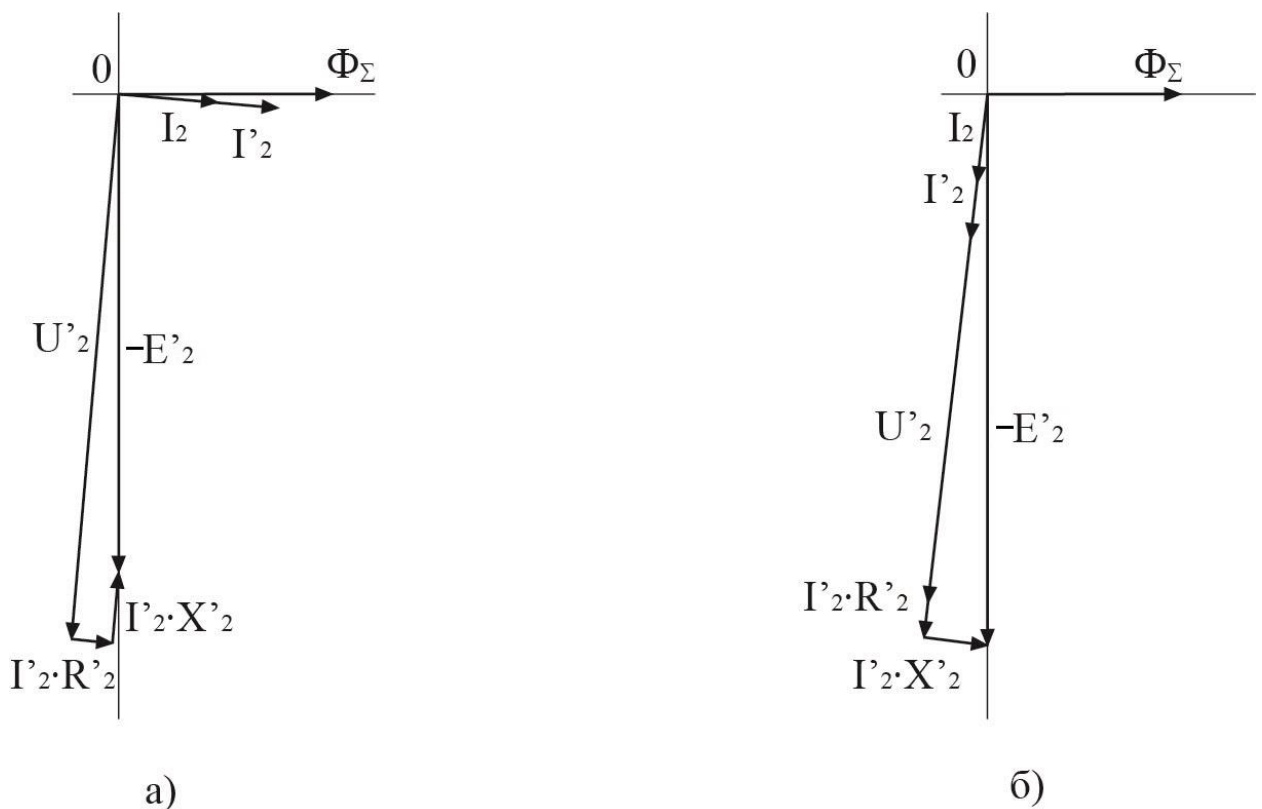


Рис. 3.4 [93] Векторна діаграма струму та складових напруги вторинної (високовольтної) обмотки ИОМ-100/25: а) – ємнісне навантаження; б) – активне навантаження.

З діаграми векторних струмів та напруг на рис. 3.4 а) витікає, що, по-перше, напруга на ємнісному навантаженні буде більшою за значенням за наведену основним магнітним потоком у вторинній обмотці трансформатора ЕРС (що, взагалі, відомо з публікацій [9]); по-друге, внаслідок незначного кута між векторами напруги та ЕРС, різниця по модулю цих векторів суттєво залежить від складової напруги у вторинній (високовольтній) обмотці, викликаній розсіюванням, і, практично, не залежить від її активного опору.

Чим більше розсіювання у високовольтній обмотці, тим більше вихідна напруга трансформатора при ємнісному навантаженні. На противагу цьому, з діаграми векторних струмів та напруг на рис. 3.4 б) витікає, що, по-перше, напруга на активному навантаженні буде меншою за значенням за наведену основним магнітним потоком у вторинній обмотці трансформатора ЕРС; по-друге, різниця по модулю цих векторів суттєво залежить від складової спаду напруги  $I'_2 \cdot R'_2$  у вторинній (високовольтній) обмотці і, практично не залежить від складової  $I'_2 \cdot X'_2$  цієї обмотки.

Виходячи з проведеного аналізу режимів роботи високовольтної обмотки випробувального трансформатора ИОМ-100/25, можна зробити припущення, що в режимі значного ємнісного навантаження, в якому, згідно [57], зафіксовані аномально високі похибки визначення високої випробувальної напруги за допомогою «вимірювальної обмотки», індуктивність розсіювання є тим фактором, який найбільшим чином впливає на розподіл напруги по витках вторинної високовольтної обмотки ИОМ-100/25 (у тому числі, по витках її вихідної частини, що має назву «вимірювальна обмотка»).

### **3.3 Деталізація рівнянь трансформаторів до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток**

Для пояснення процесів, які відбуваються в активній частині високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з

«вимірювальною обмоткою» в режимах холостого ходу, активно-індуктивного та ємнісного навантажень, необхідно визначати складові напруги на витках його високовольтної обмотки (зокрема, її вихідної частини – «вимірювальної обмотки») в кожному з цих режимів. Рівняння з [1, 13, 80] та інших джерел, які розглянуті в дисертації, а також виведені вирази (2.13), (2.21 – 2.24) не дозволяють визначити складові напруги на вимірювальній обмотці ИОМ-100/25, оскільки вони призначені для розрахунків автотрансформаторів, заживлених високою напругою від стороннього джерела.

Таким чином, для одержання виразів, що дозволяють визначати складові напруги на «вимірювальній обмотці», необхідно деталізувати відомі рівняння трансформаторів (та автотрансформаторів) до рівня одиничних витків (груп витків) їх обмоток.

Проведений аналіз показує, що вирішення цього завдання на основі класичних підходів та схем заміщення [1, 13] є неможливим. Необхідно переходити до опису електромагнітних процесів у окремих витках (групах витків) обмоток з деталізацією електричних та магнітних взаємодій на основі розглянутих в Розділі 2 дисертації матеріалів.

В подальшому будемо також використовувати формули, що є традиційними в теорії електромагнітних процесів у трансформаторах [59]:

$$E_m = W \cdot \omega \cdot \Phi_m, \quad (3.2)$$

де  $E_m$  – амплітуда ЕРС самоіндукції, яка наводиться у витках обмотки (кількістю  $W$ ) основним магнітним потоком, амплітудне значення якого  $\Phi_m$ , за кутової частоти магнітного потоку  $\omega$ . Відповідно, у загальновідомих джерелах [38] ця формула наводиться у вигляді діючого значення ЕРС:

$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot W \cdot \Phi_m, \quad (3.3)$$

де  $f$  – частота процесів, що розглядаються, та  $\sqrt{2} \cdot \pi \approx 4,44288$ .

Магнітний потік  $\Phi$ , який проходить по замкненому магнітному контуру, задовольняє рівнянню [80]:

$$\sum \dot{i} \cdot W - \sum \dot{R}_m \cdot \dot{\Phi} = 0, \quad (3.4)$$

де  $i$  – струм, в обмотці з кількістю витків  $W$ , що створює магнітний потік  $\Phi$  в замкненому контурі з магнітним опором  $R_m$ . Таким чином, для основного магнітного потоку в магнітопроводі трансформатора можемо записати (відоме) рівняння у комплексних величинах:

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2}{\dot{R}_m}, \quad (3.5)$$

де  $\dot{I}_1$  – струм первинної обмотки,  $\dot{I}_2$  – струм вторинної обмотки,  $\dot{R}_m$  – комплексний магнітний опір магнітопроводу трансформатора,  $W_1$ ,  $W_2$  – кількості витків первинної та вторинної обмоток, відповідно.

Для того, щоб визначити струми та складові напруги для одиничних витків обмоток трансформатора, дисертантом виконана деталізація рівнянь трансформатора зі збереженням основних положень теорії [59] та запропонована векторна діаграма за рис. 3.5 [96].

Для складання рівнянь окремого  $i$ -го витка первинної та  $k$ -го витка вторинної обмоток трансформатора, у відповідності до рис. 3.5, необхідно, окрім загальновідомих понять (активні складові опорів витків  $r_i$ ,  $r_k$ ; основний магнітний потік  $\Phi_m$  і інші), необхідно увести принципово нові поняття:

– часткова індуктивність розсіювання  $L_{i1}$ , яка чисельно дорівнює магнітному потоку розсіювання  $\Phi_{i1}$ , зчепленому з  $i$ -м витком при протіканні по первинній обмотці струму 1 А (але має розмірність Гн);

– часткова взаємоіндуктивність розсіювання  $M_{i2}$ , яка чисельно дорівнює магнітному потоку розсіювання  $\Phi_{i2}$ , зчепленому з  $i$ -м витком при протіканні по вторинній обмотці струму 1 А;

– часткова індуктивність розсіювання  $L_{k2}$ , яка чисельно дорівнює магнітному потоку розсіювання  $\Phi_{k2}$ , зчепленому з  $k$ -м витком при протіканні по вторинній обмотці струму 1 А;

– часткова взаємоіндуктивність розсіювання  $M_{kl}$ , яка чисельно дорівнює магнітному потоку розсіювання  $\Phi_{kl}$ , зчепленому з  $k$ -м витком при протіканні по первинній обмотці струму 1 А. Слід зазначити, що при використанні для розрахунків  $L_{i1}$ ,  $M_{i2}$ ,  $L_{k2}$ ,  $M_{kl}$  значення струму в обмотках  $I$  (А), необхідно одержані результати поділити на  $I$ .

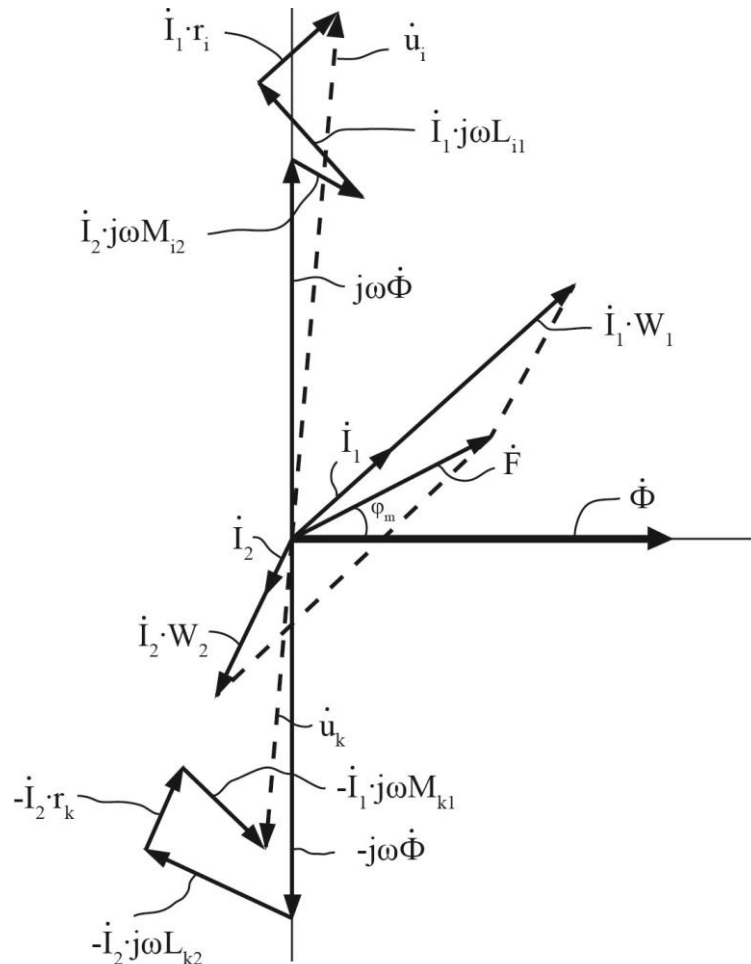


Рис. 3.5 Векторна діаграма складових напруг та струмів для одиничних витків первинної та вторинної обмоток трансформатора при переважаючому активно-індуктивному навантаженні

У відповідності до рис. 3.4 та використовуючи вирази (1.2 – 1.3, 2.13) можна записати комплексні рівняння для складових напруги на одиничних витках первинної  $\dot{u}_i$  та вторинної  $\dot{u}_k$  обмоток трансформатора:

$$\dot{u}_i = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (r_i + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot M_{i2}; \quad (3.6)$$

$$\dot{u}_k = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} - \dot{I}_2 \cdot (r_k + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1}. \quad (3.7)$$

Для виділених груп витків обмоток діаграма напруг і струмів може бути подібною до рис. 3.5 у тому випадку, якщо витки у виділених групах розташовані компактно й рівномірно, та якщо центром групи витків обрати геометричний центр фігури перерізу, контур якої визначає переріз групи витків. Координати цього центру фігури можна вважати координатами розрахункової групи витків. В цьому випадку відповідні складові векторної діаграми рис. 3.5 помножуються на кількість витків  $W_{i1}$ ,  $W_{k2}$  у виділених групах. В такому випадку можна одержати діаграму напруг і струмів для груп витків  $W_{i1}$ ,  $W_{k2}$ , у відповідності до рис. 3.6:

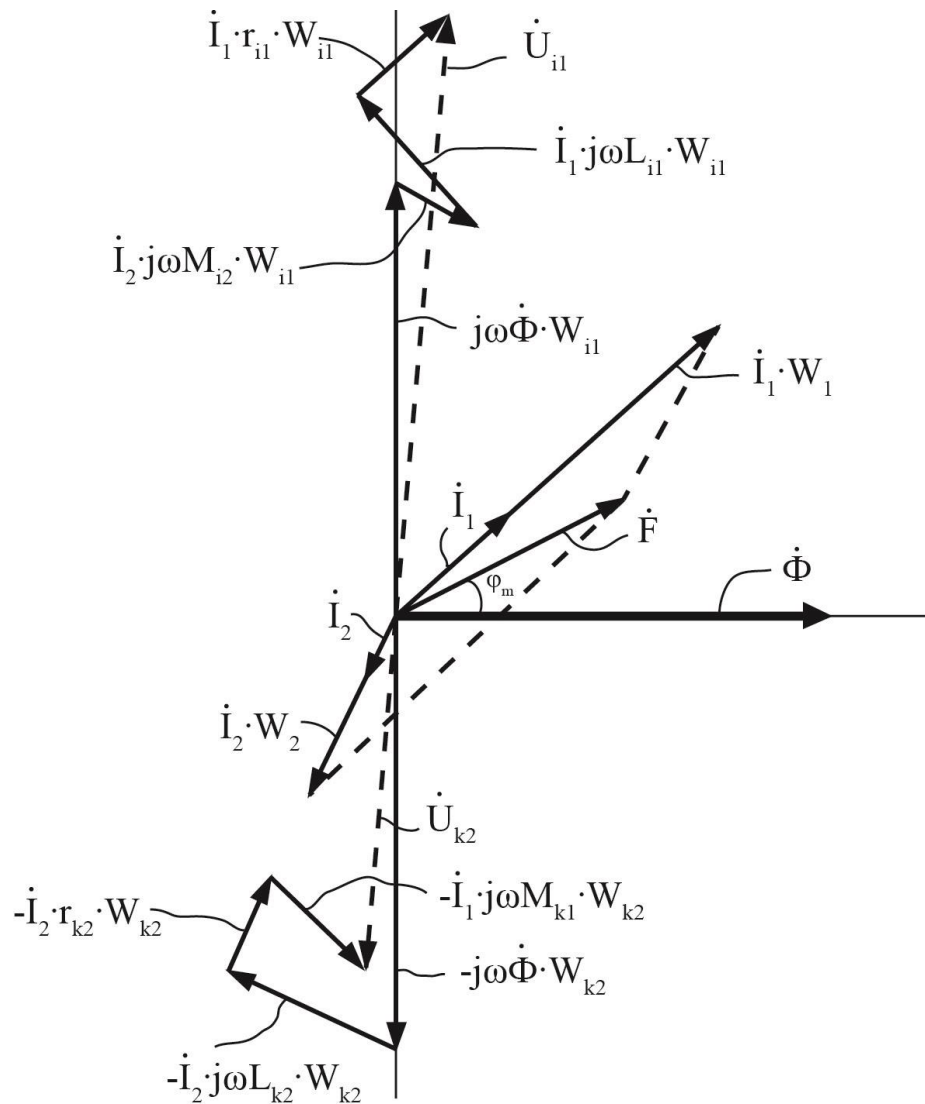


Рис. 3.6 Векторна діаграма для груп витків  $W_i$ ,  $W_k$  первинної та вторинної обмоток трансформатора

Згідно рис. 3.6, напруги груп витків визначаються за формулами:

$$\dot{U}_{i1} = W_{i1} \cdot \dot{u}_i; \quad (3.8)$$

$$\dot{U}_{k2} = W_{k2} \cdot \dot{u}_k. \quad (3.9)$$

Відповідно, рівняння (3.6, 3.7) для груп витків перетворюються до виду:

$$\dot{U}_{i1} = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_{i1} + \dot{I}_1 \cdot W_{i1} (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot M_{i2} \cdot W_{i1}; \quad (3.10)$$

$$\dot{U}_{k2} = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_{k2} - \dot{I}_2 \cdot W_{k2} (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1} \cdot W_{k2}. \quad (3.11)$$

Якщо первинну обмотку поділити на  $n$  груп витків, а вторинну обмотку поділити на  $m$  груп витків, матимемо:

$$W_1 = W_{11} + W_{21} + \dots + W_{i1} + \dots + W_{n1}; \quad (3.12)$$

$$W_2 = W_{12} + W_{22} + \dots + W_{k2} + \dots + W_{m2}. \quad (3.13)$$

Підсумовуючи рівняння (3.2 – 3.13), можемо скласти систему рівнянь для напруг і струмів груп витків обмоток та для трансформатора в цілому:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{11} + \dot{U}_{21} + \dots + \dot{U}_{i1} + \dots + \dot{U}_{n1}; \quad (3.14)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{12} + \dot{U}_{22} + \dots + \dot{U}_{k2} + \dots + \dot{U}_{m2}; \quad (3.15)$$

$$\dot{U}_{i1} = \left( j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (r_i + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot M_{i2} \right) \cdot W_{i1}; \quad (3.16)$$

$$\dot{U}_{k2} = \left( -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} - \dot{I}_2 \cdot (r_k + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1} \right) \cdot W_{k2}. \quad (3.17)$$

Перетворюючи (3.14 – 3.15), з урахуванням (3.16 – 3.17), замість (3.14 – 3.15) одержуємо:

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{11} + \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_{12}; \quad (3.18)$$

$$\dot{U}_2 = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_2 - \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_{22} - \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{21}, \quad (3.19)$$

та додатково запишемо рівняння:

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2}{\dot{R}_m}; \quad (3.20)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_H}, \quad (3.21)$$

де  $\dot{Z}_H$  – комплексний опір навантаження вторинної обмотки.

Комплексні опори  $\dot{Z}_{11}$ ,  $\dot{Z}_{12}$ ,  $\dot{Z}_{22}$ ,  $\dot{Z}_{21}$  в рівняннях (3.18 – 3.19) розраховуються за формулами:

$$\dot{Z}_{11} = \sum_1^n (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1}, \quad (3.22)$$

$$\dot{Z}_{12} = j \cdot \omega \cdot \sum_1^n M_{i2} \cdot W_{i1}, \quad (3.23)$$

$$\dot{Z}_{22} = \sum_1^m (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) \cdot W_{k2}, \quad (3.24)$$

$$\dot{Z}_{21} = j \cdot \omega \cdot \sum_1^m M_{k1} \cdot W_{k2}. \quad (3.25)$$

Загалом, система лінійних рівнянь відносно складових напруги на групах витків обмоток трансформатора  $\dot{U}_{i1}$ ,  $\dot{U}_{k2}$  та  $\dot{\Phi}$ ,  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ ,  $\dot{U}_2$  (в комплексних числах) має порядок  $n + m + 4$  (рівняння (3.16 – 3.21)) при відомих  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{R}_m$ ,  $\dot{Z}_H$ . Якщо її вирішувати відносно проєкцій комплексних величин на вісі реальних та уявних чисел, порядок системи збільшиться у 2 рази до  $2 \cdot (n + m + 4)$ .

Якщо розглянути вираз (3.22), його можна представити у вигляді:

$$\dot{Z}_{11} = \sum_1^n (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1} = \sum_1^n r_{i1} \cdot W_{i1} + \sum_1^n j \cdot \omega \cdot L_{i1} \cdot W_{i1}. \quad (3.26)$$

Вираз (3.26) має традиційне представлення  $\dot{Z}_{11} = R_1 + j \cdot \omega \cdot L_{11}$  [8], де  $R_1$  – активний опір та  $L_{11}$  – власне, індуктивність розсіювання первинної обмотки трансформатора. Якщо з визначенням  $R_1 = \sum_1^n r_{i1} \cdot W_{i1}$ , звичайно, немає питань, то з визначенням  $L_{11}$  існують різні пропозиції [13, 59]. Отже, частина виразу

(3.26)  $L_{11} = \sum_1^n L_{i1} \cdot W_{i1}$  гранично чітко визначає значення даного параметру для первинної обмотки трансформатора. Аналогічно, з (3.24) можемо записати:

$$\dot{Z}_{22} = \sum_1^m (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) \cdot W_{k2} = \sum_1^m r_{k2} \cdot W_{k2} + \sum_1^m j \cdot \omega \cdot L_{k2} \cdot W_{k2}. \quad (3.27)$$

Так само, можемо визначити  $L_{22} = \sum_1^m L_{k2} \cdot W_{k2}$ . З (3.23, 3.25) визначаємо:

$$M_{12} = \sum_1^n M_{i2} \cdot W_{i1}, \quad (3.28)$$

$$M_{21} = \sum_1^m M_{k1} \cdot W_{k2}, \quad (3.29)$$

що деталізують визначення даних параметрів [59] для обмоток трансформаторів у загальному випадку (причому, як для трансформаторів напруги, так і для випробувальних трансформаторів, а також і для силових трансформаторів).

Якщо розглядають роботу трансформатора зі значним навантаженням (силові трансформатори), згідно [80], звичайно приймають для розрахунку індуктивності розсіювання умову рівності нулю сумарної МРС  $\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2 = 0$ . При підстановці цього виразу в (3.18 – 3.19) та приведенні вторинної обмотки до первинної одержуємо рівняння:

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot \omega \cdot L'_{екв1}), \quad (3.30)$$

$$\dot{U}'_2 = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 - \dot{I}_2 \cdot (R'_2 + j \cdot \omega \cdot L'_{екв2}), \quad (3.31)$$

в яких приведені еквівалентні індуктивності розсіювання визначаються виразами:

$$L'_{екв1} = L_{11} - M'_{12}, \quad (3.32)$$

$$L'_{екв2} = L'_{22} - M'_{21}, \quad (3.33)$$

$$\text{де } R'_2 = R_2 \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2; L'_{22} = L_{22} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2; I'_2 = I_2 \cdot \frac{W_2}{W_1}; M'_{12} = M_{12} \cdot \frac{W_1}{W_2};$$

$$M'_{21} = M_{21} \cdot \frac{W_1}{W_2}.$$

Рівняння (3.30, 3.31) пояснюють традиційну схему заміщення силового трансформатора [59] з приведеними еквівалентними індуктивностями розсіювання обмоток (3.32, 3.33). Але, в загальному випадку, з урахуванням  $\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2 \neq 0$ , традиційна схема заміщення трансформатора не є дійсною.

