

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

ЛАПОША МИКОЛА ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.315.62

ДИСЕРТАЦІЯ

Підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад

05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

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

_____ / М.Ю. Лапоша /

Науковий керівник:

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Лапоша М.Ю. Підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад – 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, 2020 р.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню електромагнітних процесів в установках для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад. Науковий інтерес цієї роботи зумовлений зростанням вимог міжнародних стандартів до зниження рівня електромагнітних завад високовольтних ізоляторів, що, в свою чергу, потребує підвищення ефективності відповідних випробувальних установок та обумовлює необхідність належного коригування їх складових елементів на основі розрахунку і узгодження розподілення електричних та магнітних полів, методів теорії кіл з розподіленими параметрами та розширеного використання сучасної обчислювальної техніки.

На характеристики високовольтних ізоляторів впливають нелінійні електророзрядні процеси в них, що побічно викликають електромагнітні завади. Електромагнітні завади від ізоляторів пов'язані з явищами, що відбуваються на їх поверхні, а саме з розрядами, викликаними збільшенням локальних градієнтів потенціалу, коронними розрядами, обумовленими неоднорідностями у вигляді нальотів сухих речовин або крапель води або іскрінням на сухих ділянках, викликаним струмами витоку на забруднених ізоляторах. Електромагнітні завади можуть бути також викликані іскрінням у внутрішніх раковинах або тріщинах, а також в результаті розрядів між цементно-піщаним закладенням і

порцеляною або склом, якщо на стиках між ними є повітряні проміжки. Це в свою чергу впливає на екологію навколишнього середовища, а також на якість інтернет зв'язку, радіо- і телеєфіру з урахуванням зростання вимог міжнародних стандартів до рівня електромагнітних завад від працюючих електротехнічних пристроїв та електроустаткування.

Існуюче електрообладнання та установки для випробувань високовольтних ізоляторів не мають достатнього порогу чутливості та характеризуються високим рівнем зовнішніх електромагнітних завад (фону установок). Це в свою чергу призводить до нестабільності визначення рівня електромагнітних завад, створюваних випробуваними об'єктами – ізоляторами.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля в елементах відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень. Отримані наукові результати мають істотне значення для розвитку техніки сильних електричних та магнітних полів, а також практики випробувань електроустаткування на допустимий рівень електромагнітних завад.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, подано загальну характеристику роботи, сформульована її мета, основні завдання та наукова новизна досліджень. Представлена інформація про практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації.

В першому розділі дисертації виконано огляд літературних джерел, пов'язаних з обраним завданням досліджень. Розглянуто особливості застосування підвісних високовольтних ізоляторів. Відмічено, що на більшості високовольтних ліній та підстанцій ізолюючими елементами гірлянд залишаються скляні тарілчасті ізолятори. Зазначено загальні вимоги до конструктивного виконання та характеристик підвісних тарілчастих ізоляторів.

Визначено можливі причини виникнення електромагнітних завад від ізоляторів та їх вплив на навколишнє середовище, зокрема, приймання радіо- і телевізійних програм. Розглянуто допустимі рівні електромагнітних завад при нормованих напругах ізоляторів, а також норми рівня електромагнітних завад ліній електропередач різних країн.

Проведений аналіз вимог регламентуючого міжнародного нормативного документа CISPR 18-2 щодо методів випробування та процедури встановлення норм електромагнітних завад високовольтних ізоляторів, за яким визначено умови випробувань та граничні нормовані значення зовнішніх електромагнітних завад як ізоляторів, так і випробувальних установок.

Описано схеми існуючих установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад та охарактеризовані особливості виконання основних елементів установок. Встановлено, що елементи цих установок являють собою громіздкі конструкції, які розраховані на роботу при низьких частотах. При роботі таких схем на високих частотах, відбувається спотворення ємнісних та індуктивних складових струмів цих елементів, що призводить до нестабільності результатів випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад. Крім того, значні розміри цих елементів унеможливають обов'язкове екранування активних частин установок від зовнішніх електромагнітних завад.