Виконана в дисертації деталізація рівнянь трансформатора до рівня витків або груп витків обмоток в (3.6 – 3.33) відповідає традиційному представленню трансформатора в режимі «противімкнення» обмоток, який досліджується в працях вчених-класиків Петрова Г. Н. [59], Тихомирова П. М. [13], [95, Розділ 14 «Трансформаторы и автотрансформаторы»] і ін. Проте, для трансформаторів напруги, які характеризуються групою з'єднань обмоток 1/1-0 [97, 55], рівняння (3.16 – 3.21) повинні бути перетворені до системи:

$$\dot{U}_{i1} = \left( j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (r_i + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot M_{i2} \right) \cdot W_{i1}; \quad (3.34)$$

$$\dot{U}_{k2} = \left( j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} - \dot{I}_2 \cdot (r_k + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1} \right) \cdot W_{k2}; \quad (3.35)$$

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \sum_1^n (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1} - \dot{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^n M_{i2} \cdot W_{i1}; \quad (3.36)$$

$$\dot{U}_2 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_2 - \dot{I}_2 \cdot \sum_1^m (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) \cdot W_{k2} + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^m M_{k1} \cdot W_{k2}; \quad (3.37)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 - \dot{I}_2 \cdot W_2}{\dot{R}_m}; \quad (3.38)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_H}. \quad (3.39)$$

Система (3.34 – 3.39) забезпечує аналогічні (3.16 – 3.21) значення величин (за абсолютними значеннями) комплексів, але «синфазне» спрямування первинної та вторинної напруг трансформатора, що відповідає режимам однофазних трансформаторів напруги. Аналогічні рівняння наведені у монографіях А. М. Димкова з трансформаторів напруги [10, 11], але, без врахування факторів взаємних індуктивностей розсіювання (тобто, при  $M_{i2} = M_{kl} = \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} \equiv 0$ ). Слід відмітити, що у визначальній класичній праці з трансформаторів Г. Н. Петрова [59] підкреслюється, що взаємну індуктивність розсіювання обмоток необхідно також враховувати, як і їх індуктивність розсіювання.

Якщо ж розглядати вимірювальні трансформатори напруги, які працюють в режимах холостого ходу, коли  $I_2 = 0$ , можемо записати рівняння (3.36, 3.37) у вигляді:

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot R_1 + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot L_{11}, \quad (3.40)$$

$$\dot{U}_2 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_2 + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot M_{21}. \quad (3.41)$$

Якщо у (3.41) привести вторинну обмотку до первинної і визначити з (3.41)  $j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 = \dot{U}'_2 - \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot M'_{21}$  та підставити це значення в (3.40), одержимо:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_2 - \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot M'_{21} + \dot{I}_1 \cdot R_1 + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot L_{11} = \dot{U}'_2 + \dot{I}_1 \cdot R_1 + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot (L_{11} - M'_{21}),$$

звідки слідує:

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 \cdot R_1 - \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot L'_{екв1}, \quad (3.42)$$

де приведена еквівалентна індуктивність розсіювання для трансформатора напруги визначається виразом  $L'_{екв1} = L_{11} - M'_{21}$ , та подібно розглядається в дисертації у Розділі 2.1.

Як показано в [98], рівняння (3.34 – 3.39) використаємо для побудови системи, що описує режим автотрансформатора напруги, вихідна частина обмотки якого навантажена вольтметром (або приладом порівняння) з

опором навантаження  $\dot{Z}_V$  (звичайно,  $> 10^4$  Ом). Виділимо цю частину обмотки з групами витків  $s = 1, 2 \dots p$  та позначимо її як обмотку 3 (на відміну від обмотки 2 у рівняннях (3.34 – 3.35)). Тоді решта обмотки 1 (позначимо її як обмотку 1) містить групи витків з нумерацією  $i = p+1, p+2, \dots n$  (всього  $n - p$ ). Оскільки струм  $I_3$  протікає в низьковольтній частині обмотки, приймаємо для нього такий же позитивний напрям, як і для  $I_1$ , тоді рівняння (3.34 – 3.39) перетворюються до виду:

$$\dot{U}_{i1} = \left( j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (R_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_3 \cdot M_{i3} \right) \cdot W_{i1}; \quad (3.43)$$

$$\dot{U}_{s3} = \left( j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_3 \cdot (R_{s3} + j \cdot \omega \cdot L_{s3}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{s1} \right) \cdot W_{s3}; \quad (3.44)$$

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{11} + \dot{I}_3 \cdot \dot{Z}_{13}; \quad (3.45)$$

$$\dot{U}_3 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_3 + \dot{I}_3 \cdot \dot{Z}_{33} + \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{31}; \quad (3.46)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_3 \cdot W_3}{R_m}; \quad (3.47)$$

$$\dot{I}_{3H} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{Z}_V}; \quad (3.48)$$

$$\dot{I}_{3H} + \dot{I}_3 = \dot{I}_1; \quad (3.49)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_3 = \dot{U}_{ex}, \quad (3.50)$$

де:

$L_{i1}$  – часткова індуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання  $\Phi_{i1}$ , зчепленому з  $i$ -м витком при протіканні по обмотці 1 струму 1 А;

$M_{i3}$  – часткова взаємоіндуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання,  $\Phi_{i3}$ , зчепленому з  $i$ -м витком при протіканні по обмотці 3 струму 1 А;

$L_{s3}$  – часткова індуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання,  $\Phi_{s3}$ , зчепленому з  $s$ -м витком при протіканні по обмотці 3 струму 1 А;

$M_{s1}$  – часткова взаємодуктивність розсіювання, яка дорівнює магнітному потоку розсіювання,  $\Phi_{s1}$ , зчепленому з  $s$ -м витком при протіканні по обмотці 1 струму 1 А;

$W_3 = W_{13} + W_{23} + \dots + W_{p3}$  (кількість витків вихідної частини обмотки АТН, тобто, обмотки 3);

$W_1 = W_{(p+1)1} + W_{(p+2)1} + \dots + W_{n1}$  (кількість витків вхідної частини обмотки АТН, тобто, обмотки 1);

$$\dot{Z}_{11} = \sum_{i=p+1}^n (R_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1} ;$$

$$\dot{Z}_{13} = j \cdot \omega \cdot \sum_{i=p+1}^n M_{i3} \cdot W_{i1} ;$$

$$\dot{Z}_{33} = \sum_{s=1}^p (R_{s3} + j \cdot \omega \cdot L_{s3}) \cdot W_{s3} ;$$

$$\dot{Z}_{31} = j \cdot \omega \cdot \sum_{s=1}^p M_{s1} \cdot W_{s3} ;$$

$\dot{U}_{\text{вх}}$  – вхідна, задавана, відома напруга АТН;

$\dot{I}_{3н}$  – струм у навантаженні вихідної частини обмотки АТН;

$\dot{I}_1, \dot{I}_3$  – струми у вхідній та вихідній частинах обмотки високовольтного автотрансформатора напруги.

Система рівнянь (3.43 – 3.50), дозволяє знаходити розподілення напруги в обмотці високовольтного АТН в загальному випадку його навантаження. При цьому, вплив ємнісних струмів може враховуватись як допоміжне мале збурення по відношенню до параметрів, визначених за системою (3.43 – 3.50) (Розділ 4.2).

У випадку нехтування впливом навантаження АТН ( $\dot{Z}_V \rightarrow \infty$ ), розподілення напруги у обмотці автотрансформатора відбувається за сумуванням векторів  $\dot{U}_i$  (за рис. 2.10) для кожного витка обмотки (або групи її витків). При цьому, оскільки діаметр проводу, звичайно, обирається з умов механічної міцності при намотуванні (тобто, є завідомо збільшеним), розподілення напруги по витках обмотки АТН відбувається, в основному, за впливом векторів  $-EPC_i$  та індуктивності розсіювання кожного з витків. Тоді, згідно рис. 2.10, сумарна напруга всієї обмотки АТН:

$$U_{\Sigma_{ex}} \cdot = \sum_{i=1}^{W_1} \left( \dot{I}_0 \cdot j \cdot \omega \cdot Ls_i + (-EPC_i) \right), \text{ де } W_1 - \text{загальна кількість витків у}$$

обмотці;  $Xs_i = \omega \cdot Ls_i$ , де  $Ls_i$  – часткова індуктивність розсіювання, що дорівнює потоку розсіювання, зчепленому з  $i$ -витком при протіканні по обмотці струму 1А;  $EPC_i$  – індукована основним магнітним потоком електрорушійна сила, що є однаковою для всіх витків. Для вихідної частини обмотки АТН з кількістю витків  $W_2$  будемо, аналогічно, мати:

$$U_{\Sigma_{ex}} \cdot = \sum_{i=1}^{W_2} \left( \dot{I}_0 \cdot j \cdot \omega \cdot Ls_i + (-EPC_i) \right).$$

Визначаючи

відношення

$$\frac{U_{\Sigma_{ex}} \cdot}{U_{\Sigma_{ex}} \cdot} = \frac{\dot{I}_0 \cdot j \cdot \sum_{i=1}^{W_1} \omega \cdot Ls_i + W_1 \cdot (-EPC_i)}{\dot{I}_0 \cdot j \cdot \sum_{i=1}^{W_2} \omega \cdot Ls_i + W_2 \cdot (-EPC_i)} = \frac{W_1 \cdot \left( \frac{1}{W_1} \cdot \dot{I}_0 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{W_1} Ls_i + (-EPC_i) \right)}{W_2 \cdot \left( \frac{1}{W_2} \cdot \dot{I}_0 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_{i=1}^{W_2} Ls_i + (-EPC_i) \right)},$$

одержимо, що основною визначальною умовою високоточного масштабного перетворення напруги в АТН буде рівність  $\frac{1}{W_1} \cdot \sum_{i=1}^{W_1} Ls_i = \frac{1}{W_2} \cdot \sum_{i=1}^{W_2} Ls_i$ , або

$$\frac{1}{W_1} \cdot \sum_{i=1}^{W_1} Ls_i - \frac{1}{W_2} \cdot \sum_{i=1}^{W_2} Ls_i = \frac{1}{W_1} \cdot \left( \sum_{i=1}^{W_1} Ls_i - \frac{W_1}{W_2} \cdot \sum_{i=1}^{W_2} Ls_i \right) = \frac{1}{W_1} \cdot Ls'_{екв} = 0, \text{ де } Ls'_{екв} -$$

приведена еквівалентна індуктивність розсіювання автотрансформатора напруги за (2.3), (2.10), (2.13).

Отже, визначальною умовою високоякісного масштабного перетворення напруги, як у автотрансформаторі напруги, так і у трансформаторі напруги (за режиму холостого ходу) буде умова рівності нулю приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання  $Ls'_{екв} = 0$ , яка визначається за формулами (2.3), (2.10), (2.13).

Слід відзначити, що з узагальненої системи рівнянь (3.14 – 3.21) та її перетворень одержуються, як часткові випадки, раніше відомі рівняння для силових трансформаторів та трансформаторів напруги [10, 13, 59].

### **3.4 Коригування характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів з «вимірювальною обмоткою»**

В результаті проведеного огляду та обмірів активної частини ИОМ-100/25 було визначено, що високовольтна обмотка випробувального трансформатора виконана 8 котушками, розташування яких по відношенню до обмотки НН створює суттєво нерівномірний розподіл потокозчеплень розсіювання по групах витків обмотки ВН. Це означає, що середнє питоме (тобто, визначене для одного витка обмотки АТН) приведенє потокозчеплення розсіювання для витків «вимірювальної обмотки» може суттєво відрізнитись від «середнього» потокозчеплення розсіювання для витків всієї високовольтної обмотки.

Розглянемо вісесиметричну модель активної частини високовольтного випробувального трансформатора у циліндричній системі координат за рис. 3.7.

Оскільки до «вимірювальної обмотки» ИОМ-100/25 необхідно підключати низьковольтні вимірювальні прилади, єдине місце, в якому вона може розташовуватись – це початок високовольтної обмотки від низьковольтного відводу. В цьому випадку витки «вимірювальної обмотки» (яка, одночасно, є частиною всієї високовольтної обмотки) розташовуються в зовнішній частині першої котушки високовольтної вторинної обмотки (за рис. 3.7). Котушки високовольтної обмотки розташовуються у відповідності

до [99] таким чином, щоб забезпечити зменшення напруженості електричного поля в конструкції активної частини трансформатора. На рис. 3.7 не показані ізоляційні конструкції в активній частині трансформатора, оскільки дана модель необхідна для створення картини магнітного поля та визначення потоків розсіювання його обмоток.



Рис. 3.7 Вісесиметрична модель активної частини високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з «вимірювальною обмоткою» у циліндричній системі координат

Для з'ясування причин нерівномірності розподілу магнітних потоків розсіювання, які охоплюють певні витки або групи витків, частково або повністю проходячи у немагнітному середовищі ізоляції або витків обмотки, можна змоделювати активну частину досліджуваного високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з «вимірювальною обмоткою» за спрощеною вісесиметричною моделлю у циліндричній системі координат, наприклад, в програмному пакеті Agros 2D [73] (спрощеність

моделі стосується того, що переважаючим у даному випадку приймається «стрижньове» розсіювання, яке, звичайно, обумовлює  $\sim 90\%$  значення параметрів розсіювання обмоток, Розділ 2).

Спрощена модель для розрахунку в програмному пакеті Agros 2D відповідає зображеному на рис. 3.7, з урахуванням фактичних геометричних розмірів елементів активної частини ИОМ-100/25 (Розділ 4).

Якщо розрахувати в програмному пакеті Agros 2D значення магнітних потоків, зчеплених з відповідними групами витків первинної та вторинної обмоток моделі ИОМ-100/25, та одержати за допомогою виразів (2.13, 3.26 – 3.29) відповідні значення власних та взаємних індуктивностей розсіювання для цих груп витків (враховуючи й активні складові спаду напруги, які розраховуються за геометрією витків, діаметром та матеріалом проводу), можна за допомогою системи рівнянь (3.34 – 3.39) одержати значення комплексного струму у вторинній обмотці ИОМ-100/25 та комплексної напруги на витках вимірювальної обмотки й на виході обмотки ВН цього трансформатора (в цілому).

Оскільки за результатами експерименту, у відповідності до [93], при ємнісному навантаженні ИОМ-100/25 були одержані діючі значення напруги на «вимірювальній обмотці», які майже на 12 відсотків були більшими, ніж відповідні їм значення напруги на холостому ході (Розділ 3.1), логічно припустити, що подібна ситуація з розподілом напруги по високовольтній обмотці ИОМ-100/25 має аналогічне пояснення представленої на векторній діаграмі рис. 3.4 а). Це означає, що відносно «надмірним» є потягозчеплення розсіювання вихідної частини автотрансформаторної обмотки ВН («вимірювальної обмотки»), тобто, потоки розсіювання викликають на «вимірювальній обмотці» більший (по модулю) відносний спад напруги, ніж на всій обмотці ВН ИОМ-100/25 (мається на увазі усереднення величин по всій обмотці ВН та визначення їх для 1 витка  $i$ , аналогічно, те ж саме для приведенного до всієї обмотки потоку розсіювання «вимірювальної обмотки»).

Однак, спад напруги на «вимірювальній обмотці» ИОМ-100/25 (за рахунок «надмірної» складової індуктивності розсіювання) можна зменшити послідовним приєднанням до неї коригуючої ємності [100]. В такому випадку рівняння системи (3.35) для «вимірювальної обмотки» ИОМ-100/25 з коригуючою ємністю набуває вигляду:

$$\dot{U}_{k2} = \left( j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} - \dot{I}_2 \cdot (r_k + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1} \right) \cdot W_{k2} + \dot{I}_2 \cdot \frac{j}{\omega \cdot C1}, \quad (3.51)$$

де  $C1$  – коригуюча ємність,  $\Phi$ , (приєднання якої позначено  $C1$  на рис. 3.2). Як слідує з (3.51), послідовне приєднання до «вимірювальної обмотки» коригуючої ємності  $C1$  дозволяє зменшити вплив її «надмірної» індуктивності розсіювання.

Виконання трансформатора ИОМ-100/25 з «вимірювальною обмоткою» має ізолювані відводи високовольтної обмотки та «вимірювальної обмотки», що дозволяє розташувати та приєднати необхідну коригуючу ємність на кришці баку трансформатора без необхідності його розгерметизації та будь-яких конструктивних змін. Метод компенсації «надлишкового» спаду напруги на вихідній частині високовольтної обмотки («вимірювальній обмотці») високовольтного випробувального трансформатора за допомогою коригуючої ємності відображений у патенті України на винахід [100] у 2013 р.

Слід також зазначити, що визначення експериментальним шляхом (наприклад, за допомогою методу ватметра [101]) зі сторони низьковольтної обмотки характеристик магнітопроводу зібраного високовольтного випробувального (або вимірювального) трансформатора є некоректним, оскільки для трансформаторів зі значною кількістю витків високовольтної обмотки суттєвий вклад у експериментально визначений струм та параметри холостого ходу вносять ємнісні складові струмів між заземленими частинами конструкції та витками, що перебувають під потенціалом. Особливо це стосується високовольтних екранів, без яких практично не виконуються конструкції високовольтних трансформаторів. І, якщо для силового трансформатора в нормальному режимі роботи ці ємнісні складові струмів

фактично не впливають на його характеристики, то для високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги, режими роботи яких наближені до режиму холостого ходу, вплив ємнісного «навантаження» в режимі холостого ходу може ставати суттєвим. Саме тому, для виконання розрахунків за матеріалами Розділу 3 даної роботи, доцільно характеристики магнітопроводів трансформаторів визначати або теоретичними розрахунками (наприклад, згідно [13]), або експериментально – до операції збирання магнітопроводу з обмотками – шляхом визначення (для шихтованого магнітопроводу без обмоток) повної та активної складових потужності втрат холостого ходу методом ватметра [101], або ж визначати комплексний магнітний опір магнітопроводу за методиками виробника та властивостями матеріалу магнітопроводу, що містяться, наприклад, в [102].

Результати 3 розділу дисертаційної роботи опубліковані в статтях [57, 93, 96, 98, 115] та у патенті України на винахід [100].

### **3.5 Висновки по розділу 3**

3.5.1 Вперше визначено особливості режимів високовольтних випробувальних трансформаторів, в яких відбувається комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення високої напруги, при якому з'являються аномально великі похибки вимірювання (з використанням вихідної частини високовольтної обмотки) високої випробувальної напруги при суттєвому ємнісному навантаженні.

3.5.2 Вперше розроблено математичну модель високовольтного автотрансформатора напруги, в якій у систему рівнянь уведено використання часткових власних та взаємних індуктивностей розсіювання, що, на відміну від існуючих моделей, дозволяє визначати розподіл напруги по окремих витках (або групах витків) обмотки. Часткові випадки запропонованої системи рівнянь співпадають з раніше відомими теоретичними положеннями щодо трансформаторів.

3.5.3 Вперше запропоновано метод коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора з використанням автотрансформаторного перетворення у високовольтній обмотці шляхом компенсації «надлишкової» індуктивності розсіювання вимірювальної обмотки за допомогою послідовного приєднання до її кола коригуючої ємності, новизну якого підтверджено патентом України на винахід «Високовольтний випробувальний трансформатор напруги» (Патент України № 102864: МПК H01F 38/20, H01F 38/24 / Бржезицький В. О., Гаран Я. О.; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № 201103746; заявл. 28.03.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 4 с.).

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ

#### 4.1 Порівняння результатів розрахунків індуктивності розсіювання за запропонованими формулами з експериментальними даними

Для перевірки адекватності виведених формул та запропонованого удосконаленого методу розрахунку індуктивності розсіювання за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів для вирішення задач магнітного поля, було проведено порівняння результатів чисельних розрахунків індуктивності розсіювання з результатами експериментальних досліджень індуктивності розсіювання, викладеними в [45].

Розріз активної частини трансформатора, що досліджувався в [45], представлений на рис. 4.1:

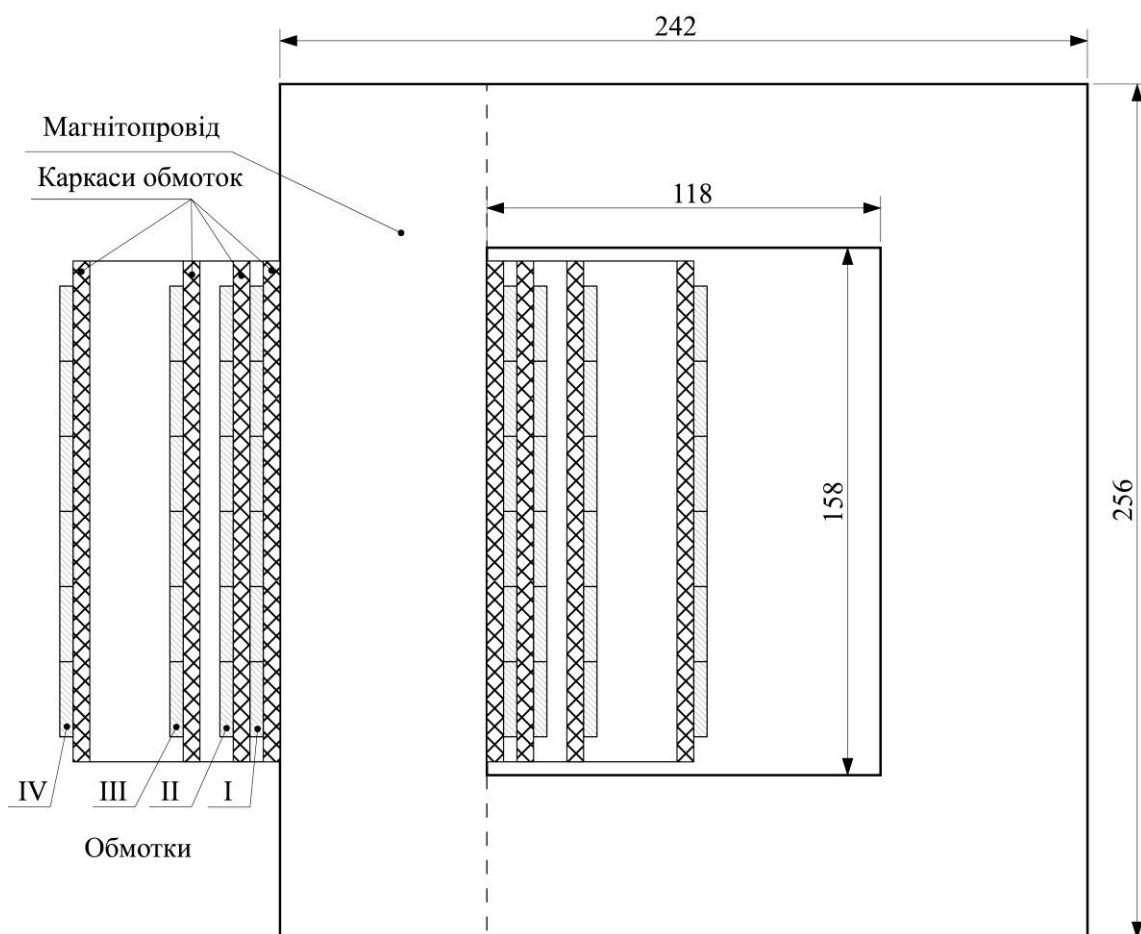


Рис. 4.1 Активна частина досліджуваного трансформатора [45] у перерізі

Для експериментального визначення індуктивності розсіювання обмоток трансформатора в експерименті [45] на стрижень осердя трансформатора за рис. 4.1 були встановлені 4 бакелітові циліндричні каркаси із зовнішніми діаметрами 72, 90, 120 та 186 мм. На кожному такому бакелітовому каркасі були виконані потрійним провідником секційовані обмотки (в один шар), кожна секція яких складалась з 13 витків. Загальна кількість секцій на кожному каркасі дорівнювала 6. При експериментальному дослідженні індуктивності розсіювання обмоток (шляхом їх зустрічного включення) використовувались обмотки з загальною кількістю 26, 52 та 78 витків з симетричним розташуванням на каркасах (відносно середини стрижня, рис. 4.1).

Відповідно до схеми рис. 4.2, на «генеруючу»  $i$ -обмотку подавався струм частоти 50 Гц з середньоквадратичним значенням до 2 А:

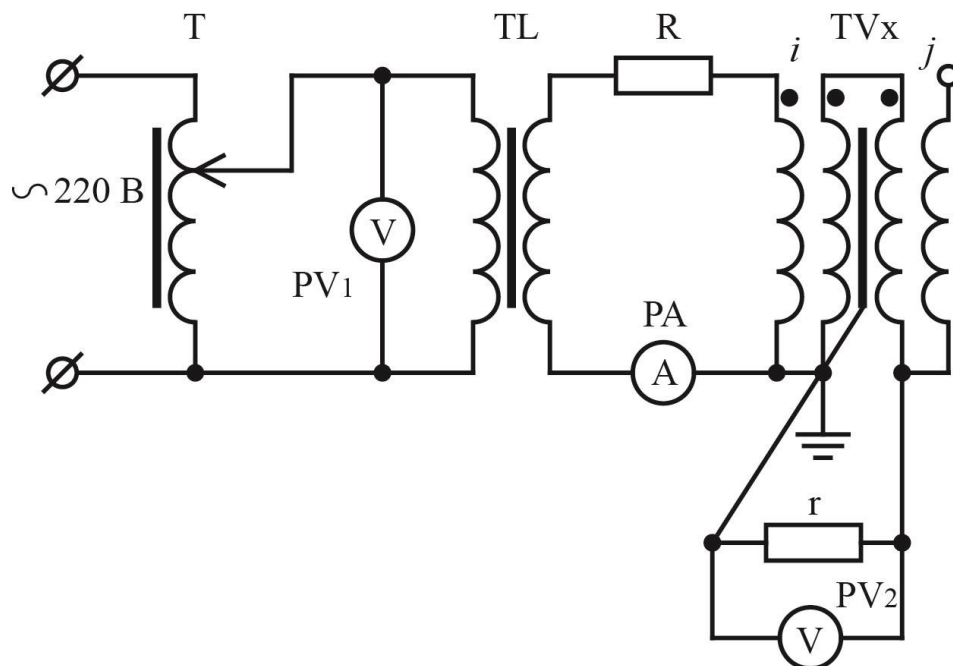


Рис. 4.2 Принципова схема експерименту дослідження індуктивності розсіювання обмоток трансформатора [45].

За допомогою реєстрування струму амперметра  $PA$  та напруги вольтметра  $PV_2$  експериментально визначалась різниця  $L_i - M_{ji}$ , яка відповідає

відносному значенню приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання для пари обмоток  $i - j$  за формулою [45]:

$$L_i^* - M_{ji}^* = \frac{U_{PV_2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{PA} \cdot W^2}, \quad (4.1)$$

де  $U_{PV_2}$  – покази вольтметра  $PV_2$ ;  $I_{PA}$  – покази амперметра  $PA$ ;  $f$  – частота напруги (50 Гц);  $W$  – кількість витків досліджуваних ( для однієї з пар) обмоток\*.

Реальна конструкція досліджуваного трансформатора була представлена у вигляді математичної моделі в програмному пакеті Comsol Multiphysics, у відповідності до рис. 4.3 («стрижнева» модель):

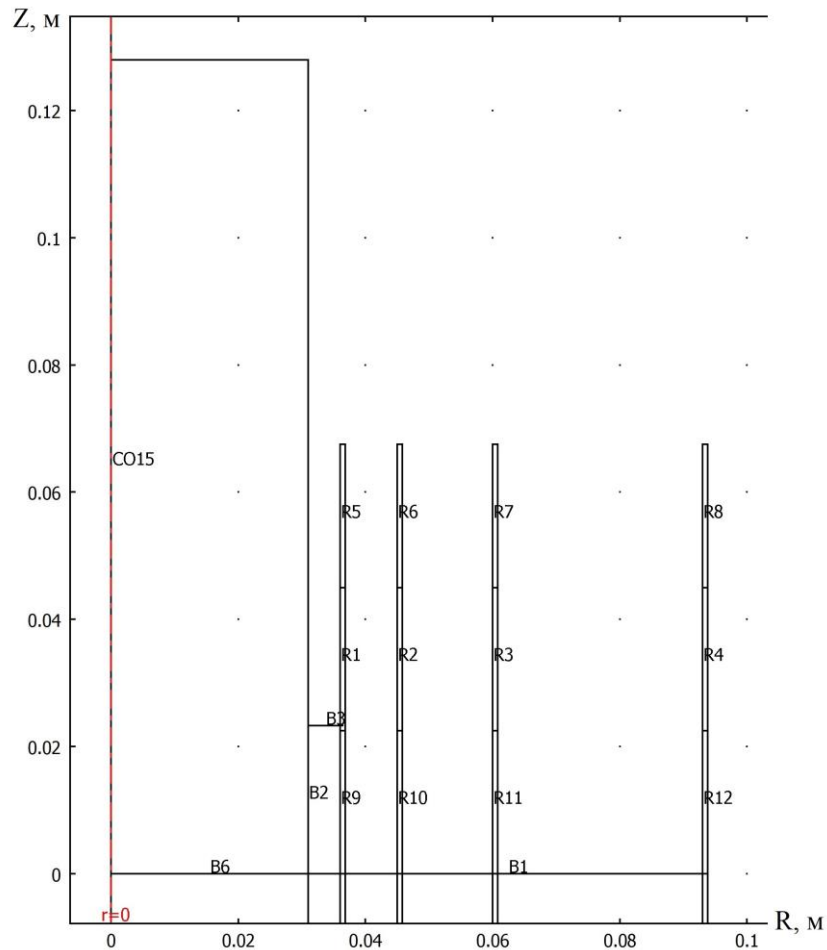


Рис. 4.3 Модель активної частини досліджуваного трансформатора в програмному пакеті Comsol Multiphysics («стрижнева» модель)

\* Слід відзначити, що значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання за формулою (4.1) з використанням множника  $W^2$  є нормованим до кількості витків у обмотках, що дорівнює 1.

Модель за рис. 4.3 виконана відповідно до матеріалів, викладених у Розділі 2.2 даної роботи. Комерційне ПЗ Comsol Multiphysics обрано з метою одержання найбільш точних результатів розрахунку, оскільки математичний апарат цього ПЗ дозволяє виконувати тривимірні розрахунки, має більш гнучку систему настроювання та перевірене роками використання. Однак, слід зазначити, що використання програмного пакету Agros2D при високій щільності сітки скінчених елементів дозволяє одержувати аналогічні результати, які відрізняються від результатів, одержаних в Comsol Multiphysics, на 0,1 – 0,2 %.

Для вирішення стаціонарної задачі розподілення магнітного поля з використанням моделі за рис. 4.3 в програмному пакеті Comsol Multiphysics використовувалось рівняння магнітного поля [38]:  $\nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu^{-1} \cdot \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}$ , де  $\nabla$  – диференціальний оператор Гамільтона (оператор набла);  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  – відносна магнітна проникність;  $\vec{A}$  – векторний магнітний потенціал, Вб/м;  $\vec{J}$  – вектор густини сторонніх струмів, А/м<sup>2</sup>. Густина струму в елементах R1 – R12 моделі за рис. 4.3 встановлювалась за результатами експерименту [45] та задавалась як кутова компонента вектора  $J_\varphi$ . Для сегментів, в яких не протікав струм, генеруючий магнітне поле згідно умов експерименту, густина струму встановлювалась нульовою. Відносна магнітна проникність осердя (елемент CO15 за рис. 4.3) встановлювалась рівною  $\mu = 5000$ , відносні магнітні проникності повітря та міді приймалися рівними одиниці. Діелектричні каркаси обмоток в моделі, призначеній для розрахунку магнітного поля, відсутні внаслідок несуттєвого впливу на розподіл магнітного поля. На зовнішніх границях області розрахунку поля встановлювались умови «магнітної ізоляції», тобто  $A_\varphi = 0$ , границя  $r = 0$  позначалась як вісь симетрії. Всі інші внутрішні границі елементів моделі позначались умовою неперервності:  $\vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = 0$ , де  $\vec{n}$  – вектор нормалі до границі розподілу двох середовищ;  $\vec{H}_1$ ,  $\vec{H}_2$  – вектори напруженості магнітного поля в граничних середовищах. Згенерована програмою сітка

скінчених елементів містила 220880 трикутних елементів. Вирішення системи рівнянь виконувалось за алгоритмом прямого вирішування (UMFPACK) з відносною похибкою  $1 \cdot 10^{-6}$ .

В якості порівняння, аналогічна модель за аналогічними умовами була побудована та розрахована в програмному середовищі Agros2D. Відмінності в результатах розрахунків у програмних пакетах Agros2D та Comsol Multiphysics склали менше ніж 0,1%.

В результаті розрахунків, виконаних в програмному пакеті Agros2D, для побудованої аналогічним чином вісесиметричної математичної моделі у циліндричній системі координат були одержані, у відповідності до формул (2.6 – 2.19), значення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання для різних комбінацій обмоток трансформатора.

В таблиці 4.1 наведені дані відхилень розрахованих значень приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання для різних пар обмоток моделі досліджуваного трансформатора у відсотках по відношенню до експериментально одержаних значень. Результати розбиті по групах: наприклад, позначення групи I-III означає, що досліджується пара обмоток, в якій «генеруючою» обмоткою (тобто, тією, по якій пропущений струм) є перша обмотка (розташована на найближчому до стрижня діелектричному каркасі), а «сприймаючою» парою обмоток є перша та третя обмотка, з'єднані за схемою рис. 4.2.

Для кожної групи досліджувались обмотки з різною кількістю витків, а отже, з різною висотою намотки витків на каркасі (симетрично посередині стрижня): кількості витків 26 відповідає висота намотки витків 45 мм; кількості витків 52 відповідає висота намотки витків 90 мм; кількості витків 78 відповідає висота намотки витків 135 мм. Були одержані розрахункові результати похибок визначення індуктивності розсіювання для різних комбінацій обмоток з різною кількістю витків і висотою шляхом розрахунку за спрощеною моделлю (лише «стрижнева» модель, у відповідності до рис.

4.2) та за моделлю, яка враховує ярмове розсіювання (комплексна: «стрижнева + капсульна» модель за рис. 2.5, 2.8 та формулами (2.16 – 2.19)).

Таблиця 4.1

Похибки розрахункового визначення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання по відношенню до експериментально одержаних значень для різних комбінацій обмоток досліджуваного трансформатора

Комбінація обмоток	Висота обмоток, мм	Похибка розрахунку індуктивності розсіювання, %	
		«стрижнева» модель	комплексна модель
I-II	45	-1,9227	-8,0472
	90	7,8500	-8,7113
	135	6,6881	-9,7427
II-I	45	-20,8202	-9,8785
	90	-15,6137	9,3383
	135	-30,7196	-0,2187
I-III	45	1,1329	-6,2539
	90	2,7759	-8,9260
	135	8,2327	-8,4092
III-I	45	-12,5805	-5,8249
	90	-18,5832	-6,4959
	135	-24,7609	-7,9416
I-IV	45	6,4213	-3,2220
	90	6,1495	-7,1047
	135	6,9264	-9,8598
IV-I	45	-7,4636	-3,1953
	90	-10,1321	-3,5061
	135	-12,7962	-3,9329
II-III	45	4,2173	-2,1465
	90	10,7090	-2,5480
	135	12,6825	-1,8711
III-II	45	-6,5599	-0,9873
	90	-17,6440	-4,7947
	135	-18,9517	-4,6800
II-IV	45	6,9576	-1,3208
	90	9,8504	-2,7740
	135	7,5899	-6,7330
IV-II	45	-6,2379	-2,4119
	90	-8,7614	-2,3025
	135	-10,7114	-2,6427
III-IV	45	8,3273	2,3634
	90	9,3009	0,4185
	135	7,7850	-3,4138
IV-III	45	-4,0654	-0,9358
	90	-4,9098	0,1619
	135	-5,1605	1,7350

Оскільки обмотки в експериментальній моделі були виконані одношаровими, точка А на рис. 2.5 відносилась, безпосередньо, до циліндричної поверхні обмотки.

Для оцінки точності розрахунків за «стрижневою» та комплексною моделями також було виконано моделювання досліджуваного трансформатора в програмному пакеті Comsol Multiphysics у тривимірній системі координат. Оскільки тривимірні розрахунки з великою точністю є дуже тривалими за часом, було прийнято рішення виконувати розрахунки за тривимірною моделлю з похибкою розрахунків картини магнітного поля, яка була б не гірше 1% (внутрішня похибка ПЗ, яка задається на етапі формування моделі, сітки скінченних елементів, параметрів вирішення системи рівнянь). Оскільки обсяг розрахунків був дуже великим, було прийнято рішення для перевірки точності обчислень за обраними моделями виконати розрахунки індуктивності розсіювання за тривимірною моделлю лише для комбінацій обмоток висотою 45 мм. Результати порівняння розрахунків індуктивності розсіювання за тривимірною моделлю з результатами розрахунків за «стрижневою» й комплексною моделями наведені у таблиці 4.2.

Результати, представлені в табл. 4.1 свідчать про більш точне співпадіння результатів теоретичного розрахунку з результатами експерименту при врахуванні в розрахунках стрижневого та ярмового розсіювання за комплексною моделлю.

Результати, представлені в табл. 4.2 також свідчать про більш точну відповідність результатів комплексної моделі тривимірній моделі, що дає можливість використовувати запропоновану комплексну модель активної частини трансформатора (автотрансформатора) для інженерних розрахунків параметрів розсіювання. Але, якщо є допустимою похибка визначення параметрів розсіювання  $\sim 10\ldots 15\%$ , достатньо використовувати лише «стрижневу» модель.

Таблиця 4.2

Похибка визначення приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання за «стрижневою» та комплексною моделями у відсотках від значення, розрахованого за тривимірною моделлю, для різних комбінацій обмоток висотою 45 мм досліджуваного трансформатора

Комбінація обмоток	Похибка розрахунку індуктивності розсіювання, %	
	«стрижнева» модель	комплексна модель
I-II	4,7985	-1,7458
II-I	-8,9791	3,5989
I-III	5,2989	-2,3922
III-I	-8,3975	-1,3187
I-IV	5,2510	-4,2862
IV-I	-6,7167	-2,4138
II-III	6,8248	0,3017
III-II	-6,0631	-0,4608
II-IV	5,9962	-2,2078
IV-II	-5,4335	-1,5747
III-IV	5,9832	0,1483
IV-III	-3,5229	-0,3756

Детальний аналіз таблиць 4.1, 4.2 показує, що при проведених розрахунках найбільші похибки виникають при розрахунках індуктивностей розсіювання для обмоток, одна з яких розташована близько до стрижня. Це може бути пов'язано як з відмінністю перерізу реального стрижня магнітопроводу від кругового, яке використовується для вісесиметричних моделей, так і з суттєвим впливом «ярмової» складової розсіювання на витки обмоток, що розташовані ближче до ярем. Визначення цих факторів, які впливають на точність розрахунку потоків розсіювання активних частин автотрансформаторів (трансформаторів) напруги, які розраховуються за вісесиметричними моделями, може бути предметом подальших досліджень.

## **4.2 Розрахунок характеристик масштабного перетворення напруги високовольтного прецизійного автотрансформатора напруги**

Виконані в Розділі 2 даної роботи теоретичні дослідження дозволяють розраховувати характеристики високовольтних вимірювальних автотрансформаторів напруги на етапі проектування.

У 2012 році корпорацією «Науковий парк «Київська політехніка» на замовлення Державного підприємства «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт») виконувалась науково-дослідна робота (НДР) «Зменшення масогабаритних показників трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН, розширення робочого діапазону та зменшення похибок трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН» (КМПЕН – коефіцієнт масштабного перетворення електричної напруги) за номером Державної реєстрації 0113U008072, відповідальним виконавцем якої був здобувач. Метою даної роботи були розробка та виготовлення високовольтного масштабного перетворювача напруги електромагнітного типу на клас напруг 10 кВ, який повинен був використовуватись у складі вторинного еталону високої напруги класу 110 кВ, що належить ДП «Укрметртестстандарт».

За вимогою ДП «Укрметртестстандарт», розроблений та виготовлений масштабний перетворювач високої напруги повинен забезпечувати значення похибки напруги масштабного перетворення високої напруги частоти 50 Гц в режимах 80%, 150% (!) та 190% (!!)) від номінальної напруги не більше ніж 0,05% та кутову похибку в цих режимах не більше 1 кутової хвилини. За вимогою Замовника НДР необхідно було поєднати в одному пристрої можливості одержання 9 різних масштабних коефіцієнтів перетворення високої напруги, які давали б змогу одержувати номінальні вторинні напруги 100 В;  $100/\sqrt{3}$  В та 100:3 В при номінальних первинних напругах 3 кВ; 6 кВ; 10 кВ. За вимогою замовника необхідно також було максимально зменшити масогабаритні показники цього масштабного перетворювача високої напруги.

Спочатку була розглянута можливість виконання замовленого масштабного перетворювача у вигляді трансформатора напруги, однак, попередні розрахунки показали, що трансформатор з такою кількістю первинних та вторинних обмоток буде мати значні габарити та масу. Виконання високовольтного масштабного перетворювача напруги за типом широкосмугового подільника напруги хоча й забезпечувало б кращі частотні та масогабаритні показники, однак значно здорожчувало б його виготовлення внаслідок необхідності використання дороговартісних високостабільних зосереджених елементів (резисторів та конденсаторів). Тому було прийнято рішення про виготовлення високовольтного багатодіапазонного прецизійного масштабного перетворювача високої напруги класу 10 кВ у вигляді автотрансформатора напруги.

Для виготовлення активної частини автотрансформатора напруги було прийнято рішення використати магнітопровід від трансформатора И-50, а також використати частину його корпусу для розміщення в ньому активної частини автотрансформатора напруги.

Для обчислення стаціонарних електричних та магнітних полів чисельними методами було вирішено використовувати програмний пакет Agros2D [73], який дозволяє створювати двовимірні та вісесиметричні моделі, задавати для них відповідні фізичні властивості складових та граничні умови, будувати сітку скінчених елементів, виконувати чисельні розрахунки та виконувати візуалізацію одержаних результатів. В [103 – 105] розглянуті можливості цього програмного пакету, в тому числі, можливості моделювання магнітних полів, при чому, серед авторів статті є розробники цього програмного забезпечення. Можливості цього ПЗ цілком задовольняють вимогам до ПЗ, викладеним у Розділі 2 даної роботи, необхідним для розрахунку магнітних потоків розсіювання у вісесиметричних моделях. Значною перевагою цього ПЗ є те, що воно є безкоштовним (за умови дотримання ліцензійної угоди). За необхідності, результати розрахунків, одержані за допомогою Agros2D можна перевірити

за допомогою однієї з комерційних програм, які дозволяють виконувати аналогічні розрахунки за допомогою методу скінченних елементів, наприклад, Comsol Multiphysics [71].

Двострижньова магнітна система створюваного вимірювального автотрансформатора мала розміри, визначені на рис. 4.4.

За стандартизованою методикою ГОСТ 3484.1-88 [106] були виконані експериментальні дослідження параметрів холостого ходу та одержані розрахункові значення індукції в стрижнях магнітної системи за різних значень вхідних напруг і відповідних струмів, а також одержані значення активних та загальних втрат у магнітопроводі в режимі холостого ходу, які в подальшому були використані для розрахунку кута магнітного запізнення  $\varphi$ , який використовується в формулах (2.21 – 2.24).

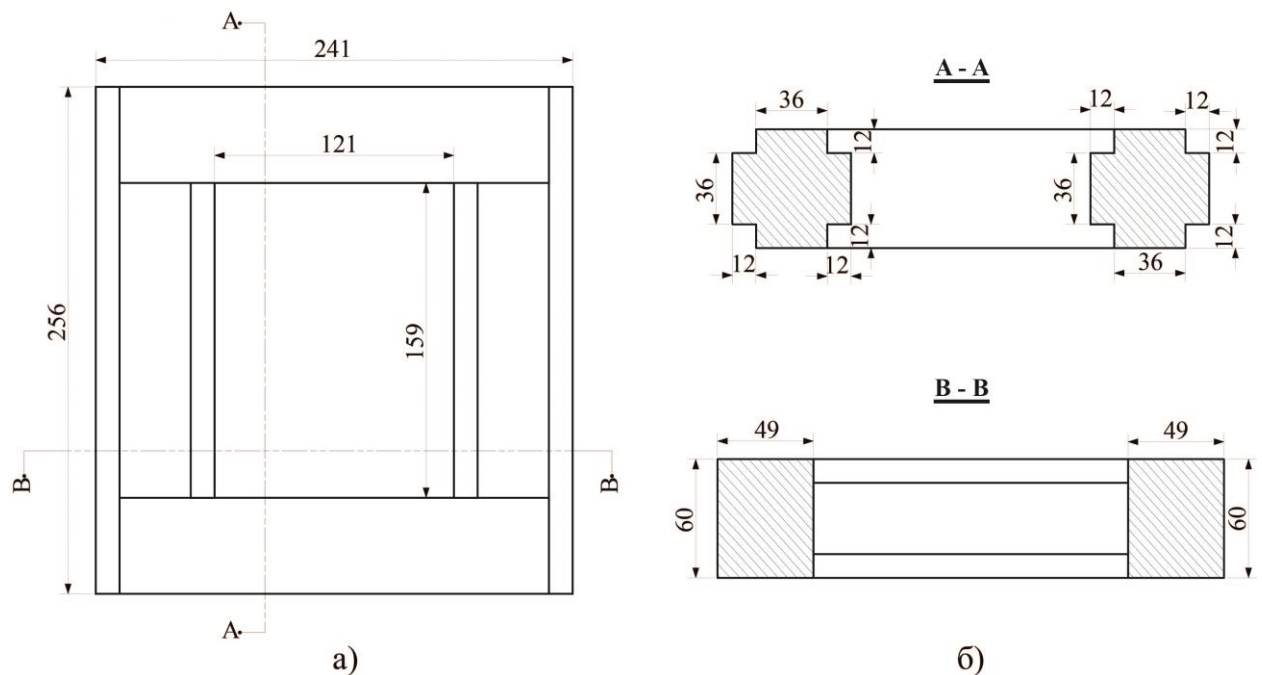


Рис. 4.4 Основні геометричні розміри магнітопроводу автотрансформатора напруги: а) – загальний вигляд; б) – переріз стрижнів; в) – переріз ярем

Після розрахунків за [1, 13, 107] характеристик магнітної системи були попередньо обрані кількості витків обмоток автотрансформатора пропорційно їх номінальним напругам. Було прийнято рішення розділити обмотку автотрансформатора на 2 окремі котушки, розташовані на окремих



Таблиця 4.3

Співвідношення витків обмотки автотрансформатора номінальні ( $K_{дном}$ ) та попередньо розраховані ( $K_{дрозр}$ ).