З метою розробки малогабаритних високовольтних високочастотних загороджувачів, які є одними з основних елементів установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, розглянуто питання використання високочастотних загороджувачів на лініях електропередач, та з'ясовано неможливість їх використання у відповідних установках.

Аналіз літературних джерел та наукових досліджень дозволив виявити ряд невіршених питань, що стосуються актуальної проблематики випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.

В другому розділі дисертації представлені наукові досягнення автора щодо регулювання електричного поля у соленоїдальній котушці індуктивності високочастотного загороджувача шляхом виконання формування її ізоляційного остову, що забезпечує узгодження розподілення електричного потенціалу в котушці з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу.

Запропоновано математичну модель компенсуючого реактора високочастотного загороджувача, що дозволяє враховувати параметри його окремих витків та провідників при застосуванні сучасної обчислювальної техніки, що на відміну від існуючих напрацювань, не потребує складного апарату аналітичних функцій. Практичне відтворення даної моделі дозволить забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувача та різке збільшення його прохідного опору.

З використанням теорії планування багатофакторного експерименту та розрахунків електричного поля котушки індуктивності високочастотного загороджувача виконано на персональному комп'ютері оптимізацію форми ізоляційного остову котушки, що забезпечує узгодження її електричного потенціалу з індукованим магнітним полем котушки потенціалом до 1 %.

В третьому розділі дисертації міститься інформація про розробку, виготовлення та впровадження нової установки для випробувань високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад з використанням теоретичних положень, викладених в дисертації. Особлива увага приділена нормованому діапазону вимірювань рівня електромагнітних завад високовольтних ізоляторів для створеної установки, яка за своїми показниками суттєво перевищує вимоги до відповідних випробувальних установок, визначених міжнародними стандартами CISPR 18-2, IEC 60437.

Наведено результати калібрування установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, за якими встановлено рівень зовнішніх електромагнітних завад (фону установки)

та нормативні значення параметрів установки (для базисних частот електромагнітних завад 0,5 МГц та 1,0 МГц).

На основі експериментальних досліджень рівня електромагнітних завад високовольтних ізоляторів встановлено характер впливу конструктивного виконання ізолятора (глибини армування стрижня і нанесення полімерного покриття) на рівень електромагнітних завад та показано їх несуттєве значення для подальшого зменшення рівня електромагнітних завад. Це підтверджує сформульоване в даній роботі припущення про необхідність подальшого подолання виникнення електромагнітних завад у внутрішній ізоляції ізоляторів.

В четвертому розділі дисертації запропоновані рекомендації щодо зниження рівня електромагнітних завад від високовольтних ізоляторів, які потребують при їх розробці врахування розподілення електричного поля, створюваного в конструкції ізолятора, а також зміни цього поля внаслідок впливу різних факторів.

Запропоновано удосконалення високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів на прикладі типового ізолятора ПС 120Б, яке полягає у виконанні стрижня ізолятора з профілюванням його конічної частини при забезпеченні незмінності механічних напружень в цементно-піщаному закладенні та врахуванні співвідношень розмірів стрижня ізолятора.

Визначено порогові значення напруги на ізоляторі, які пов'язані з виникненням часткових розрядів в повітряних мікровключеннях цементно-піщаного закладення.

Використання запропонованої удосконаленої конструкції ізоляторів дозволяє знизити максимальну напруженість електричного поля в області їх цементно-піщаного закладення стрижня в 2,14 рази, що забезпечує зниження рівня електромагнітних завад високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів.