$K_{дном}$	$\frac{3000}{100}$	$\frac{3000}{100/\sqrt{3}}$	$\frac{3000}{100/3}$	$\frac{6000}{100}$	$\frac{6000}{100/\sqrt{3}}$	$\frac{6000}{100/3}$	$\frac{10000}{100}$	$\frac{10000}{100/\sqrt{3}}$	$\frac{10000}{100/3}$
	30	51,961524	90	60	103,92305	180	100	173,20508	300
$K_{дрозр}$	$\frac{12990}{433}$	$\frac{12990}{250}$	$\frac{13050}{145}$	$\frac{41880}{698}$	$\frac{41880}{403}$	$\frac{41940}{233}$	$\frac{43300}{433}$	$\frac{43300}{250}$	$\frac{43500}{145}$
	30	51,96	90	60	103,92059	180	100	173,2	300

Для розташування обмоток на стрижнях магнітопроводу були виготовлені конструкції ізоляційних каркасів котушок з капролону, у відповідності до рис. 4.6. Обидва каркаси обмоток автотрансформатора напруги мають однакову висоту, проте мають різні зовнішні діаметри фланцевих дисків: каркас котушки А має діаметр  $D = 158$  мм, каркас котушки Б має діаметр  $D = 190$  мм.

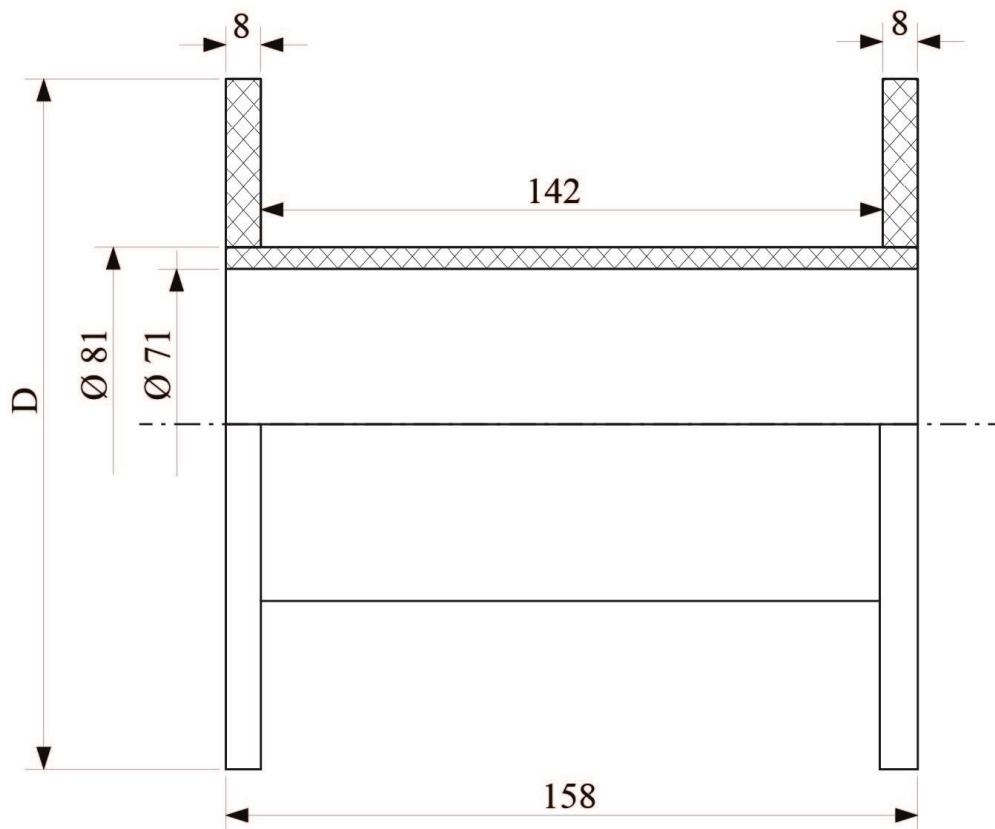


Рис. 4.6 Ізоляційний каркас котушок обмоток автотрансформатора.

Було прийнято рішення розраховувати розташування витків обмоток на ізоляційному каркасі котушки з урахуванням допустимої напруженості електричного поля в умовах наближення витків до ярем магнітопроводу та за відсутності рідкого ізоляційного середовища (для зменшення маси було прийнято рішення виконувати обмотки та всю конструкцію автотрансформатора з повітряно-комбінованою ізоляцією, для чого в якості міжшарової ізоляції застосовувалась стрічка кабельного паперу К-120 товщиною 0,12 мм та шириною 20 мм, намотувана з перекриттям половини попереднього витка стрічки). В програмному пакеті Agros2D були розраховані допустимі відстані частин обмотки від ярма, при яких не відбувається початку коронного розряду при напрузі, що відповідає розподілу максимальної робочої напруги по крайніх витках обмотки. На рис. 4.7 представлений приклад розрахунку напруженості електричного поля для високовольтної обмотки 10 кВ з її екраном:

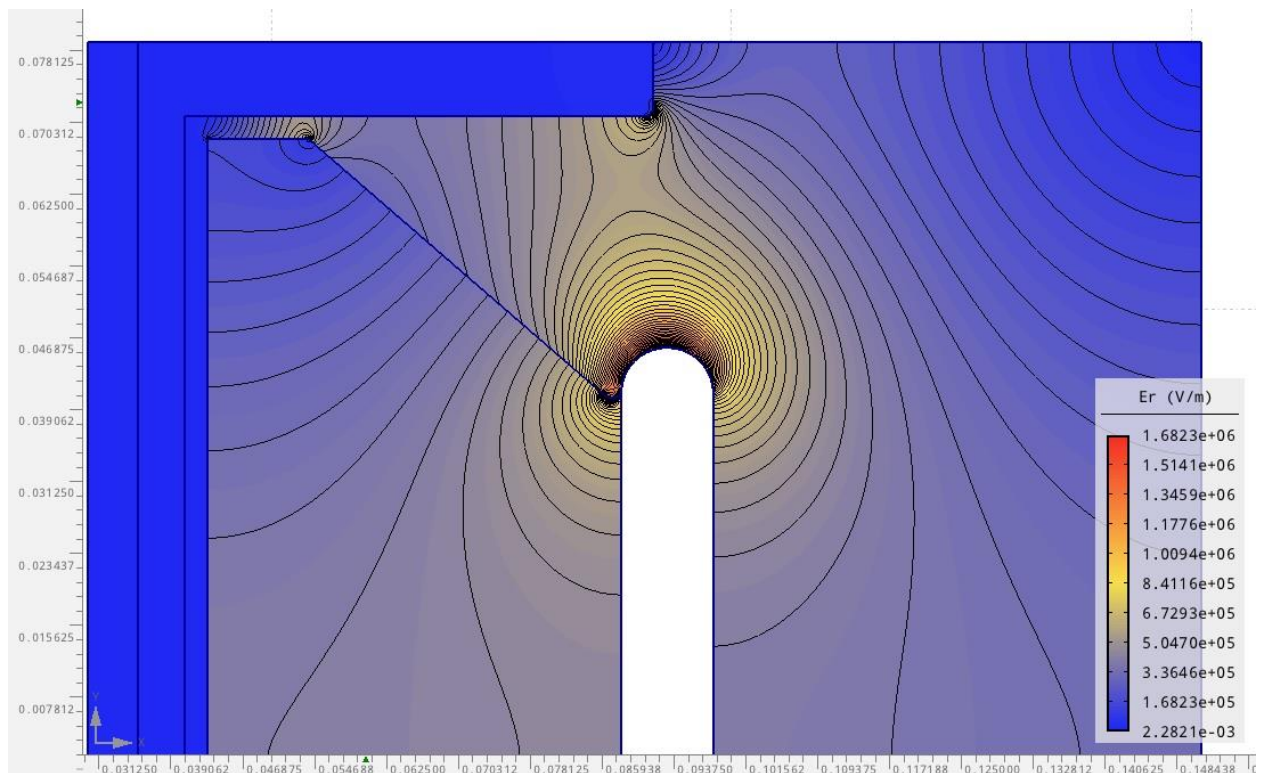


Рис. 4.7 Моделювання електричного поля високовольтної обмотки 10 кВ з екраном автотрансформатора в програмному пакеті Agros2D при максимальній напрузі 26870 В.

Аналогічним чином розраховувались форма і розташування екрану котушки А на напругу 3 кВ.

Для виконання обмоток автотрансформатора були обрані два типи проводів: для високовольтних частин обмотки був обраний провід з подвійною емальованою ізоляцією ПЭТД-200 діаметром провідної частини 0,224 мм; для низьковольтних частин обмотки був обраний провід такого самого типу діаметром провідної частини 0,4 мм.

В програмному пакеті Agros2D за розрахованими координатами горизонтальних шарів витків обмотки була створена модель активної частини автотрансформатора для побудови картини магнітного поля. Обмотка була розділена на сегменти таким чином, щоб забезпечити можливість визначення потোকзчеплень магнітного поля з низьковольтними частинами витків обмотки, які відповідають реальним відводам обмотки. Для підвищення точності розрахунків обмотка класу 10 кВ, наприклад, поділялась на близько 900 сегментів, в перерізі кожного з яких задавалась густина струму у відповідності до методики, визначеної у Розділі 2. Відносна магнітна проникність магнітопроводу розраховувалась для кожного з режимів роботи автотрансформатора окремо за характеристиками сталі. Для розрахунку обирались усереднене значення відносної магнітної проникності. Невеликі значення відносної магнітної проникності ( $\mu$ , відповідно, індукції в стрижні) обирались задля потрапляння цих змінних для різних режимів характеристик у область найменш нелінійних змін характеристик сталі.

Слід відзначити, що попередньо проводились дослідження залежності індуктивності розсіювання від відносної магнітної проникності осердя для вісесиметричних моделей та було визначено, що в доволі широкому діапазоні її значень (від 1000 до 5000) індуктивність розсіювання несуттєво залежить від відносної магнітної проникності: розкид одержаних розрахункових значень приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання для цього діапазону зміни відносної магнітної проникності становить не більше 3%, що

знаходиться в межах точності розрахунків за запропонованими вісесиметричними моделями. Якщо ж відносна магнітна проникність магнітного осердя змінюється в межах 5000 – 15000, одержані значення розкиду приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання менші 0,4%, що є цілком достатнім для більшості розрахунків.

Шляхом виконання розрахунків за методикою, викладеною в Розділі 2 даної роботи, були одержані значення спадань напруг та кутів напруг, а також струмів на групах витків (сегментах обмотки) по відношенню до прикладеної вхідної напруги автотрансформатора, за формулами (2.5 – 2.22). В результаті, наприклад, для коефіцієнту ділення  $10000 : 100 / 3$  в режимі 190% від номінальної первинної напруги для попередньо розрахованої кількості витків за табл. 3 був одержаний фактичний розрахунковий коефіцієнт ділення автотрансформатора 300,4045 (при номінальному значенні коефіцієнта ділення, що дорівнює 300), який забезпечує похибку напруги масштабного перетворення вхідної напруги -0,13 %. Ця похибка майже втричі перевищує допустиму похибку для даного автотрансформатора. В інших режимах роботи обмотки автотрансформатора (при інших номінальних коефіцієнтах ділення) також спостерігались значні відхилення коефіцієнтів ділення по амплітуді від номінального у бік їх збільшення. Це свідчить про суттєвий вплив індуктивності розсіювання на коефіцієнт ділення високовольтного автотрансформатора напруги в режимі холостого ходу.

В зв'язку з цим було прийнято рішення про корекцію кількості витків високовольтної обмотки в бік їх зменшення задля забезпечення необхідних в рамках завдання значень похибки напруги автотрансформатора для всіх режимів його роботи.

Забезпечити виконання цієї умови в усіх режимах роботи автотрансформатора (80%, 150% та 190% від номінальних первинних напруг для всіх коефіцієнтів ділення) є складною задачею. По-перше, суттєво може впливати ємнісна складова струму на розподіл напруги по витках обмотки

АТН, які є найближчими до стрижня магнітопроводу. Одночасно з цим, згідно табл. 4.3, одна і та ж кількість витків первинної обмотки використовується для одержання різних коефіцієнтів ділення на кожному класі напруги, й зміна цієї кількості в різних пропорціях відображається на змінах цих коефіцієнтів ділення.

Шляхом покрокового змінення кількості витків для відповідних відводів первинної обмотки були розраховані фактичні коефіцієнти ділення для всіх режимів роботи обмотки таким чином, щоб забезпечити мінімальні середні значення похибки напруги та кутової похибки автотрансформатора в усіх режимах його роботи. Такі покрокові розрахунки здійснювались для кожної з попередньо розрахованих у відповідності до рис. 4.5 і табл. 4.3 кількостей витків обмотки АТ. Таким чином, були одержані кількості витків первинних обмоток для всіх номінальних коефіцієнтів ділення, при яких похибка напруги та кутова похибка за всіх режимів роботи автотрансформатора є мінімальними та відповідають вимогам до трансформаторів класу точності 0,05 [37].

В таблиці 4.4 наведені уточнені кількості витків первинної обмотки автотрансформатора, які забезпечують найбільш точне розрахункове відтворення номінальних коефіцієнтів ділення для всіх режимів роботи автотрансформатора.

Таблиця 4.4

Первинні та уточнені розрахункові (за теорією розподілу напруги по витках та групах витків автотрансформатора за Розділом 2) кількості витків первинної обмотки автотрансформатора, що забезпечують всі його номінальні коефіцієнти ділення

К <sub>дном</sub>	$\frac{3000}{100}$	$\frac{3000}{100/\sqrt{3}}$	$\frac{3000}{100/3}$	$\frac{6000}{100}$	$\frac{6000}{100/\sqrt{3}}$	$\frac{6000}{100/3}$	$\frac{10000}{100}$	$\frac{10000}{100/\sqrt{3}}$	$\frac{10000}{100/3}$
Первинні співвідношення	$\frac{12990}{433}$	$\frac{12990}{250}$	$\frac{13050}{145}$	$\frac{41880}{698}$	$\frac{41880}{403}$	$\frac{41940}{233}$	$\frac{43300}{433}$	$\frac{43300}{250}$	$\frac{43500}{145}$
Уточнені співвідношення	$\frac{12986}{433}$	$\frac{12986}{250}$	$\frac{13044}{145}$	$\frac{41840}{698}$	$\frac{41840}{403}$	$\frac{41901}{233}$	$\frac{43259}{433}$	$\frac{43259}{250}$	$\frac{43461}{145}$

Слід зазначити, що дані, наведені в табл. 4.5, відповідають виконаним з використанням чисельних розрахунків електричних та магнітних полів для запропонованої в даній роботі комплексної вісесиметричної моделі активної частини автотрансформатора напруги у циліндричній системі координат, з урахуванням впливу ємнісних складових струмів в обмотці цього автотрансформатора на результуючий розподіл напруги по витках обмотки.

Таблиця 4.5

Розрахункові значення похибки напруги  $f_p$  та кутової похибки  $\delta_p$  для номінальних коефіцієнтів ділення автотрансформатора, розраховані для котушки Б в режимах 80%, 150% та 190% від його номінальних вхідних напруг

$K_{дном}$	$U1, \% \text{ від } U1_{ном}$	$f_p, \%$	$\delta_p, '$
$\frac{10000}{100/3}$	80	-0,035	-0,566
	150	-0,040	-0,780
	190	-0,049	-0,862
$\frac{10000}{100/\sqrt{3}}$	80	0,012	0,411
	150	0,010	0,303
	190	0,001	0,310
$\frac{10000}{100}$	80	-0,031	-0,176
	150	-0,033	-0,348
	190	-0,047	-0,409
$\frac{6000}{100/3}$	80	0,012	0,940
	150	0,019	0,552
	190	0,019	0,491
$\frac{6000}{100/\sqrt{3}}$	80	-0,048	0,943
	150	-0,031	0,556
	190	-0,029	0,498
$\frac{6000}{100}$	80	-0,039	0,332
	150	-0,023	-0,101
	190	-0,022	-0,176

Аналогічним чином були розраховані похибки масштабного перетворення високої напруги для котушки А (номінальна вхідна напруга 3 кВ), які є суттєво меншими за значеннями, порівняно з даними табл. 4.5.

Для того, щоб можна було порівнювати розрахунки за різними методами, в таблиці 4.6 наведені результати розрахунків значень похибки по напрузі та кутової похибки для кількості витків, представлених в табл. 4.4, які відповідають різним розрахунковим моделям автотрансформатора. В цій таблиці індексом «Е» позначені дані, одержані в результаті розрахунків без урахування потоків розсіювання, індексом «К» позначені дані, одержані для комплексної моделі (за розділом 2 даної роботи), без урахування ємнісних складових струмів, індексом «С» позначені дані, одержані для комплексної моделі (за розділом 2 даної роботи), з урахуванням ємнісних складових струмів в обмотці.

З представлених в табл. 4.6 даних можна побачити, що для розглянутої в роботі конструкції високовольтного автотрансформатора напруги класу 10 кВ врахування ємнісних складових струмів в обмотці (за нормальних режимів роботи АТН) несуттєво впливає на точність одержаних результатів в межах класу точності 0,05 для даного масштабного перетворювача високої напруги. Проте, якщо необхідно розраховувати розподіл напруги по витках автотрансформатора класу напруги 110 кВ чи більше, або розглядати більш високий клас точності, врахування ємнісних складових струмів може мати суттєвий вплив на цей розподіл за рахунок більшої ємності між сусідніми шарами обмотки. Одночасно, можна бачити, що якщо не враховувати взагалі реактивну складову спаду напруги по витках обмотки АТН, тобто, враховувати лише розподіл напруги, пропорційний кількості витків, для даної конструкції АТН такий розрахунок може забезпечити лише клас точності 0,1 або гірше.

Проектоване виконання котушок високовольтного автотрансформатора напруги дозволило використати корпус трансформатора И-50 для його подальшої модернізації та використання в якості корпусу досліджуваного високовольтного автотрансформатора з робочою напругою до 19 кВ.

Таблиця 4.6

Розрахункові значення похибки напруги  $f$  та кутової похибки  $\delta$  для номінальних коефіцієнтів ділення автотрансформатора, розраховані для котушки Б в режимах 80%, 150% та 190% від його номінальних вхідних напруг, одержані без врахування потоків розсіювання ( $f_E, \delta_E$ ), з урахуванням потоків розсіювання, але без урахування ємнісних складових струмів ( $f_K, \delta_K$ ) та з урахуванням всіх складових розрахунків ( $f_C, \delta_C$ ).

$K_{дном}$	$U1, \% \text{ від } U1_{ном}$	$f_E, \%$	$f_K, \%$	$f_C, \%$	$\delta_E, '$	$\delta_K, '$	$\delta_C, '$
$\frac{10000}{100/3}$	80	0,092	-0,032	-0,035	0	-0,559	-0,566
	150	0,092	-0,037	-0,040	0	-0,773	-0,780
	190	0,092	-0,046	-0,049	0	-0,854	-0,862
$\frac{10000}{100/\sqrt{3}}$	80	0,095	0,014	0,012	0	0,420	0,411
	150	0,095	0,010	0,010	0	0,315	0,303
	190	0,095	0,002	0,001	0	0,319	0,310
$\frac{10000}{100}$	80	0,092	-0,031	-0,031	0	-0,164	-0,176
	150	0,092	-0,036	-0,033	0	-0,332	-0,348
	190	0,092	-0,048	-0,047	0	-0,396	-0,409
$\frac{6000}{100/3}$	80	0,095	0,014	0,012	0	0,948	0,940
	150	0,095	0,021	0,019	0	0,560	0,552
	190	0,095	0,021	0,019	0	0,499	0,491
$\frac{6000}{100/\sqrt{3}}$	80	0,097	-0,048	-0,048	0	0,951	0,943
	150	0,097	-0,031	-0,031	0	0,564	0,556
	190	0,097	-0,029	-0,029	0	0,505	0,498
$\frac{6000}{100}$	80	0,095	-0,041	-0,039	0	0,344	0,332
	150	0,095	-0,025	-0,023	0	-0,089	-0,101
	190	0,095	-0,024	-0,022	0	-0,164	-0,176

При виконанні роботи за темою «Зменшення масогабаритних показників трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН, розширення робочого діапазону та зменшення похибок трансформатора напруги зі складу міри КМПЕН» була виготовлена активна частина досліджуваного високовольтного автотрансформатора напруги з повітряно-комбінованою ізоляцією, а також, за узгодженням з Замовником роботи, була виконана модернізація корпусу для цієї активної частини на основі корпусу трансформатора И-50. Результатом виконаної розробки є експериментальний

зразок автотрансформатора напруги класу 10 кВ з максимальною робочою напругою 19 кВ, представлений на рис. 4.8:



Рис. 4.8 Зовнішній вигляд автотрансформатора напруги класу напруги 10 кВ з максимальною робочою напругою 19 кВ класу точності 0,05 (вигляд з боку низьковольтних відводів котушки А)

Як можна бачити з рис. 4.8, серед низьковольтних відводів автотрансформатора присутній також відвід на напругу 300 В. Ця частина низьковольтної обмотки автотрансформатора була виконана за додатковим узгодженням з ДП «Укрметртестстандарт» та прорахована на відповідну точність масштабного перетворення напруги. Для цього у вихідній частині обмотки котушки А були виконано низьковольтний відвід на 1299-му витку, а для котушки Б – на 1299-му та 2094-му витках. Необхідні коефіцієнти

ділення забезпечувались розрахованими співвідношеннями витків:  $\frac{43259}{1299}$  та

$\frac{12986}{1299}$ ,  $\frac{41840}{2094}$ . Так як в технічному завданні на роботу ці коефіцієнти були

відсутні, їх виконання було оформлене як експериментальне.

Оскільки високовольтних вводів в конструкції автотрансформатора було передбачено лише два (на клас 3 кВ та на класи 6 – 10 кВ), у екранованих металевих комірках цих вводів передбачена комутація високовольтних відводів котушок А та Б автотрансформатора.

Розроблений та виготовлений автотрансформатор на класи напруги 3 кВ, 6 кВ, 10 кВ з максимальною робочою напругою 19 кВ пройшов державну метрологічну атестацію в ДП «Укрметртестстандарт». Акт впровадження даного автотрансформатора у складі Вторинного еталона України класу 110 кВ наведений в Додатку Б.

Слід відзначити, що розроблений еталонний автотрансформатор напруги, побудований на основі магнітопроводу та корпусу трансформатора И-50, має на 40% меншу вагу, на 5% більшу максимальну робочу напругу при зменшеній в 4 рази похибці напруги.

#### **4.3 Розрахунок похибки визначення випробувальної напруги (за вимірювальною обмоткою) трансформатора ИОМ-100/25 за різних типів його навантаження**

В Розділі 3 було запропоновано систему рівнянь, яка дозволяє визначати комплекси напруг та струмів на окремих витках чи групах витків обмоток трансформатора. Об'єктом для експериментальних досліджень з цього питання був обраний високовольтний випробувальний трансформатор типу ИОМ-100/25 з вимірювальною обмоткою, який знаходиться у складі лабораторного обладнання кафедри техніки і електрофізики високих напруг факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря

Сікорського» (заводський номер 9581273). Цей однофазний випробувальний трансформатор з паперово- масляною ізоляцією має номінальну потужність 25 кВА. Номінальна первинна напруга дорівнює 200 В. Номінальна вторинна напруга дорівнює 100 кВ. Вторинна обмотка даного трансформатора виконана у вигляді автотрансформаторного подільника напруги – в низьковольтній частині високовольтної обмотки виконаний відвід вимірювальної обмотки, для якої номінальна напруга становить 100 В. Тобто, автотрансформаторний подільник напруги, виконаний на обмотці ВН цього трансформатора, має номінальний коефіцієнт ділення  $K_{\partial_{ном}} = 1000$ .

Однак, як було зазначено в [57, 93], а також в Розділі 3, характеристики цього типу трансформаторів можуть суттєво залежати від типу навантаження. В [93] та Розділі 3 причина суттєвих змін коефіцієнту ділення ИОМ-100/25 з вимірювальною обмоткою при значному ємнісному навантаженні була пояснена відповідною векторною діаграмою та завищеною індуктивністю розсіювання вимірювальної обмотки (див. рис. 3.4). Відповідно, для того, щоб компенсувати вплив індуктивності розсіювання на коефіцієнт ділення при значному ємнісному навантаженні в Розділі 3 запропоновано використовувати додатково включену коригуючу ємність, з'єднану послідовно з вимірювальною обмоткою, та уточнене рівняння (3.19) для системи рівнянь (3.34 – 3.39).

За оглядом активної частини магнітопровід трансформатора ИОМ-100/25 виконаний з пластин електротехнічної сталі (Э43), переріз стрижня становить  $106 \text{ см}^2$ . Високовольтна обмотка виконана у вигляді 8 котушок з зовнішнім діаметром 300 мм. Високовольтна міжшарова ізоляція ИОМ-100/25 виконана з трансформаторного паперу, шайби між котушками обмотки ВН виконані з електрокартону. Високовольтний екран обмотки ВН виконаний зі сплаву алюмінію. Основні геометричні розміри активної частини досліджуваного трансформатора ИОМ-100/25 представлені на рис. 4.9.

Як можна бачити з рис. 4.9 (та рис. 3.1), високовольтна обмотка ИОМ-100/25 виконана таким чином (витки обмотки значно віддалені від стрижня та обмотки НН), щоб забезпечити якомога більшу індуктивність розсіювання і, відповідно, якомога більші значення напруги короткого замикання, оскільки режим короткого замикання для випробувальних трансформаторів є поширеним режимом його роботи. Для трансформатора, геометричні параметри якого представлені на рис. 4.9, напруга короткого замикання становить для досліджуваного ИОМ-100/25 за паспортними даними – 13,8%.

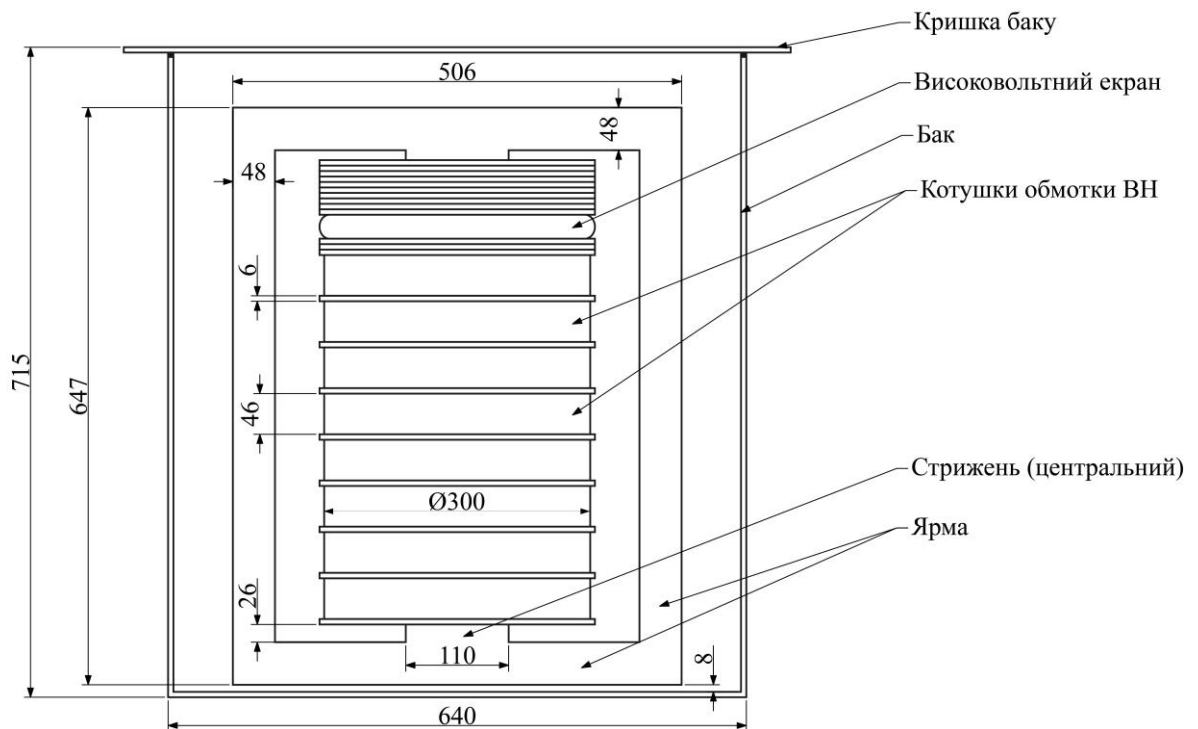


Рис. 4.9 Основні геометричні розміри активної частини досліджуваного трансформатора ИОМ-100/25 з вимірювальною обмоткою

За одержаними геометричними розмірами магнітопроводу, маркою сталі, номінальними потужністю та напругами обмоток, за методикою, викладеною у [13], було розраховано кількість витків первинної та вторинної обмоток, а також, виходячи з номінального коефіцієнту ділення – кількість витків вимірювальної обмотки. За одержаними даними обмотка НН досліджуваного ИОМ-100/25 містить 62 витки мідного проводу перерізом  $31 \text{ мм}^2$  (з сортаменту прямокутного перерізу  $14 \times 2,24 \text{ мм}$  з товщиною ізоляції

на одну сторону 0,4 мм) та виконана у два послідовно включені шари по 31 витку в кожному. Відповідно, обмотка ВН виконана круглим мідним ізолюваним провідником діаметром 0,3 мм. Кількість витків обмотки ВН – 31000. Відповідно, кількість витків вимірювальної обмотки – 31. Вимірювальна обмотка виконана більш товстим провідником (діаметром 0,5 мм), щоб зменшити похибку активних втрат, оскільки витки цієї обмотки мають найбільший діаметр і, відповідно, довжину. Виходячи з геометричних розмірів за рис. 4.9, приймаючи, що витки обмотки ВН розташовуються у перерізі рівномірно, враховуючи наявність заземленого зовнішнього екранування обмотки НН та розраховуючи допустимі напруженості електричного поля в конструкції трансформатора за формулами для обкладинок циліндричного конденсатора [21], були розраховані радіуси внутрішніх витків котушок обмотки ВН досліджуваного трансформатора. Відповідно до виконаних розрахунків, внутрішній радіус котушок 1, 2 (починаючи з найменших потенціалів) становить 105 мм; котушок 3,4 – 115 мм; котушок 5,6 – 125 мм; котушок 7,8 – 130 мм.

Для моделювання досліджуваного трансформатора в програмному пакеті Agros2D було прийнято рішення при розрахунках індуктивності розсіювання обмежитись лише «стрижневою» моделлю і відмовитись від додаткових розрахунків за «капсульною» моделлю, у відповідності до викладеного у Розділі 2, оскільки основною метою розрахунку в даному розділі було знаходження принципового пояснення аномально високих похибок масштабного перетворення напруги у високовольтній автотрансформаторній обмотці ИОМ-100/25 [57, 93]. Для моделювання за «стрижневою» моделлю у циліндричній системі координат в якості стрижня був обраний циліндр перерізом  $106 \text{ см}^2$ , який відповідає за площею перерізу реальному центральному стрижню магнітопроводу досліджуваного трансформатора. Для попередніх розрахунків відносна магнітна проникність стрижня для всіх режимів дослідження приймалась  $\mu_{ст} = 5000$ , при вирішенні системи рівнянь (3.34 – 3.39) значення  $\mu_{ст}$  визначались за характеристиками

сталі й враховувались в чисельних розрахунках. Для розрахунку параметрів рівнянь (3.22 – 3.25) були окремо змодельовані (наближені до номінальних): первинний струм 125 А та вторинний струм 0,25 А. Для розрахованої кількості витків МРС обмоток становитиме 7750 А в перерізі кожної обмотки (приймаємо, що струми розподілені в перерізах котушок обмоток рівномірно). За даними геометричних обмірів активної частини, обраної магнітної проникності та розрахованих МРС на рис. 4.10 представлена побудована картина магнітного поля в активній частині ИОМ-100/25 при створенні магнітного поля тільки обмоткою НН:

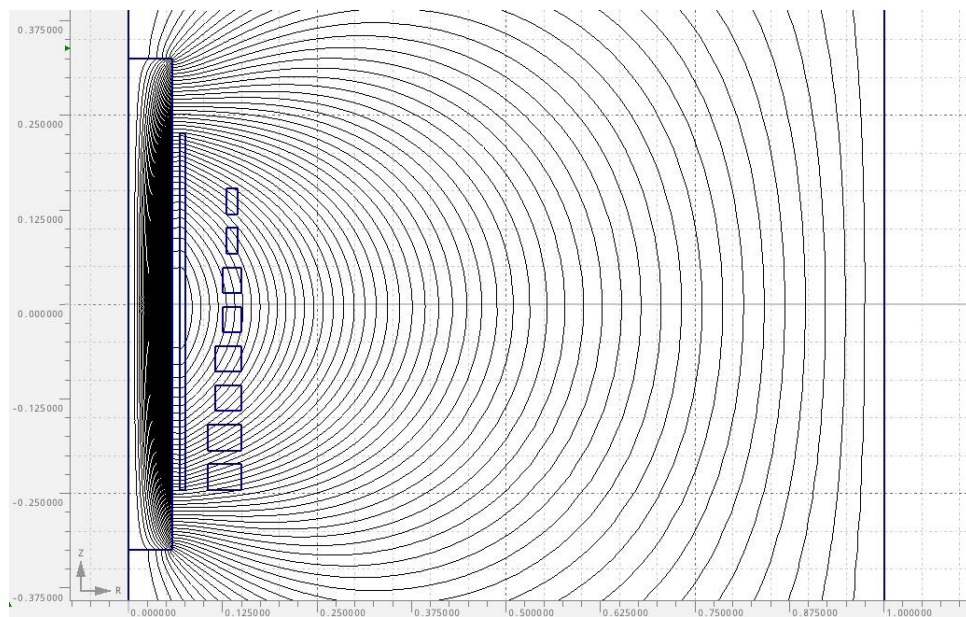


Рис. 4.10 Лінії магнітного поля в моделі активної частини високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 при створенні магнітного поля обмоткою НН

З рис. 4.10 можна бачити, що найбільша густина магнітного потоку розсіювання зосереджена у перерізі стрижня магнітопроводу в його середній частині. Найкоротші лінії магнітного потоку, який замикається в немагнітній частині конструкції, відповідає також виткам вторинної обмотки, які розташовані в середній частині обмотки. Натомість, витки вимірювальної обмотки розташовані в нижній частині високовольтної обмотки, тому

магнітні потоки, які зчеплені з цими витками, мають найдовші шляхи замикання у немагнітній частині конструкції.

Довжина замикання магнітних потоків в немагнітній частині конструкції високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 пропорційна магнітному опору потокозчеплення з певним витком, або групою витків обмотки. Ця величина пов'язана з  $M_{kl}$ , у відповідності до формули (3.25).

Аналогічним чином одержуємо в програмному пакеті Agros2D картину магнітного поля при пропусканні струму крізь обмотку ВН, яка представлена на рис. 4.11:

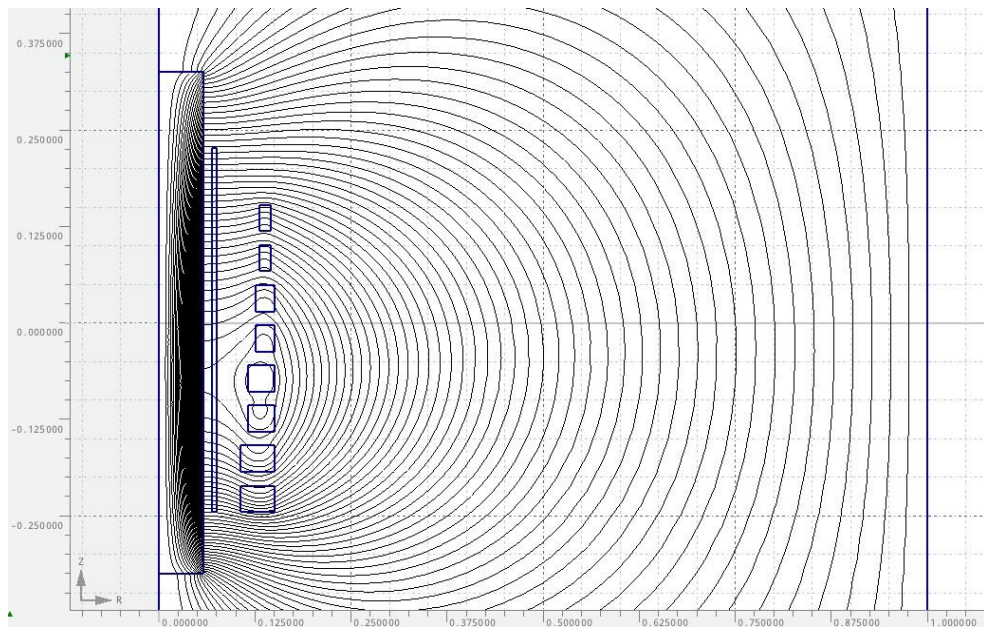


Рис. 4.11 Лінії магнітного поля в моделі активної частини високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 при створенні магнітного поля обмоткою ВН

Як можна бачити з рис. 4.11, найбільша густина магнітного потоку в стрижні, на відміну від рис. 4.10, зміщена в нижню частину стрижня, оскільки нижні котушки, розраховані на менший потенціал відносно заземлених частин трансформатора, містять більшу кількість витків. В цьому випадку найкоротші лінії магнітного потоку, який зчеплений з витками обмотки ВН поза магнітною системою, відповідають розташуванню витків у

котушках 3 та 4. Натомість, при створенні поля первинною обмоткою, такими є котушки 5 та 6. Несиметричне розташування потоків, які створюються обмотками НН та ВН, при одночасному протіканні струмів в обох обмотках призводить до суттєво нерівномірного розподілу потоку розсіювання у немагнітній частині трансформатора. Такий розподіл наближено відповідає зображеному на рис. 4.12 та формує результуюче потокозчеплення розсіювання, яке суттєво відрізняється для різних витків (груп витків) обмоток:

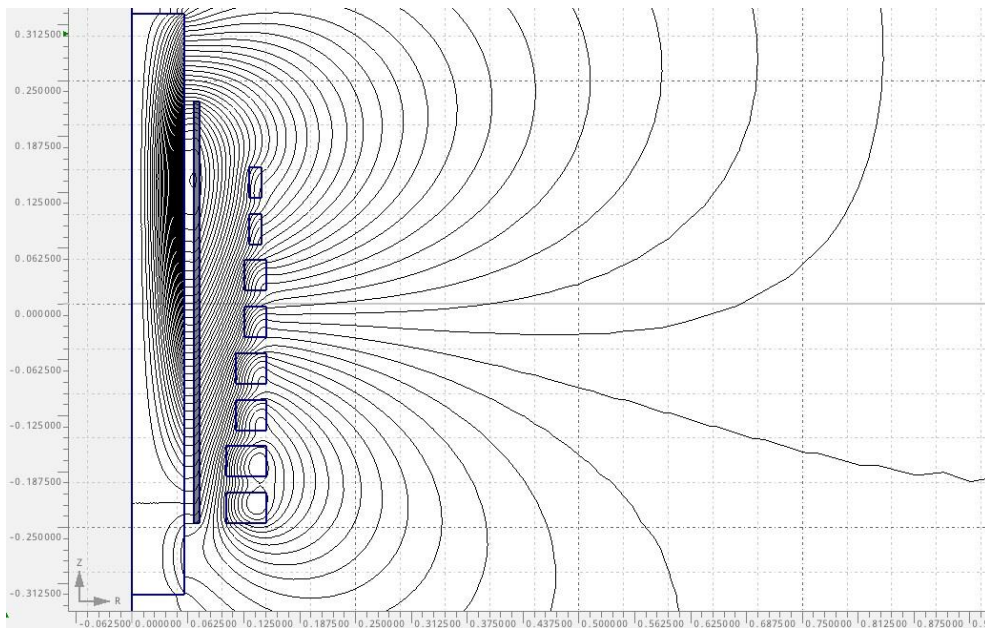


Рис. 4.12 Лінії магнітного поля в моделі активної частини високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 при створенні магнітного поля одночасно обмотками НН та ВН за умови компенсації їх МРС (тобто, в режимі значного навантаження ИОМ-100/25)

З картини магнітного поля за рис. 4.12, дійсно, впливає, що потокозчеплення області вимірювальної обмотки ИОМ-100/25 є практично максимальним для розглянутої конфігурації обмоток.

Для дослідження різних режимів навантаження ИОМ-100/25 використовувався наступний алгоритм розрахунків:

1. Переріз обмотки НН умовно розділявся на 31 однакових за площею сегментів. Обмотка ВН умовно розділялася на 168 сегментів.

2. Розраховувались пари координат  $(r_i, z_i)$  у циліндричній системі координат, які відповідають геометричним центрам кожного сегмента кожної обмотки.

3. За радіусом витків  $r$  у сегменті та формулами (2.11, 2.12) розраховувались кількості витків у сегментах (враховуючи, що використовувалась не приведена, а фактична кількість витків у цих формулах), їх довжина та визначалась загальна активна складова опору  $r_i$  витків у обраному сегменті обмотки для використання в формулі (3.22).

4. За розрахованої відносної магнітної проникності стрижня та рівномірно розподіленого в перерізі обмотки НН струму 7750 А (струм в обмотці ВН відсутній) в програмному пакеті Agros2D розраховувались потокозчеплення для всіх центрів сегментів обмоток, координати  $(r_i, z_i)$  яких були розраховані попередньо.

5. Аналогічно виконувались операції при заживленні обмотки ВН.

6. Використовуючи формули (2.13, 3.22 – 3.25) розраховувались значення власних індуктивностей, взаємних індуктивностей та комплексних опорів як для окремих груп витків, так і обмоток в цілому для подальшого використання цих значень в системі рівнянь (3.34 – 3.39).

7. За методикою, викладеною в [13] та таблицями [107], розраховувались значення індукції в стрижні та ярмах магнітопроводу ИОМ-100/25 для різних вхідних напруг. За цією ж методикою визначались активні та повні втрати в магнітопроводі для кожного режиму, а також значення магнітного опору  $\dot{R}_m$ . Струм холостого ходу  $I_0$  для кожного режиму визначався відношенням повних втрат у магнітопроводі до вхідної напруги. За відношенням реактивних втрат у магнітопроводі до активних визначався кут відставання струму холостого ходу від вхідної напруги.

8. За одержаними значеннями комплексного магнітного опору та комплексних електричних опорів, за різних вхідних напруг та різних комплексних навантажень, в результаті вирішення системи рівнянь (3.34 –

3.39) на ПК визначались значення комплексів напруг та струмів для кожного сегмента високовольтної обмотки, включаючи вимірювальну обмотку.

Шляхом виконання пп.. 1-8 вищезазначеної послідовності дій для режиму холостого ходу був одержаний ряд сумарних діючих значень напруги на обмотці ВН досліджуваного ИОМ-100/25 та на його вимірювальній обмотці. За результатами розрахунків режиму холостого ходу ИОМ-100/25 похибка визначення високої випробувальної напруги на обмотці ВН трансформатора за вимірювальною обмоткою та номінального коефіцієнту ділення 1000, по відношенню до розрахованої напруги на обмотці ВН має значення, представлені на рис. 4.13. Також, з метою порівняння, на рис. 4.13 представлені експериментально одержані значення похибки (див. рис. 3.3, схему рис. 3.2).

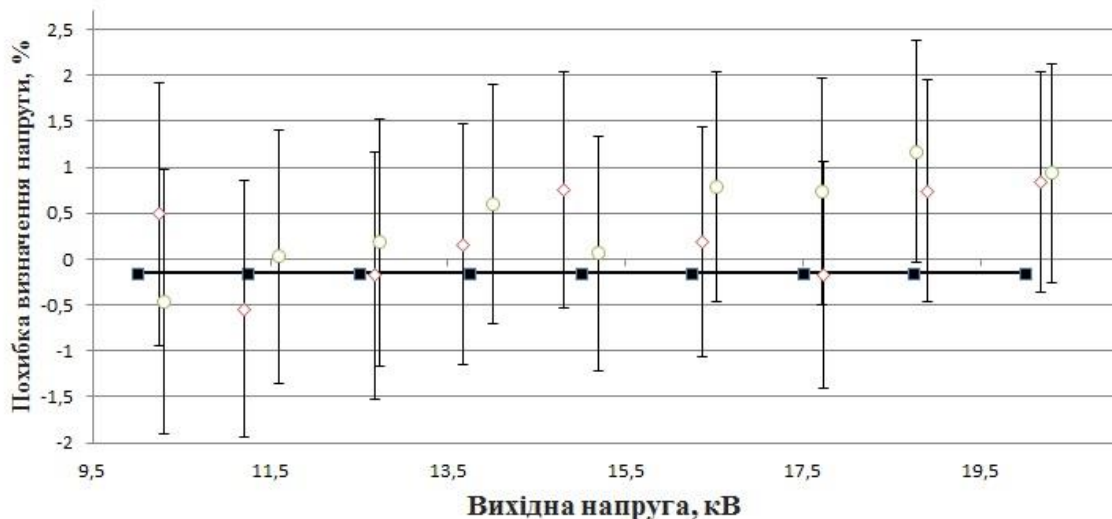


Рис. 4.13 Розрахована похибка визначення високої випробувальної напруги

ИОМ-100/25 за допомогою вимірювальної обмотки та номінального коефіцієнту ділення (1000) за результатами моделювання холостого ходу трансформатора (показана суцільною лінією), у порівнянні з двома рядами експериментально одержаних значень (частина даних за рис. 3.3) за схемою рис. 3.2 (без навантаження трансформатора, замкнений конденсатор С1).

На рис. 4.13 – 4.18 суцільними квадратними маркерами позначені розрахункові значення, порожніми круговими та ромбовидними маркерами позначені експериментальні дані двох серій експериментів.