Виконано порівняння експериментально одержаних даних рівня електромагнітних завад контрольних зразків типових високовольтних ізоляторів із ізоляторами удосконаленої конструкції, яка передбачає профілювання конічної частини стрижня ізолятора. Встановлено, що усереднений рівень

електромагнітних завад експериментальних зразків високовольтних ізоляторів з радіусом заокруглення конічної частини стрижня $R = 3,5$ мм в порівнянні з контрольними зразками ізоляторів типу ПС 120Б зменшений на 16...29 дБ при випробувальних напругах 10...30 кВ.

Наукова новизна одержаних в дисертаційній роботі результатів:

1. Вперше розроблено математичну модель реактора високочастотного загороджувача, яка на відміну від існуючих моделей, враховує вплив індуктивності та взаємоіндуктивності окремих витків та частин провідників, а також їхню ємність, що дозволяє забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувача на задану високу частоту та суттєво збільшити його прохідний опір.

2. Розвинуто метод регулювання електричного поля в котушці індуктивності високочастотного загороджувача шляхом формування її ізоляційного остову, що дозволяє узгодити розподілення електричного потенціалу з розподіленням індукovanого магнітним полем котушки потенціалу, а також послабити негативний вплив зовнішніх електромагнітних полів.

3. Знайшло подальший розвиток визначення залежності граничних значень напруг виникнення часткових розрядів від розмірів повітряних мікровключень у цементно-піщаному закладенні високовольтного ізолятора, які обумовлені електричним пробоем цих мікровключень, що дозволяє прогнозувати порогові значення напруги появи електромагнітних завад ізоляторів.

4. Вперше запропоновані взаємозалежності лінійних розмірів профілювання конічної частини сталевго стрижня ізолятора, які виходять із забезпечення незмінності напружень стискання та зрізу в його цементно-піщаному закладенні, що дозволяє досягти зниження локальних значень напруженості електричного поля та рівня електромагнітних завад ізолятора.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в установці для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад у Товаристві з обмеженою відповідальністю «Львівська

ізоляторна компанія», а також в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

Ключові слова: високовольтний ізолятор, високочастотна котушка індуктивності, високочастотний загороджувач, електричне поле, електричний потенціал, індукований потенціал, рівень електромагнітних завад, симплекс-метод.

ABSTRACT

Laposha M.Y. Electrical equipment efficiency increase for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference. Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in speciality 05.09.13 'Technics of strong electric and magnetic fields'. National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Ministry of Education and Science of Ukraine. National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the study of electromagnetic processes in the test facilities for high-voltage insulators' testing at the permissible level of electromagnetic interference. Scientific interest of this work is determined by growing of international standards requirements to reduction of high-voltage insulators' electromagnetic interference level, which, in its turn, requires efficiency increase of relevant test facilities and necessitates proper adjustments of their constituent elements on the basis of calculation and coordination of electrical and magnetic fields' distribution, methods of circle theory with distributed parameters and extended use of modern computer technology.

The high-voltage insulators' characteristics are influenced by nonlinear electric discharge processes in them that indirectly cause electromagnetic interference. Electromagnetic interferences from insulators are related to the phenomena occurring

on their surfaces, namely, to the discharges caused by an increase in local potential gradients, to corona discharges due to inhomogeneity in the form of dry substances' deposits or water droplets, or to arcing on dry sections resulted from currents' leakage on contaminated insulators. Electromagnetic interferences can also be caused by arcing in internal flaws or cracks, as well as by discharges between cement-sand beds and porcelain or glass, in the case of air gaps at the joints between them. This, in its turn, affects the environment, as well as the quality of the Internet communication, radio and television, which does not correspond to the growing requirements of international standards to electromagnetic interference level from working electrical devices and electrical equipment.

Existing electrical equipment and installations for high-voltage insulators' testing do not have sufficient threshold of sensitivity and are characterized by high level of external electromagnetic interference (the background of installations). This leads to instability in determining of electromagnetic interference level created by the tested objects – insulators.

In the thesis the actual scientific task of electrical equipment efficiency increase for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference has been solved by developing new mathematical models, development of the methods for electromagnetic field distribution control in the elements of corresponding test electrical equipment and conducting specialized experiments. The obtained results of the work are essential for the development of technics of strong electric and magnetic fields, as well as for the practice of high-voltage electrical equipment testing at the permissible level of electromagnetic interference.

In the introduction the choice of research topic is highlighted, general description of the work is presented, the objective, the main tasks and the novelty of scientific research are determined. The information on the practical value of the obtained results, personal contribution of the applicant and the results' testing are given.

In the first chapter of the thesis, a review of the literature related to the subject of research is performed. Peculiarities of suspended high-voltage strings' use are

considered. The fact that most high-voltage lines and substations still use glass cap and pin insulators as insulating elements of insulator strings is noted. General suspended cap and pin insulators structure and characteristics' requirements are mentioned.

The possible causes of insulators' electromagnetic interference and their impact on the environment, and reception of radio and television programs, in particular, are determined. Permissible levels of electromagnetic interference at standardized voltages of insulators, as well as standards of electromagnetic interference level in transmission lines in different countries are considered.

The requirements of regulating international normative document CISPR 18-2 concerning testing methods and procedures of standards' setting for high-voltage insulators' electromagnetic interference, according to which testing procedures and limiting standardized values of external electromagnetic interference of both insulators and testing facilities are determined, are analyzed.

Existing test facilities' circuits for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference are described and implementation features of the main facilities' elements are characterized. The fact that elements of existing test facilities are bulky in design meant for operation at low frequencies is distinguished. When such circuits operate at high frequencies, capacitive and inductive current components of these elements are distorted, which leads to instability of high-voltage insulators' testing results at permissible level of electromagnetic interference. In addition, considerable size of these elements makes screening of test facilities' active parts from external electromagnetic interference impossible.

In order to develop small high-frequency high-voltage line traps, which are one of the main elements of high-voltage insulator testing facilities, the issue of using high-frequency line traps in power transmission lines has been considered and impossibility of their application in relevant facilities has been established.

The literature and scientific research analysis allowed us to identify a number of unresolved issues related to the actual problems of high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference.

The second chapter of the thesis presents the author's scientific developments concerning electric field control in the solenoid of high-frequency line trap by performing formation of its insulating core, which ensures matching of electric potential distribution in the coil with distribution of the potential induced by the coil magnetic field.

Mathematical model of high-frequency line trap compensating reactor is proposed. It allows us to take into account the parameters of each turn and conductors by means of modern computer technology application, which, unlike the existing developments, does not require a complex set of analytic functions. Practical model making will ensure pointed resonance adjustment of the line trap and sharp increase of its resistance.

Using the theory of multifactorial experiment planning and calculation of the induction coil electric field of high-frequency line trap, the form of the coil insulating core was optimized by means of a personal computer. It ensures matching of this electric potential with the potential induced by the coil magnetic field up to 1%.

The third chapter of the thesis contains information on the development, manufacture and implementation of a new test facility for high-voltage line cap and pin insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference by using the theoretical principles outlined in the thesis. Particular attention is paid to the normalized range of the level of electromagnetic interference measurements for high-voltage insulators at the created test facility, the parameters of which significantly exceed the requirements for the corresponding test facilities, specified by international standards CISPR 18-2, IEC 60437.

The results of electrical equipment calibration for high-voltage insulators' testing at permissible level of electromagnetic interference, which set the level of external electromagnetic interference (the background of the installation) and the standard parameter values for the electrical equipment (for base frequencies of electromagnetic interference of 0.5 MHz and 1.0 MHz), are given.

On the basis of experimental studies on the electromagnetic interference level for high-voltage insulators the influence of insulator's embodiment nature (the depth

of rodding and polymer coating) on the level of electromagnetic interference is determined and its insignificant importance for the further reduction of the electromagnetic interference level is pointed out. This confirms the assumptions formulated in this work about the necessity of further overcoming of electromagnetic interference occurrence in the insulators' insulation.