Аналогічно, були розраховані похибки визначення високої випробувальної напруги за допомогою вимірювальної обмотки ИОМ-100/25 при активному та ємнісному навантаженнях, які відповідають даним експерименту, згідно [57]. На рис. 4.14 представлена відповідна залежність при активному навантаженні ИОМ-100/25, у порівнянні з експериментально одержаними даними, а на рис. 4.15 – при ємнісному навантаженні.

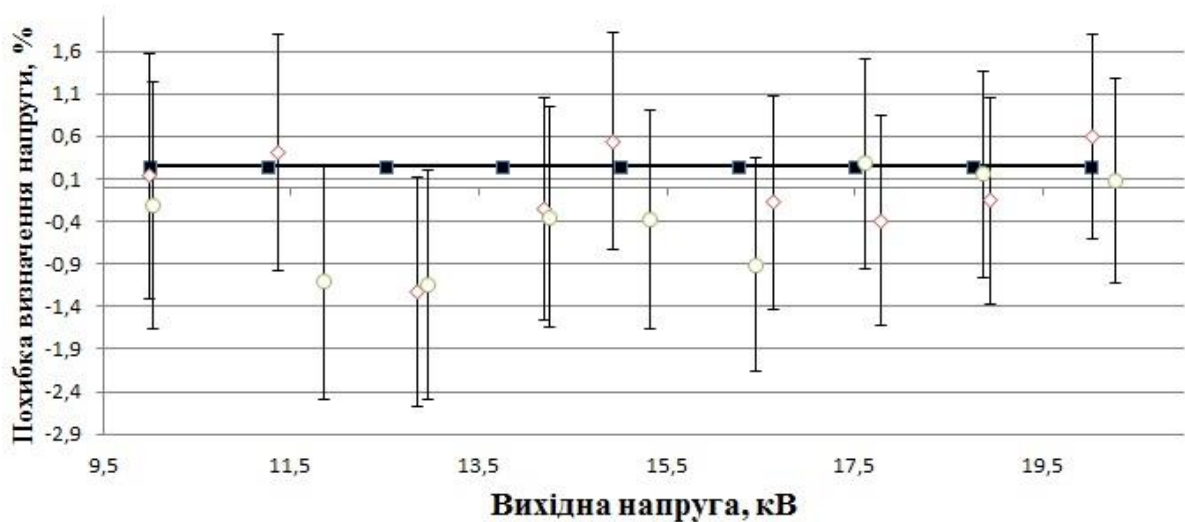


Рис. 4.14 Розрахована похибка визначення високої випробувальної напруги

ИОМ-100/25 за допомогою вимірювальної обмотки та номінального коефіцієнта ділення (1000) за результатами моделювання трансформатора з активним навантаженням (показана суцільною лінією), у порівнянні з двома серіями експериментально одержаних значень (частина даних за рис. 3.3) за схемою рис. 3.2 (активне навантаження 217 кОм, закорочений конденсатор С1).

Як можна бачити з рис. 4.13, розрахункова похибка визначення вихідної високої напруги ИОМ-100/25 за допомогою його вимірювальної обмотки на холостому ході є практично постійною та відповідає 0,2%. При значному активному навантаженні (рис. 4.14) ця розрахункова похибка досягає близько 0,3%, а при ємнісному навантаженні – майже 11% (рис. 4.15).

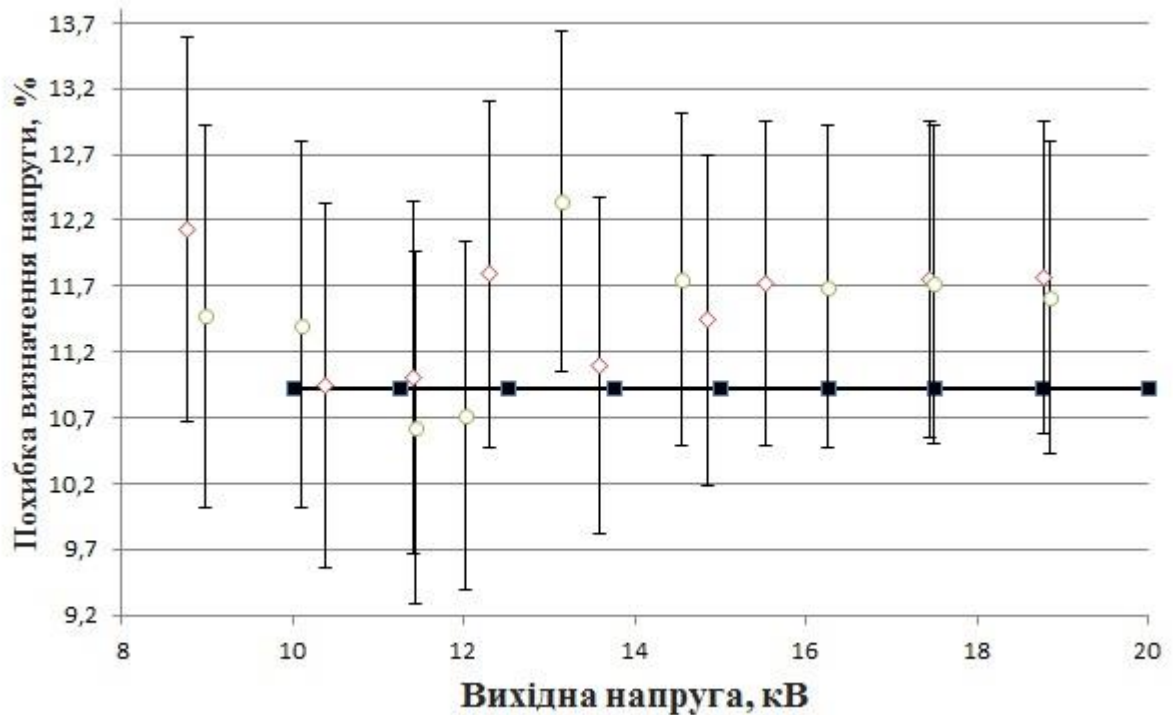


Рис. 4.15 Розрахункова похибка визначення високої випробувальної напруги ИОМ-100/25 за допомогою вимірювальної обмотки та номінального коефіцієнта ділення (1000) за результатами моделювання трансформатора з ємнісним навантаженням (показана суцільною лінією), у порівнянні з двома серіями експериментально одержаних значень (частина даних за рис. 3.3) за схемою рис. 3.2 (ємнісне навантаження 15,4 нФ, закорочений конденсатор С1).

Одержані розрахункові результати є наближеними (різниця  $\sim 1\%$ ) до експериментальних даних, одержаних за схемою рис. 3.2 та представлених на рис. 3.3. Вони вперше пояснюють аномальну поведінку похибки визначення високої напруги випробувального трансформатора за його вимірювальною обмоткою при ємнісному навантаженні.

Якщо використати вираз (3.51) та метод компенсації індуктивної складової спаду напруги за Розділом 3.4 для даного трансформатора, одержимо для того ж режиму ємнісного навантаження при використанні коригуючої ємності 137 мкФ (розрахункове значення) залежність похибки

визначення високої напруги ИОМ-100/25 за вимірювальною обмоткою, зазначену на рис. 4.16:

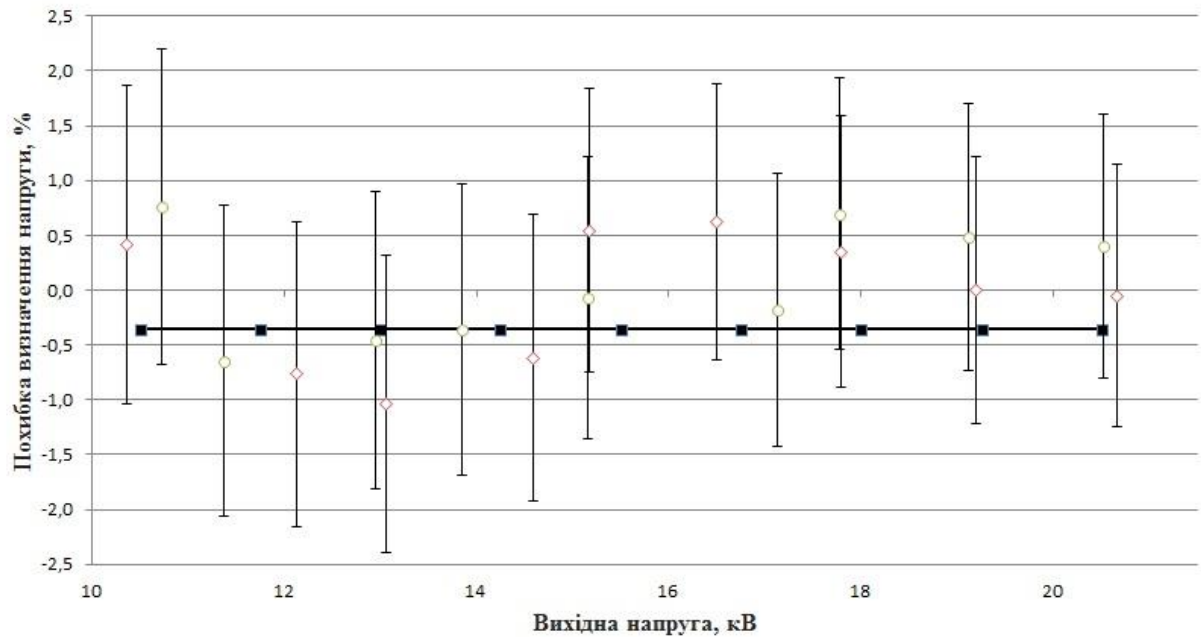


Рис. 4.16 Розрахункова похибка визначення високої випробувальної напруги ИОМ-100/25 за допомогою вимірювальної обмотки та номінального коефіцієнта ділення (1000) за результатами моделювання трансформатора з емнісним навантаженням з використанням компенсуючої ємності 137 мкФ (показана суцільною лінією), у порівнянні з двома серіями експериментально одержаних значень (див. рис. 4.19) за схемою рис. 3.2 (емнісне навантаження 15,4 нФ).

Використання коригуючої ємності для високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з вимірювальною обмоткою описано в патенті України на винахід [100].

Результати розрахунку використання коригуючої ємності для активного навантаження та холостого ходу, у порівнянні з експериментально одержаними даними для цих режимів роботи ИОМ-100/25 представлені на рис. 4.17, 4.18, відповідно:

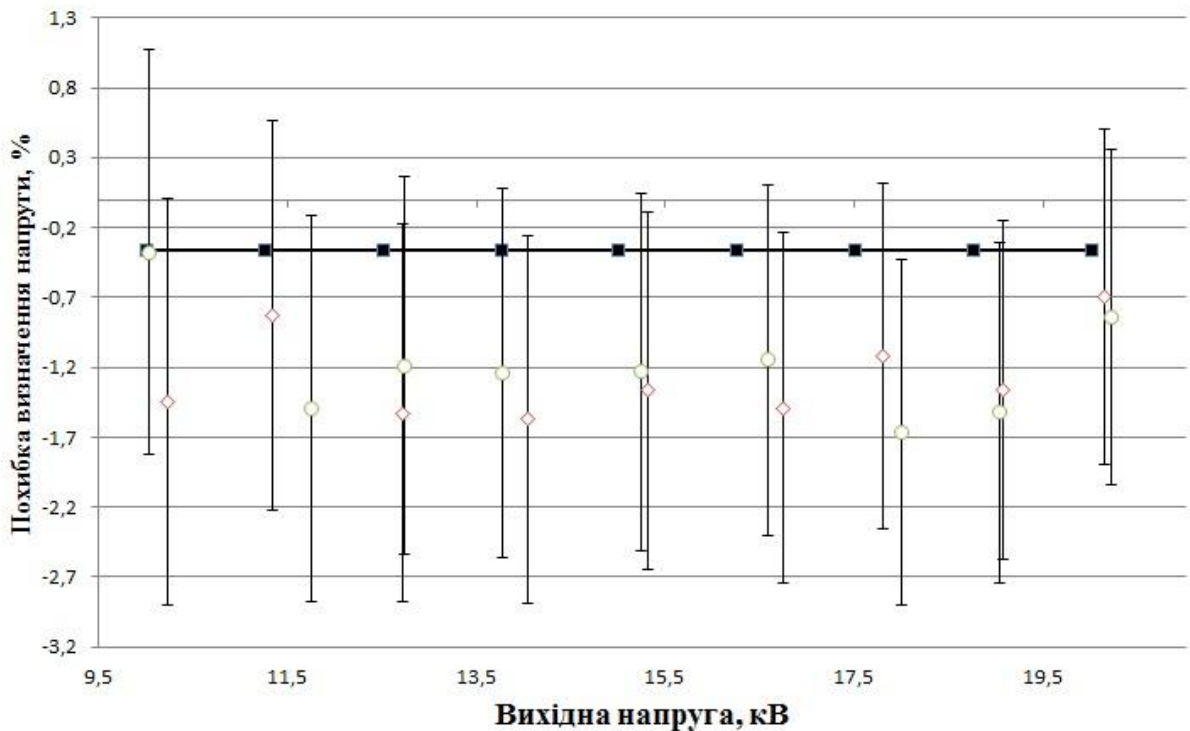


Рис. 4.17 Розрахункова похибка визначення високої випробувальної напруги ИОМ-100/25 за допомогою вимірювальної обмотки та номінального коефіцієнта ділення (1000) за результатами моделювання трансформатора з активним навантаженням з використанням коригуючої ємності 137 мкФ (показана суцільною лінією), у порівнянні з двома серіями експериментально одержаних значень (див. рис. 4.19) за схемою рис. 3.2 (активне навантаження 217 кОм).

Як можна бачити з рис. 4.16, похибка визначення високої випробувальної напруги за допомогою вимірювальної обмотки ИОМ-100/25 при ємнісному навантаженні суттєво зменшилася (з  $\approx 11\%$  до приблизно  $-0,2\%$ ). Проте, практично не змінилася похибка визначення випробувальної напруги при активному навантаженні, про що свідчать порівняння рис. 4.17 та рис. 4.14. Як можна бачити, порівнюючи рис. 4.18 та рис. 4.13, похибка визначення випробувальної напруги на холостому змінилася на  $\sim 0,5\%$ . Приведені експериментальні дані повністю підтверджують викладені в Розділі 3 теоретичні положення.

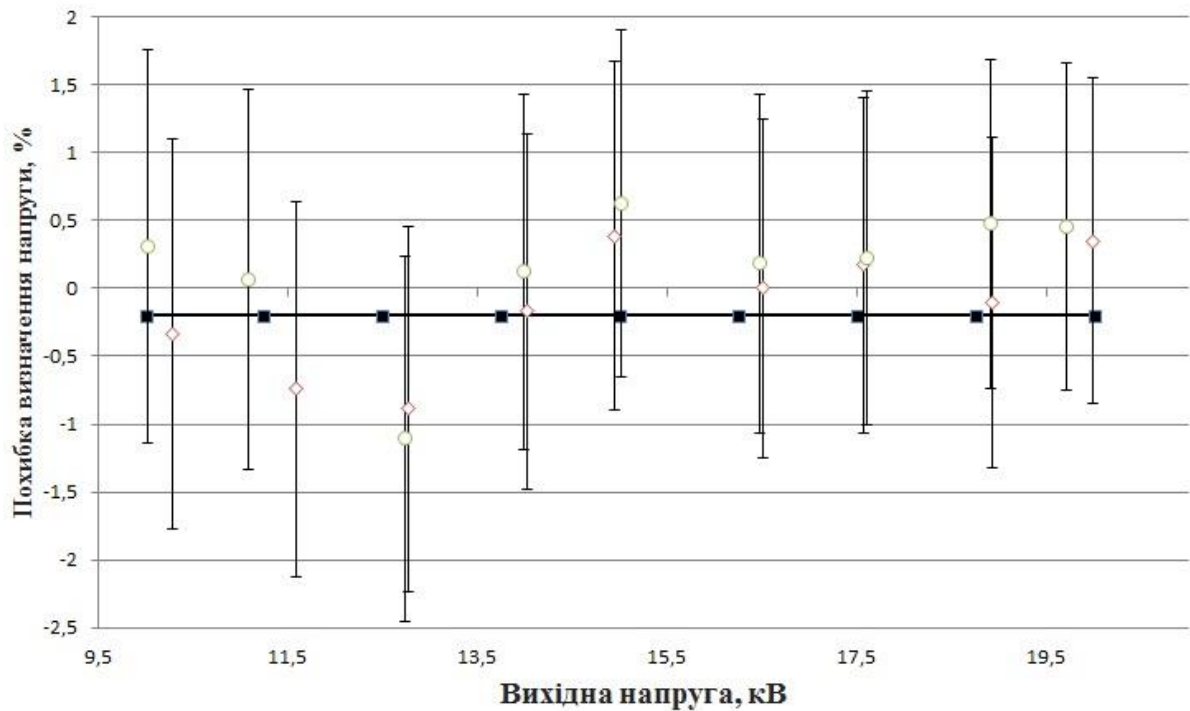


Рис. 4.18 Розрахункова похибка визначення високої випробувальної напруги ИОМ-100/25 за допомогою вимірювальної обмотки та номінального коефіцієнта ділення (1000) за результатами моделювання трансформатора в режимі холостого ходу з використанням коригуючої ємності 137 мкФ (показана суцільною лінією), у порівнянні з двома серіями експериментально одержаних значень (див. рис. 4.19) за схемою рис. 3.2 (відсутнє навантаження).

Підсумкова картина порівняння одержаних розрахункових результатів похибки визначення високої випробувальної напруги трансформатора ИОМ-100/25 за вимірювальною обмоткою з коригуючою ємністю з експериментальними даними показана на рис. 4.19.

Слід відзначити, що ємність 137 мкФ була визначена розрахунками таким чином, щоб забезпечити мінімальну розрахункову похибку визначення напруги на обмотці ВН за допомогою вимірювальної обмотки за ємнісного навантаження ИОМ-100/25, яке відповідає підключенню на його вихід випробуваної ізоляції електрообладнання. Дана ємність 137 мкФ відповідає ємності, яка використовувалась експериментально, і за якої одержані похибки в експериментальних дослідженнях ИОМ-100/25 з вимірювальною

обмоткою. Як можна бачити з рис. 4.19, діапазон похибки визначення випробувальної напруги за результатами експерименту з використанням коригуючої ємності 137 мкФ не перевищує 1...2,5% для розглянутих режимів, що є цілком прийнятним для проведення високовольтних випробувань високою напругою змінного струму частоти 50 Гц за стандартом ІЕС 60060-2 [92] та ГОСТ 17512-82 [108].

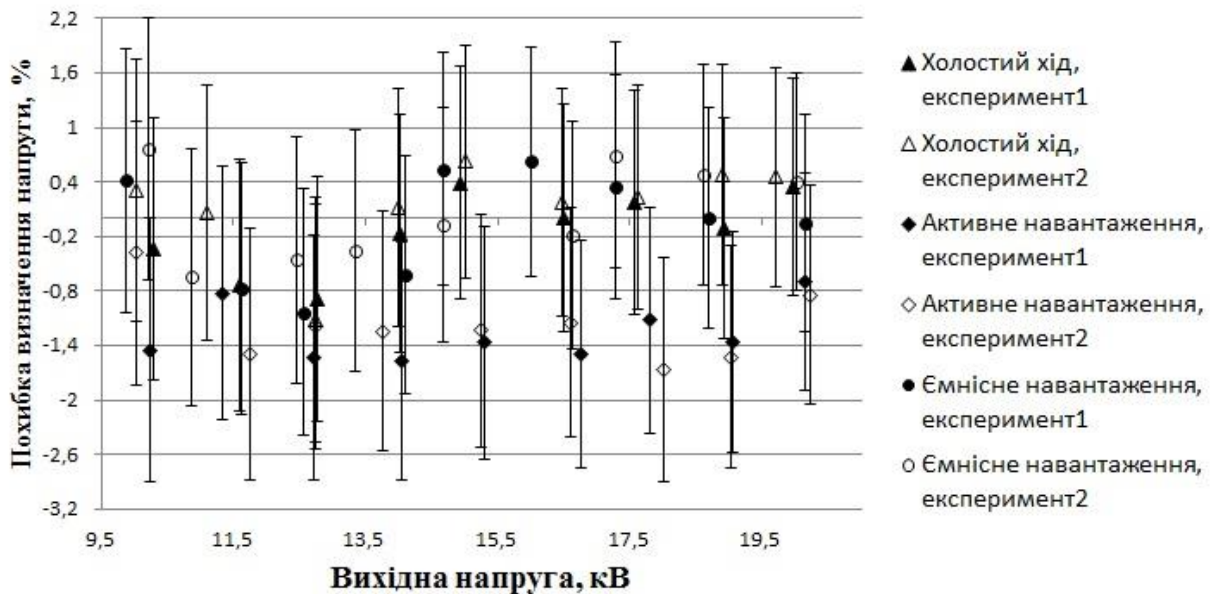


Рис. 4.19 Підсумкові експериментальні дані похибок визначення високої випробувальної напруги ИОМ-100/25 з вимірювальною обмоткою за різних режимів навантаження з використанням коригуючої ємності 137 мкФ, з урахуванням розкиду експериментальних значень, обумовленого похибками вимірювальних приладів, одержані за схемою рис. 3.2.

Ще однією розробкою, в якій приймав участь автор даної роботи і яка має відношення до розрахунків характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів з вимірювальною обмоткою, можна вважати розробку та виготовлення на замовлення ЦЕС ДП «НЕК «Укренерго» у 2008 році високовольтного випробувального трансформатора ВТН-180 на напругу до 180 кВ. В цьому трансформаторі, в діапазоні від 0 до 8000 Вт (!) зміни потужності його навантаження було забезпечено похибку визначення високої

випробувальної напруги за допомогою вимірювальної обмотки та спеціалізованого вольтметра в межах нормованого значення 0-3%.

Потреба у виготовленні такого трансформатору виникла внаслідок того, що новий Державний нормативний акт про охорону праці НПАОП 40.1-1.07-01 (ДНАОП 1.1.10-1.07-01) [109] вимагає випробовувати ізолювальні штанги класу 330 кВ трикратною робочою фазною напругою, допускаючи при цьому випробовувати штанги окремими ділянками, поділяючи штангу не більше ніж на 4 частини та збільшуючи при цьому випробувальну напругу на 20%. Це означає, що випробувальна напруга на одній ділянці ізолювальної штанги повинна становити більше 170 кВ. Внаслідок цього неможливо використовувати для цих випробувань поширені у високовольтних лабораторіях випробувальні трансформатори типу ИОМ-100/25, розраховані на напругу до 100 кВ. Необхідно використовувати або каскади з випробувальних трансформаторів до 200 кВ, або використовувати випробувальні трансформатори на більші ніж 100 кВ напруги, кількість яких в лабораторіях країни обмежена.

На практиці це означає, що висота каскаду з випробувальних трансформаторів (наприклад, типу ИОМ-100/25) на напругу 100 кВ (якщо в таких однофазних випробувальних трансформаторах передбачена зв'язуюча обмотка) збільшиться вдвічі.

Але, оскільки такі випробувальні трансформатори не мають зв'язуючої обмотки, їх каскадне з'єднання на подвійну напругу вимагатиме використання трьох одиниць трансформаторів [99], що трикратно збільшує необхідну площу випробувального поля та масу каскаду.

Інший бік випробувань на напругу до 200 кВ – необхідна наявність вимірювальних трансформаторів напруги на відповідну напругу. Із ряду серійних трансформаторів напруги найбільш прийнятними для вимірювань високої напруги до 180 кВ є трансформатори типу НКФ–М–362 на клас напруги 330 кВ (однофазні). Габаритні розміри по висоті такого вимірювального трансформатора становлять близько 4м. Оскільки для

встановлення такого трансформатора на високовольтному випробувальному полі стеля приміщення повинна бути на 2,5 метри вище за найвищу точку високого потенціалу високовольтного обладнання класу 330 кВ, використовувати такі трансформатори можливо лише у високовольтних лабораторіях з висотою стелі близько 6 метрів. В Україні дуже мало закритих приміщень з такою висотою стелі, пристосованих під високовольтні випробувальні лабораторії. Утримувати такі високовольтні випробувальні лабораторії занадто дорого, а ізолювальних штанг та іншого обладнання класу 330 кВ, яке необхідно регулярно випробовувати відповідною випробувальною напругою, у відповідності до НПАОП 40.1-1.07-01, в господарствах електричних мереж цілком достатньо, щоб визнати проблематичним та невиправдано дорогим випробування високовольтної ізоляції класу 330 кВ на існуючих в Україні кількох високовольтних випробувальних полях, де можна випробовувати об'єкти напругою класу 330 кВ.

Тому, виникла необхідність розробки високовольтного випробувального трансформатора на напругу 180 кВ, який мав би засоби вимірювання його випробувальної напруги за допомогою автотрансформаторного перетворення напруги у високовольтній обмотці (відповідно до [91, 92]).

Для того, щоб високовольтний випробувальний трансформатор на напругу 180 кВ міг бути застосований у типових приміщеннях високовольтних випробувальних лабораторій країни, необхідно, щоб його висота була якомога меншою, а також він повинен бути забезпеченим «власними засобами» вимірювання високої напруги. Єдиним виходом в такому випадку є виконання високовольтної обмотки випробувального трансформатора на напругу 180 кВ у вигляді автотрансформаторного подільника напруги, до вихідної частини якої можна було б приєднувати низьковольтні вимірювальні пристрої (наприклад, вольтметри).

Певною складністю при розробці такого випробувального трансформатора є те, що серійні вимірювальні трансформатори на клас

напруги 330 кВ виконуються каскадом з двох модулів, тобто, мають два окремі магнітопроводи. Для виконання випробувального трансформатора на напругу 180 кВ лише на одному магнітопроводі аналогічних габаритів необхідне планування розташування каскаду на двох стрижнях магнітної системи (тобто, використовувати дві котушки високовольтної обмотки), застосовувати екрани для вирівнювання картини напруженості електричного поля, а також від'єднувати потенціал магнітопроводу від землі. Якщо не виконувати від'єднання потенціалу магнітопроводу від землі, обмотку можна буде виконати лише на одному стрижні магнітопроводу (з однією котушкою високовольтної обмотки), внаслідок чого габаритні розміри магнітопроводу повинні бути суттєво збільшені задля забезпечення умов електричної міцності в ізоляції активної частини трансформатора.

Врахування всіх вищезазначених проблемних моментів при проектуванні випробувального трансформатора на напругу 180 кВ дозволяє поєднати в одному корпусі високовольтного виробу функції високовольтного випробувального трансформатора та функції високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги.

Зовнішній вигляд розробленого та виготовленого трансформатора ВТН-180 представлений на рис. 4.20.

Розроблена конструкція трансформатора мала зменшені масогабаритні показники (висота 1,6 м, вага близько 420 кг) за рахунок виконання обмотки ВН каскадом на двох стрижнях двострижневого магнітопроводу. «Вимірювальна обмотка», аналогічно до трансформатора ИОМ-100/25, розташовується на початку обмотки ВН, що має у перерізі типову трапецієвидну форму (рис. 2.10) на котушках стрижнів магнітопроводу. Принципова схема трансформатора ВТН-180 наведена на рис. 4.21.

Для того, щоб позбутись надлишкових емнісних струмів у високовольтній автотрансформаторній обмотці випробувального трансформатора ВТН-180, причини появи яких детально пояснені в розділі 2 даної дисертаційної роботи, було виконано розрахунок кількості витків в

кожному шарі багат шарових котушок обмотки аналогічно поясненим вище розрахункам для автотрансформатора класу 10 кВ. Метою розрахунку було одержання умови рівності ємнісних струмів між шарами обмотки. Для цього використовувалась формула для кількості витків у шарі:  $N_x = N_0 \cdot r_0 / r_x$ , де  $N_0$  – кількість витків у найближчому до стрижня шарі обмотки;  $r_0$  – радіус намотки витків найближчого до стрижня шару обмотки;  $r_x$  – радіус намотки шару, для якого розраховується кількість витків  $N_x$ .



Рис. 4.20 Зовнішній вигляд високовольтного випробувального трансформатора ВТН-180 з «вимірювальною обмоткою»

Загальна кількість витків у котушці обмотки, що містила вихідну частину обмотки, становила 45056 витків проводу ПЕТД2-200 діаметром 0,224 мм. у 82 шарах. Загальна кількість витків у іншій котушці обмотки становила 45000 витків такого ж проводу у 82 шарах. Вимірювальний відвід високовольтної обмотки ВТН-180 виконувався від 90-го витка, починаючи від заземлюваного відводу цієї обмотки. Цей відвід повинен був забезпечувати номінальний коефіцієнт автотрансформаторного перетворення 1000. Низьковольтна обмотка трансформатора ВТН-180 складалась із 105 витків проводу ПЕТД2-200 2×2,24 мм.

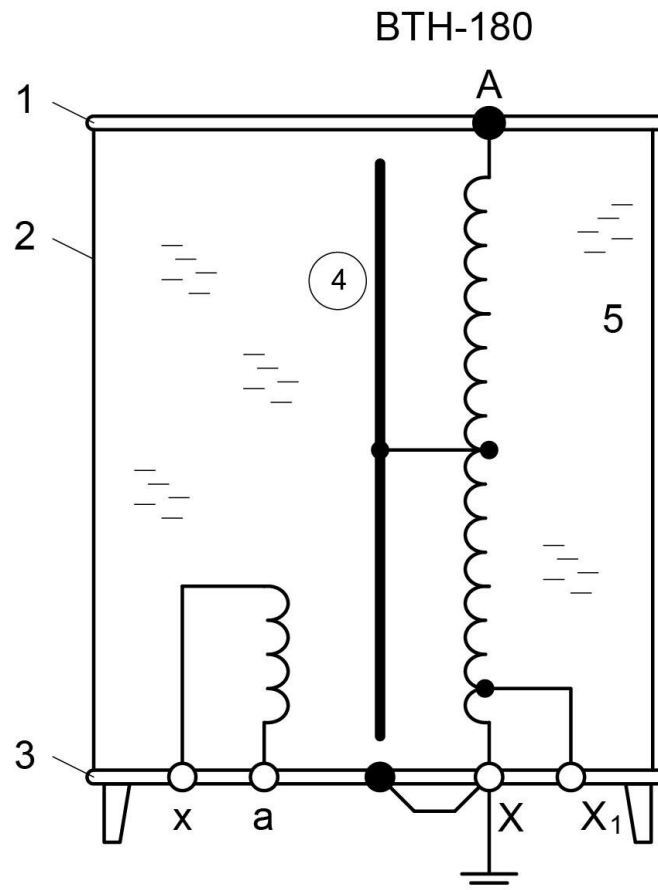


Рис. 4.21 Принципова схема високовольтного випробувального трансформатора ВТН-180: 1 – високовольтний фланець; 2 – ізоляційний корпус; 3 – заземлюваний фланець; 4 – магнітопровід; 5 – трансформаторне масло; х, а – відводи живлячої обмотки НН; X, А – відводи вихідної обмотки ВН; X, X<sub>1</sub> – відводи вимірювальної обмотки

Для намотування такої великої кількості витків проводу з його одночасною рівномірною укладкою поверх шару стрічки ізоляційного трансформаторного паперу використовувався станок універсальний намотувальний СУН-1,8М виробництва Товариства з додатковою відповідальністю «ЕЛТЕХ» (м. Нововолинськ) [119].

Високовольтна випробувальна установка ВВН-180 з випробувальним трансформатором ВТН-180 у її складі впроваджена в Київських МЕМ ЦЕС ДП «НЕК «Укренерго» (м. Вишневе). Відповідний акт впровадження наведений в Додатку В.

Проведені в дисертації дослідження вперше визначають теорію високовольтних випробувальних трансформаторів з «вимірювальною обмоткою» та відтворюють її експериментальне підтвердження.

Результати 4 розділу дисертаційної роботи опубліковані в статтях [41, 57, 93, 111, 113, 114, 115, 120].

#### **4.4 Висновки по Розділу 4**

4.4.1 Виконано порівняння експериментально одержаних даних приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання трансформатора напруги з результатами теоретичних розрахунків за запропонованою комплексною вісесиметричною моделлю, а також з тривимірною моделлю. Результати порівняння дозволяють рекомендувати для інженерних розрахунків приведеної еквівалентної індуктивності розсіювання високовольтних автотрансформаторів напруги запроповану комплексну вісесиметричну модель.

4.4.2 Вперше теоретично пояснені експериментальні дані аномально високих значень похибок визначення високої випробувальної напруги трансформатора ИОМ-100/25 за допомогою «вимірювальної обмотки» при його суттєвому ємнісному навантаженні.

4.4.3 Створено за теоретичними положеннями дисертаційної роботи високовольтний вимірювальний автотрансформатор класу напруги 10 кВ з

максимальною робочою напругою 19 кВ класу точності 0,05, впроваджений для роботи у складі Вторинного еталона України змінного струму частоти 50 Гц класу 110 кВ. Результати розрахунків характеристик високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги підтвержені даними державної метрологічної атестації.

4.4.4 Розроблено та виготовлено високовольтний випробувальний трансформатор на напругу 180 кВ, призначений для випробування високовольтної ізоляції у відповідності до НПАОП 40.1-1.07-01, зі зменшеними масогабаритними показниками, з високовольтною обмоткою, що використовує автотрансформаторне перетворення напруги, за допомогою якої можна визначати високу випробувальну напругу на об'єкті випробувань з показниками точності за стандартом ІЕС 60060-2 при зміні номінальної потужності його навантаження від 0 до 8000 Вт.

4.4.5 Порівняння одержаних експериментальних даних та результатів розрахунків за теоретичними матеріалами дисертаційної роботи підтверджують можливість суттєвого підвищення точності вимірювання випробувальної напруги високовольтного випробувального трансформатора ИОМ-100/25 з використанням коригуючої ємності за патентом України на винахід «Високовольтний випробувальний трансформатор напруги» № 102864: МПК Н01F 38/20, Н01F 38/24 авторів Бржезицького В. О., Гарана Я. О.; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № 201103746; заявл. 28.03.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 4 с.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розвитку методів математичного моделювання процесів автотрансформаторного перетворення високої напруги, визначення його характеристик на основі проведення за допомогою ПК чисельних розрахунків електричних та магнітних полів та удосконалення відповідних високовольтних вимірювальних пристроїв, у тому числі, досягнення суттєвого підвищення їхньої точності. Отримані результати роботи, в сукупності, мають істотне значення для розвитку техніки сильних електричних і магнітних полів та вимірювань високих напруг.

1. Еволюційний розвиток існуючих досліджень високовольтних трансформаторів напруги позбавив на даний час уваги важливий напрямок розвитку високовольтної вимірювальної техніки, що базується на автотрансформаторному масштабному перетворенні високої напруги. Можливість використання для вимірювання високої напруги автотрансформаторного перетворення відзначена у стандарті ДСТУ ІЕС 60044-2 та його нових редакціях.

2. Особливості виконання високовольтних автотрансформаторів напруги не дозволяють використовувати поширені формули розрахунку параметрів магнітного поля розсіювання, які застосовуються для силових автотрансформаторів за звичайної умови рівності нулю сумарної магніторушійної сили частин обмоток. Проте, перспективи роботи як високовольтних автотрансформаторів напруги, так і трансформаторів напруги в концепції «Smart Grid» вимагають переходу до розгляду режимів їх холостого ходу (або наближених до них режимів).

3. Вперше запропоновано метод вибору місця розташування вихідної частини обмотки автотрансформатора напруги, який дозволяє на етапі математичного моделювання одержувати задане значення його приведеної

еквівалентної індуктивності розсіювання. Запропонований метод може також бути поширеним на трансформатори напруги.

4. Удосконалено математичну модель розсіювання магнітного поля в високовольтному автотрансформаторі напруги, що дозволяє визначати дольові коефіцієнти впливу «стрижневого» та «ярмового» розсіювання. Виконано порівняння експериментально одержаних даних індуктивності розсіювання трансформатора напруги з результатами теоретичних розрахунків за запропонованою комплексною вісесиметричною моделлю, а також з тривимірною моделлю. Результати порівняння дозволяють рекомендувати для інженерних розрахунків індуктивності розсіювання високовольтних автотрансформаторів напруги запроповану комплексну модель з використанням сучасних програмних продуктів.

5. Отримав подальший розвиток аналіз впливу ємнісних струмів в обмотці високовольтного автотрансформатора напруги, які розглядаються як малі збурення для автотрансформатора класу 10 кВ, однак для автотрансформаторів класу 110 кВ і вище можуть бути порівняні зі струмом холостого ходу. Виявлено нелінійний характер розподілення ємнісної складової струму в витках обмотки та запропоновано векторну діаграму для визначення впливу цієї складової на розподіл напруги по витках обмотки високовольтного автотрансформатора напруги.

6. Вперше розроблено математичну модель високовольтного автотрансформатора напруги, в якій у систему рівнянь уведено використання часткових власних та взаємних індуктивностей розсіювання, що, на відміну від існуючих моделей, дозволяє визначати розподіл напруги по окремих витках (або групах витків) обмотки.

7. Вперше визначено особливості режимів високовольтних випробувальних трансформаторів, в яких відбувається комплексне трансформаторне та автотрансформаторне перетворення високої напруги, при якому з'являються аномально великі похибки вимірювання (з використанням вихідної частини високовольтної обмотки) високої

випробувальної напруги при суттєвому ємнісному навантаженні. Запропоновано метод коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора з використанням автотрансформаторного перетворення у високовольтній обмотці шляхом компенсації «надлишкової» індуктивності розсіювання вимірювальної обмотки за допомогою послідовного приєднання до її кола коригуючої ємності, на що одержано патент України на винахід «Високовольтний випробувальний трансформатор напруги».

**8.** Створено за теоретичними матеріалами дисертаційної роботи високовольтний вимірювальний автотрансформатор класу напруги 10 кВ з максимальною робочою напругою 19 кВ класу точності 0,05, впроваджений для роботи у складі Вторинного еталона України змінного струму частоти 50 Гц класу 110 кВ. Результати розрахунків характеристик високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги підтверджені даними державної метрологічної атестації.

**9.** Розроблено та виготовлено високовольтний випробувальний трансформатор на напругу 180 кВ, призначений для випробування високовольтної ізоляції у відповідності до НПАОП 40.1-1.07-01, зі зменшеними масогабаритними показниками, з високовольтною обмоткою, що використовує автотрансформаторне перетворення напруги, за допомогою якої можна визначати високу випробувальну напругу на об'єкті випробувань з показниками точності за стандартом ІЕС 60060-2 при зміні номінальної потужності його навантаження від 0 до 8000 Вт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
2. ГОСТ 13109-97. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – Введ. 1999 – 01 – 01. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1999. – 35 с.
3. ГОСТ Р 51317.4.30-2008. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии». – Введ. 2010 – 01 – 01. – М.: ФГУП «Стандартинформ». – 2009. – 60 с.
4. IEC 61000-4-30:2015. «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods». – Intr. 2015 – 02 – 20. IEC. – 2015. – 146 p.
5. ДСТУ IEC 61000-4-30:2010. «Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електроенергії» (IEC 61000-4-30:2008, IDT). – К.: ДП «УкрНДНЦ». – 2016. – 49 с.
6. ДСТУ EN 50160:2014. «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» (EN 50160:2010, IDT). – К.: Мінекономрозвитку України. – 2014. – 27 с.
7. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatability (EMC). Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods. – Intr. 2015 – 05 – 27. Dansk Standard. – 2015. – 74 p.
8. Стогний, Б. С. Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения / Б. С. Стогний – К.: Наук. думка, 1984, 272с.
9. Heathcote, M. J. The J & P Transformer Book / M. J. Heathcote – Newnes, Oxford, 2007. – 974 p.

10. Дымков А. М. Трансформаторы напряжения / А. М. Дымков. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 192 с. – (Трансформаторы; вып. 10).
11. Дымков А. М. Трансформаторы напряжения. / А. М. Дымков, В. М. Кибель, Ю. В. Тишенин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1975. – 200 с. – (Трансформаторы; вып. 27).
12. Шнейдер, Г. Я. Электрическая изоляция трансформаторов высокого напряжения / Г. Я. Шнейдер // М.: «Знак», 2009. – 160 с.
13. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1976. – 544 с.
14. De Leon, F. Efficient calculation of elementary parameters of transformers / F. de Leon, A. Semlyen // Transactions on Power Delivery, 1992, Vol. 7, No.1, pp 376 – 383.
15. Kashtiban, A.M. Finite Element Calculation of Winding Type Effect on Leakage Flux in Single Phase Shell Type Transformers / A.M. Kashtiban, A.R. Milani, M.T. Haque // Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, March 12-14, 2006, pp 39 – 43.
16. Azizian, D. Calculating Leakage Inductances of Split-Windings in Dry-Type Traction Transformers / D. Azizian, M. Vakilian, J. Faiz, M. Bigdeli // ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, 2012, Vol.10, No.1, pp 17 – 24.
17. Hoer, C. A. 2:1 Ratio Inductive Voltage Divider With Less Than 0.1 PPM Error to 1 MHz / C. A. Hoer, W. L. Smith // Journal of Research of the National Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation, Vol. 71C, No. 2, 1967.
18. Avramov-Zamurovic, S. Binary Versus Decade Inductive Voltage Divider Comparison and Error Decomposition / S. Avramov-Zamurovic, G. Stenbakken, A. Koffman, N. Oldham, R. Gammon // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. Vol. 44, No. 4, 1995.

19. Tsutsumi, S. A Two-Stage Inductive Voltage Divider Using a Special Winding Method / S. Tsutsumi // *Electrical Engineering in Japan*, 2014, Vol. 187, No. 4, pp. 10-17.
20. Avramov-Zamurovic, S. A Lecture on Accurate Inductive Voltage Dividers / S. Avramov-Zamurovic, B. Waltrip, A. Koffman, G. Piper // *Proceedings of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, 2002.
21. Бржезицький В. О. «Техніка і електрофізика високих напруг»: Навч. посібник / В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков та ін. / За ред. В.О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків НТУ ХПІ –Торнадо, 2005. – 930 с.
22. Kuffel, E. High Voltage Engineering. Fundamentals / E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel – 12nd ed. – Newnes, Oxford. – 2000. – 534 p.
23. Бржезицкий В. А. О частотной зависимости характеристик емкостно-омического делителя напряжения / В. А. Бржезицкий, М. Е. Иерусалимов, А. Р. Проценко // *Техническая электродинамика*. – 1987. – № 1. – с. 3-7.
24. Бржезицький В. О. Частотні характеристики високовольтних подільників напруги. / В. О. Бржезицький, О. Р. Проценко, В. М. Кікало // *Технічна электродинаміка*. – 2007. – № 5– с. 66-70.
25. Атарод С. Характеристики високовольтних подільників напруги, призначених для вимірювання показників якості електроенергії / С. Атарод, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. – 2013. – №51. – с.91-102.
26. Атарод С. Розрахунок наведеного потенціалу в задачі високовольтного подільника напруги / С. Атарод, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №4. – с. 65-67.
27. Гуревич В. Оптические трансформаторы тока: нужно быть реалистами / В. Гуревич // *Электрические сети и системы*. – 2010. – №4. – с. 73-76.

28. Измерительные комбинированные преобразователи тока и напряжения NXVCT–121/145/245/ 362/420/550/800: справочник покупателя. – 1-е изд. – 2007. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://pro-ln.ru/upload/Quick%20buying%20guide%20NXVCT.pdf>.

29. Гречухин В. Н. Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110-750 кВ станций и подстанций энергосистем / В. Н. Гречухин // Вестник ИГЭУ. – 2006. – №4. – с. 35-42.

30. Annabattula, J. Factors Influencing The Frequency Response Of Capacitive Voltage Transformer / J. Annabattula, D. Yelamanchi, T. S. Sirish // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2014. – Vol. 3, Issue 8, pp. 11079-11085.

31. Valverde V. Ferroresonance Suppression in Voltage Transformers / V. Valverde, J. Mazón, G. Buigues, I. Zamora // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 1a/2012, pp. 137 -140.

32. Moses P. S. Modelling Ferroresonance in Single-Phase Transformer Cores with Hysteresis / P. S. Moses, M. A. S. Masoum // Recent Advances in System Science and Simulation in Engineering: Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING, University of Genova, Genova, Italy October 17-19, 2009, pp. 246-250, ISSN: 1790-2769, ISBN: 978-960-474-131-1.

33. Zenk, H. High Voltage Instrument Transformers Ferroresonance Events Occurring in the Investigation of the Circuit Breaker Switch Positions / H. Zenk, A. S. Akpınar // Electrical and Electronic Engineering, 2014. – No. 4, pp. 10-19.

34. Попов А. Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции / А. Попов // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». – Тернопіль 2010. – с. 116.

35. Саенко Ю. Л. Эффективность применения антирезонансных трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях с изолированной

нейтралью / Ю. Л. Саенко, А. С. Попов // Електрифікація транспорту, № 4. – 2012. – с. 38-43.

36. ДСТУ ІЕС 60044-2:2008. «Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Трансформатори напруги індуктивні». – Введ. 2010 – 01 – 01. – К.: Держспоживстандарт України. – 2010. – 34 с.

37. ДСТУ ГОСТ 23625-2003. «Трансформатори напруги вимірювальні лабораторні. Загальні технічні умови». – Введ. 2003 – 07 – 01. – К.: Держспоживстандарт України. – 2003. – 20 с.

38. Зевеке Г. В. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

39. Вольдек А. И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. Заведений / А. И. Вольдек – 3-е изд. – перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с., ил.

40. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебник / Г. С. Зиновьев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – Ч.2 – 197 с.

41. Бржезицький В. О. Трансформування вищих гармонічних складових напруги електромагнітними трансформаторами (експериментальне дослідження) / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Наукові праці НУХТ. – 2013. – № 49. – с. 98-103.

42. Kaczmarek, M. Application of instrument transformers in power quality assessment / M. Kaczmarek, R. Nowicz //, Proc. Modern Electric Power Systems - MEPS 2010, ID-100, CD-ROM (2011).

43. Łuszcz, J. Voltage Harmonics Transfer through Medium Voltage Instrument Transformers / J. Łuszcz // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 Nr 8/2012, pp 54 – 56.

44. Lamedica, R. Instrument Voltage Transformer time-response to fast impulse / R. Lamedica, M. Pompili, B. A. Cauzillo, et al. // Proceedings of 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Minas Gerais. – 2016, pp 27 – 32.

45. Бржезицкий, В. А. Прецизионные масштабные измерительные преобразователи высокого напряжения переменного тока : дис. докт. техн. наук : 05.09.13 / Бржезицкий Владимир Александрович – Київ, 1992. – 513 с.
46. Бучковський, І. Р. Вплив режиму роботи трансформатора на частотні характеристики обмоток та їхніх частин / І. Р. Бучковський, М. Б. Сабат, О. Л. Никонець // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 707 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – с. 15-21.
47. Тугай, Ю. І. Моделювання ферорезонансу в трансформаторах напруги з урахуванням ефекту старіння сталі / Ю. І. Тугай, О. Б. Бесараб // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – с.62-64.
48. Hiraide, M. High frequency short-circuit inductance for model transformer / M. Hiraide, T. Koshizuka, E. Haginomori, Y. Taniguchi, H. Ikeda // Journal of International Council on Electrical Engineering, 2017 Vol. 7, No. 1, pp. 102–110.
49. Maekawa, T. Transformer Equivalent Model for Switching Transients Computation / T. Maekawa, S. Nishiwaki, H. Takahashi, T. Chigiri, O. Hosokawa, T. Saida // Journal of International Council on Electrical Engineering, 2011. – Vol. 1, No. 4, pp. 468-473.
50. Thein, M. M. Investigation of Transformer Model for TRV Calculation by Using Frequency Dependent Inductance Model / M. M. Thein, H. Toda, M. Hikita, H. Ikeda, E. Haginomori, T. Koshiduka // Journal of International Council on Electrical Engineering, 2011. – Vol. 1, No. 2, pp. 188-193.
51. Маліновський А. А. Математична модель трансформатора напруги НОМ-10 для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі / А. А. Маліновський, Є. Ю. Гущин, О. Л. Никонець // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2013. – № 763 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – с. 40-48.
52. Никонец, Л. А. Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН / 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.

53. Никонець Л. О. Оцінка адекватності математичної моделі трансформатора напруги НОМ-10 для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі / Л. О. Никонець, Є. Ю. Гуцин, П. П. Климук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2013. – № 763 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – с. 85-90.

54. Горелик Т. Г. Автоматизация энергообъектов с использованием технологии «цифровая подстанция». Первый российский прототип / Т. Г. Горелик, О. В. Кириенко // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №1. – с. 86 – 89.

55. ГОСТ 1983-2001. «Трансформаторы Напряжения. Общие технические условия». – Введ. 2001 – 11 – 01. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2006. – 32 с.

56. Вавин, В. Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи / В. Н. Вавин // М.: «Энергия». – 1967. – 104 с.

57. Бржезицький, В. О. Особливості характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №1. – с. 36-37.

58. ООО «ПО «Энергоспецтехника». Офіційна веб-сторінка. – 2017. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <http://www.esteh.ru>.

59. Петров, Г. Н. Трансформаторы. Основы теории. / Г. Н. Петров – М.: ОНТИ НКТП «Госэнергоиздат». – 1934. – Т1. – 434 с.

60. Тиховод, С. М. Расчет индуктивностей обмоток трансформатора, обусловленных магнитными потоками в воздухе / С. М. Тиховод, Г. М. Романиченко, И. О. Афанасьева // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – № 3. – с. 149-154.

61. Cheng, K. W. Modeling of Solenoidal Transformer for the Calculation of Leakage Inductance Using Eddy-Current Reaction Field / K. W. Cheng // IEEE Transactions on magnetics, 2005, Vol. 41, No. 5, pp 1996 – 1999.

62. Margueron, X. Analytical Calculation of Static Leakage Inductances of HF Transformers Using PEEC Formulas / X. Margueron, J. Keradec, D. Magot // IEEE Transactions on industry applications, 2007, Vol. 43, No. 4, pp 884 – 892.

63. Mazur, D. Calculating the main and leakage inductance matrix of the 3-column 15-winding autotransformer / D. Mazur, M. Gołębiowski // Archives of Electrical Engineering, 2011. – Vol. 60, pp. 215 – 222.

64. Маслюченко И. Н. Применение соленоидальных моделей обмоток для расчета индуктивности рассеяния силовых трансформаторов / И. Н. Маслюченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. № 4. – с. 36-40.

65. Билоус, О. А. Опытное определение первичных и вторичных индуктивностей рассеяния силового трансформатора с учетом неоднозначности этих индуктивностей / О. А. Билоус // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6. – с. 694-697.

66. Об электромагнитном рассеянии обмоток трансформаторов. Дискуссии / [М. Х. Зихерман, В. В. Карасев, Л. В. Лейтес и др.]. // Электричество. – 1983. – №9. – с. 60 – 69.

67. Chen, X. Negative inductance and numerical instability of the saturable transformer component in EMTP / X. Chen // IEEE Transaction on Power Delivery, 2000. – Vol. 15, No. 4, pp. 1199–1204.

68. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз: Пер. с англ. – М.: Мир. – 1981. – 304 с.

69. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук – М.: «Наука», 1977. – 456 с.

70. Мареев В. В., Станкова Е. Н. Основы методов конечных разностей / В. В. Мареев, Е. Н. Станкова – СПб.: Изд-во С.-Петербур. Ун-та, 2012. – 64 с.

71. COMSOL Inc. Офіційна веб-сторінка. – 2017. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <http://www.comsol.com/>.

72. ANSYS, Inc. Офіційна веб-сторінка. – 2017. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <http://www.ansys.com/About-ANSYS/>.

73. Agros2D. Офіційна веб-сторінка. – 2017. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <http://www.agros2d.org/>.

74. CSC - IT CENTER FOR SCIENCE LTD. Офіційна веб-сторінка. – 2017. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <https://www.csc.fi/web/elmer/>.

75. Khodakarami, A. Analysis of Auxiliary Winding Effect on the Leakage Inductance Reduction in the Pulse Transformer Using ANSYS / A. Khodakarami , S. M.Pedramrazi, H. F. Farahani // J. Electromagnetic Analysis & Applications, 2010. – No 2, p. 513-518.

76. Li, Y. Research on Numerical Simulation of 3D Leakage Magnetic Field and Short-circuit Impedance of Axial Dual-low-voltage Split-winding Transformer / Y. Li, L. Li, Y. Jing, F. Han // Energy and Power Engineering, 2013. – No. 5, pp. 1093-1096.

77. Flavio, A. Calculation of Power Transformers Equivalent Circuit Parameters Using Numerical Field Solutions / A. Flavio, L. Nogueira // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2013. – Vol. 17, Issue 1, pp. 19-26.

78. Sivananda, R. T. Improved Expression for Estimation of Leakage Inductance in E Core Transformer Using Energy Method [Електронний ресурс] / R. T. Sivananda, B. B. Mangesh, D. W. Yashwant, S. Purushottam // Advances in Power Electronics. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.hindawi.com/journals/ape/2012/635715/>.

79. Patel S. K. Effect of Parameter Variation on Leakage Reactance of Transformer Analyzed using FEM [Електронний ресурс] / S. K. Patel, N. P. Dave, H. M. Patel // IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ijssrd.com/articles/IJSRDV2I3277.pdf>.

80. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес – М.: «Энергия». – 1981. – 392 с.

81. Wilcox, D. J. Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings / D. J. Wilcox, W. G. Hurley, M. Conlon – IEE Proceedings C. – 1989. – Vol. 136, No. 5. – pp 308-314.

82. Бржезицький, В. О. Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів напруги за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. М. Десятов // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – с.61-63.

83. Zhao, S. P. Design and Implementation of a Frequency Response Test System for Instrument Voltage Transformer Performance Studies: A thesis for the degree of Doctor of Philosophy / Sen Peng Zhao – Manchester, 2013. – 259 p.

84. Bahmani, M. A. Accurate Evaluation of Leakage Inductance in High-Frequency Transformers Using an Improved Frequency-Dependent Expression / M. A. Bahmani, T. Thiringer // Conference paper of PCIM South America, Sao Paulo. – 2014. – pp. 275 – 282.

85. Бржезицький, В. О. Аналіз ємнісних струмів в обмотці високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4. – с. 70-76.

86. Dalessandro, L. Self-Capacitance of High-Voltage Transformers / L. Dalessandro, F. Cavalcante, J. Kolar // IEEE Transactions on power electronics. – 2007. – Vol. 22, No. 5. – p. 2081-2092.

87. Авруцкий, В. А. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента: Учебное пособие / В. А. Авруцкий, И. П. Кужекин, Е. Н. Чернов // М.: МЭИ. – 1983. – 264 с.

88. Техника высоких напряжений / [Акопян, А. А., Буткевич, Г. В., Дмоховская, Л. Ф. и др.]; Под ред. Л. И. Сиротинского. Ч. I. М-Л: Госэнергоиздат. – 1951. – 292 с.

89. Степанчук, К. Ф. Техника высоких напряжений: Учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / К. Ф. Степанчук, Н. А. Тиняков // Мн.: Выш. Школа. – 1982. – 367 с.

90. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 768 с.

91. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Введ. 1999 – 01 – 01. – ИПК Издательство стандартов. – 1998. – 35 с.

92. IEC 60060-2 : 2010. High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems. – International electrotechnical commission. – 2010. – 149 p.

93. Бржезицький, В. О., Гаран, Я. О. Коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 3. – с. 41-46.

94. Tułodziecki, B. High voltage test transformers, construction, design and their application in HV testing system / B. Tułodziecki // Przegląd Elektrotechniczny. – 2011. – No 1. – p. 195-198.

95. Грудинский, П. Г. Электротехнический справочник / [П. Г. Грудинский, Г. Н. Петрова, М. М. Соколова и др.]. // М.: «Энергия». – 1974. – Т1. – 776 с.

96. Бржезицький, В. О. Деталізація рівнянь трансформатора до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1. – с. 32-37.

97. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Введ. 1986 – 07 – 01. – ИПК Издательство стандартов. – 2002. – 39 с.

98. Brzhezitsky V. Mathematical model of high-voltage instrument autotransformer intended for use in Smart Grid networks / V. Brzhezitsky, Ya. Haran, Ye. Trotsenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – № 4/1 (36). – p. 50-54.

99. Федченко, И. К. Техника высоких напряжений. Спецвопросы / И. К. Федченко – К: ДТВУ. – 1963. – 320 с.

100. Патент України № 102864, МПК H01F 38/20, H01F 38/24. Високовольтний випробувальний трансформатор напруги / Бржезицький В. О., Гаран Я. О.; заявник та власник патента: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № 201103746; заявл. 28.03.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 4 с.

101. Евсюков А. А. Электротехника: Учеб. пособие для студентов физ. спец. пед. ин-тов / А. А. Евсюков – М.: Просвещение. – 1979. – 248 с.

102. Преображенский, А. А., Бишард, Е. Г. Магнитные материалы и элементы: Учебник для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики». – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.

103. Karban, P. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D / [P. Karban, F. Mach, P. Kus and etc.] // COMPUTING. – 2013. – Vol. 95, Issue 1 Supplement. – p. 381 – 408.

104. Mach, F. Finite Element 2D Model of Induction Heating of Rotating Billets in System of Permanent Magnets and its Experimental Verification / F. Mach, V. Starman, P. Karban, I. Dolezel, P. Kus // Transactions on Industrial Electronics, 2013, Volume 61, Issue: 5, pp. 2584 – 2591.

105. Nikolayev, D. Impedance analysis of transmission line cells for EMC applications using Agros2D / D. Nikolayev, Z. Kubik, P. Karban, J. Skala // Applied Mathematics and Computation, 2016, Vol. 50, pp. 381 – 387.

106. ГОСТ 3484.1-88. Трансформаторы силовые. Методы испытаний и измерений (Методы электромагнитных испытаний). – Введ. 90 – 01 – 01. – М.: Изд.-во стандартов. – 1989. – 181 с.

107. Афанасьев, В. В. Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, В. М. Адоньев, Л. В. Жалалис и др. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. – 344 с.

108. ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким

напряженим. – Введ. 1984 – 01 – 01. – М.: ИПК Издательство станартов. – 2003. – 22 с.

109.НПАОП 40.1-1.07-01. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. – Затв. Наказ Мін. праці та соц. політики України. – 2001. – № 253. – 103 с.

110.Бржезицький В. О. Визначення картини поля обмоток високовольтного трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – с. 21-23.

111.В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран Експериментальна перевірка методу розрахунку індуктивності розсіювання високовольтних трансформаторів напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2014. – с. 326-328.

112.В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран До розрахунку індуктивності розсіювання високовольтного трансформатора напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2013. – с. 480-484.

113.Анохин Ю. Л. Испытательные трансформаторы с требованиями точности измерения высокого напряжения / Ю. Л. Анохин, В. А. Бржезицкий, Я. А. Гаран, В. В. Копшин // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VII наук.-практ. конф. – К.: АВЕГА. – 2010. – с. 81-85.

114.Бржезицкий В. А. Новое качество измерителей высокого напряжения ВВН-0,8-100 М / [В. А. Бржезицкий, Р. В. Вендичанский, Я. А. Гаран и др.] // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VII наук.-практ. конф. – К.: АВЕГА. – 2010. – с. 81-85.

115.Бржезицький В. О. Коректування високовольтного випробувального трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Доповіді за

матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т 2. – 453 с. – с. 280-282.

116.Бржезицький В. О. До розрахунку магнітного поля кругового контуру зі струмом з урахуванням феромагнітного осердя / В. О. Бржезицький, Я.О. Гаран, О. М. Десятов // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т2. – 453 с. – с. 283-285.

117.Бржезицький В. О. Тестування аналітичних виразів складових напруженості магнітного поля кругового витка зі струмом / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. П. Дацюк // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2010. – 600 с. – с. 483-485.

118.Бржезицький, В. О. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, М. Ю. Лапоша // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 6. – с. 50-54.

119.Товариство з додатковою відповідальністю «ЕЛТЕХ». Офіційна веб-сторінка. – 2018. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: [http://www.eltech.com.ua/index\\_ua.html](http://www.eltech.com.ua/index_ua.html).

120.Абрамов В. Б. Испытательный трансформатор напряжением 180 кВ с гарантированной точностью его измерения / [Абрамов В. Б., Анохин Ю. Л., Бржезицкий В. А., Гаран Я. А. и др.] // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 5. – с. 100-101.

## Додаток А

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації**

1. Бржезицький В. О. Трансформування вищих гармонічних складових напруги електромагнітними трансформаторами (експериментальне дослідження) / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Наукові праці НУХТ. – 2013. – № 49. – с. 98-103.
2. Бржезицький, В. О. Особливості характеристик високовольтних випробувальних трансформаторів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №1. – с. 36-37.
3. Бржезицький, В. О. Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів напруги за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. М. Десятов // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – с.61-63.
4. Бржезицький, В. О. Аналіз ємнісних струмів в обмотці високовольтного вимірювального автотрансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 4. – с. 70-76.
5. Бржезицький, В. О. Коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 3. – с. 41-46.
6. Бржезицький, В. О. Деталізація рівнянь трансформатора до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1. – с. 32-37.
7. Brzhezitsky V. Mathematical model of high-voltage instrument autotransformer intended for use in Smart Grid networks / V. Brzhezitsky, Ya. Haran, Ye. Trotsenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – № 4/1 (36). – p. 50-54.

8. Патент України № 102864, МПК H01F 38/20, H01F 38/24. Високовольтний випробувальний трансформатор напруги / Бржезицький В. О., Гаран Я. О.; заявник та власник патента: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № 201103746; заявл. 28.03.2011; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. – 4 с.

9. Бржезицький В. О. Визначення картини поля обмоток високовольтного трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – с. 21-23.

10. Анохин Ю. Л. Испытательные трансформаторы с требованиями точности измерения высокого напряжения / Ю. Л. Анохин, В. А. Бржезицкий, Я. А. Гаран, В. В. Копшин // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VII наук.-практ. конф. – К.: АВЕГА. – 2010. – с. 81-85.

11. В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран Експериментальна перевірка методу розрахунку індуктивності розсіювання високовольтних трансформаторів напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2014. – с. 326-328.

12. В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран До розрахунку індуктивності розсіювання високовольтного трансформатора напруги // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2013. – с. 480-484.

13. Бржезицький В. О. Коректування високовольтного випробувального трансформатора напруги / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т 2. – 453 с. – с. 280-282.

14. Бржезицький В. О. До розрахунку магнітного поля кругового контуру зі струмом з урахуванням феромагнітного осердя / В. О. Бржезицький, Я.О. Гаран, О. М. Десятов // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2009. – Т2, с. 283-285.

15. Бржезицький В. О. Тестування аналітичних виразів складових напруженості магнітного поля кругового витка зі струмом / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. П. Дацюк // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: «Політехніка». – 2010, с. 483-485.

16. Бржезицький, В. О. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, М. Ю. Лапоша // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 6. – с. 50-54.

17. Абрамов В. Б. Испытательный трансформатор напряжением 180 кВ с гарантированной точностью его измерения / [Абрамов В. Б., Анохин Ю. Л., Бржезицкий В. А., Гаран Я. А. и др.] // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 5. – с. 100-101.

Результати дисертаційної роботи доповідались:

– на Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», (м. Київ) у 2008, 2009 рр.;

– на Міжнародному симпозіумі SIEMA`2009 «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів» (м. Харків);

– на VII науково-практичній конференції «Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні», 9 – 10 червня 2009 р. (м. Київ);

– на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки»: у м. Вінниця, 2012 р. та у м. Київ, 2014 р;

– на Міжнародному симпозіумі SIEMA`2016 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (м. Харків).

## Додаток Б

## Результати впровадження розробленого автотрансформатора класу напруги 10 кВ

<p style="text-align: center;"><b>«УЗГОДЖЕНО»</b></p> <p>Декан факультету електроенергетехніки та автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського, д.т.н., професор</p> <p style="text-align: right;">Яндульський О. С. _____ 20 <u>18</u> р.</p>	<p style="text-align: center;"><b>«ЗАТВЕРДЖУЮ»</b></p> <p>Директор науково-виробничого інституту вимірювань електромагнітних величин та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки ДП «Укрметртестстандарт», д.т.н., професор</p> <p style="text-align: right;">Величко О. М. _____ 20 <u>18</u> р.</p>
<p><b>АКТ</b></p> <p><i>впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи асистента кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Гарана Ярослава Олександровича, виконаної на тему «Удосконалення високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги»</i></p>	
<p>Ми, які підписалися нижче, професор кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Бржезицький Володимир Олександрович та начальник науково-дослідного відділу № 29 ДП «Укрметртестстандарт» Анохін Юрій Леонідович склали даний акт про те, що основні положення та результати наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук асистента кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Гарана Ярослава Олександровича, які стосуються впливу індуктивності розсіювання в окремих витках та групах витків обмоток автотрансформаторів напруги, а також ємнісних струмів в обмотках високовольтних автотрансформаторів напруги на розподіл напруги по витках, впроваджені у виробництво в Науково- виробничому інституті вимірювань електромагнітних величин та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки ДП «Укрметртестстандарт» в експериментальному зразку високовольтного багатодіапазонного автотрансформатора класу напруги 10 кВ класу точності 0,05, призначеного для роботи у складі Вторинного еталона високої напруги змінного струму частоти 50 Гц класу 110 кВ.</p>	
<p><b>Від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</b></p> <p>Науковий керівник, професор кафедри теоретичної електротехніки, д.т.н., професор</p> <p style="text-align: right;"><i>Володимир Олександрович Бржезицький</i> Бржезицький В. О. _____ 20 <u>18</u> р.</p> <p style="text-align: right;"><i>Зав. вип. ТЕ (ІП) Особ. вироб. М. Я.</i></p>	<p><b>Від Науково-виробничого інституту вимірювань електромагнітних величин та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки ДП «Укрметртестстандарт»</b></p> <p>Начальник науково-дослідного відділу № 29 ДП «Укрметртестстандарт»</p> <p style="text-align: right;"><i>Юрій Леонідович Анохін</i> Анохін Ю. Л. _____ 20 <u>18</u> р.</p>

## Додаток В

## Результати впровадження високовольтного випробувального трансформатора ВТН-180

«УЗГОДЖЕНО»

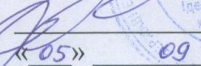
Декан факультету  
електроенерготехніки та  
автоматики КПІ ім. Ігоря  
Сікорського, професор, д. т. н.

 Яндульський О. С.  
« 04 » 09 20 18 р.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник Департаменту  
електричних підстанцій  
Центральної ЕС  
ДП «НЕК «Укренерго»

 Павліченко В. І.  
« 05 » 09 20 18 р.




## АКТ

*впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи  
асистента кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського  
Гарана Ярослава Олександровича, виконаної на тему «Удосконалення  
високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують  
автотрансформаторне перетворення напруги»*

Ми, які підписалися нижче, професор кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського Бржезицький Володимир Олександрович та начальник відділу діагностики, ізоляції, захисту від перенапруг Центральної ЕС ДП «НЕК «Укренерго» Жиглов Леонід Михайлович склали даний акт про те, що основні положення та результати наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук асистента кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Гарана Ярослава Олександровича, які стосуються автотрансформаторного перетворення напруги в високовольтній обмотці випробувальних трансформаторів, впроваджені у виробництво у відділі діагностики, ізоляції, захисту від перенапруг Центральної ЕС ДП «НЕК «Укренерго» в експериментальному зразку високовольтного випробувального трансформатора ВТН-180, призначеного для роботи у складі високовольтної випробувальної установки ВВН-180, атестованої Державним підприємством «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»).

**Від Національного технічного  
університету України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського»**

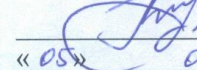
Науковий керівник, професор  
кафедри теоретичної  
електротехніки, д. т. н.

 Бржезицький В. О.  
« 04 » 09 20 18 р.

*Зав. упр. ТЕП Островерхов М.Я.*

**Від Центральної  
електроенергетичної системи  
ДП «НЕК «Укренерго»**

Начальник відділу діагностики,  
ізоляції, захисту від перенапруг  
Центральної ЕС

 Жиглов Л.М.  
« 05 » 09 20 18 р.

## Додаток Г

## Результати впровадження теоретичних положень за темою дисертації в навчальний процес

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан факультету  
електроенерготехніки та автоматики  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
професор, д.т.н.

Яндульський О. С.  
«09» \_\_\_\_\_ 20 18 р.

## АКТ

впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів, виконаної асистентом кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Гараном Ярославом Олександровичем на тему:

**«Удосконалення високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги».**

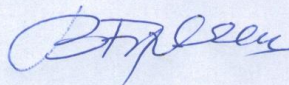
Ми, які підписалися нижче, завідувач кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського професор, д.т.н. Островерхов М. Я. та професор кафедри теоретичної електротехніки, д.т.н. Бржезицький В. О. склали даний акт про те, що результати Розділу 3 дисертаційної роботи «Масштабне перетворення напруги в високовольтних пристроях, в яких відбувається комплексне автотрансформаторне та трансформаторне перетворення напруги» впроваджено в навчальний процес кафедри техніки і електрофізики високих напруг в лекційному матеріалі за Темою 4 «Масштабні перетворювачі високої напруги» та в лабораторній роботі «Дослідження вимірювальної системи високої напруги постійного та змінного струмів ВСВН-0,8-100М» з кредитного модуля «Вимірювання високих напруг і великих струмів», що вивчається в 9-му семестрі студентами, які здобувають освітній ступінь «Магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та спеціалізацією «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси».

Завідувач кафедри  
теоретичної електротехніки,  
професор, д. т. н.



Островерхов М. Я.

Науковий керівник здобувача,  
професор, д.т.н.



Бржезицький В. О.