In the fourth chapter of the thesis, recommendations on the level of electromagnetic interference reduction from high-voltage insulators by considering the distribution of electric field created in the embodiment, as well as changes in this field due to the influence of various factors are presented.

Improvement of high-voltage line cap and pin insulators is offered by example of a typical insulator PS 120B, which means making of the insulator's rod with profiling of its conical part, providing the permanence of mechanical stresses in the cement-sand bed, and taking into account the ratio of the insulator rod sizes.

The threshold voltage values in the insulator which are connected with the appearance of internal discharges in the air micro-gaps of cement-sand bed is determined.

The use of proposed improved insulators' design 2.14 times reduces the maximum electric field strength in cement-sand beds of the rod, which ensures reduction of electromagnetic interference level in high-voltage line cap and pin insulators.

A comparison of experimentally obtained data on the electromagnetic interference level of control samples of typical high-voltage insulators with insulators of the improved design with profiling of the conical part in the insulator's rod has been made. It has been ascertained that the average level of electromagnetic interference in high-voltage insulators' experimental samples with the curvature radius of the rod conical part $R = 3,5$ mm compared to the control samples of type PS 120B insulators is reduced by 16... 29 dB at test voltages of 10... 30 kV.

Scientific novelty of the results obtained in the thesis:

1. For the first time, the mathematical model of high-frequency line trap reactor was developed, which, unlike the existing models, takes into account the effect of

inductance and mutual inductance of the separate turns and parts of the conductors, as well as their capacity, which allows us to provide pointed resonance adjustment of the line trap to the intended high frequency and to increase its throughput resistance substantially.

2. The method of electric field control in the inductor of high-frequency line trap by developing its insulating core has been worked out, which allows us to harmonize the distribution of electric potential with the distribution of the potential induced by the coil magnetic field, as well as to reduce the negative influence of external electromagnetic fields.

3. Determination of the dependence of threshold voltages of partial discharges occurrence on the sizes of air micro-gaps in the cement-sand beds of high-voltage insulator, which are caused by the electric breakdown of these micro-gaps, has found its further development. This allows predicting of the threshold voltage values for occurrence of insulators' electromagnetic interference.

4. The interdependencies of linear dimensions of the insulator's steel core conical part profiling are proposed for the first time. They are determined by the permanence of compression and sliding fracture stresses in its cement-sand bed, which allows reducing of the local values of the electric field strength and the insulator's electromagnetic interference level.

The results of the thesis are implemented in the test facility for high-voltage insulators testing at permissible level of electromagnetic interference at the Limited Liability Company 'Lviv Insulator Company', as well as in the educational process of the Department of Theoretical Electrical Engineering at National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute'. The use of the thesis results is confirmed by the implementation acts.

Keywords: electric field, electric potential, electromagnetic interference level, high-frequency inductor, high-frequency line trap, high-voltage insulator, induced potential, simplex-method.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 6/1 (26). С. 50–54. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

2. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розробка установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 1/1(27). С. 37–41. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

3. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Проценко О. Р. Регулювання електричного поля високовольтної котушки за допомогою профілювання діелектрика. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22. № 2. С. 173–180. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

4. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Олександренко С. І. Випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22. № 3. С. 166–175. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

5. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Компенсований високовольтний високочастотний реактор. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23. № 4. С. 112–119. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

6. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Хомініч В. І. Удосконалення високовольтних лінійних скляних ізоляторів. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23. № 6. С. 101–111. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

7. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Вплив профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Т. 25. № 6. С. 85–92. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

8. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Високочастотний загороджувач: пат. 115475 України: МПК H04B 3/56. № а 201510741 ; заявл. 04.11.15 ; опубл. 10.11.17, Бюл. № 21.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Brzhezytskyi V. O., Laposha M. Y., Mykhailenko V. V., Peretyatko Y. V. Mathematical Model of the Compensating High Frequency Line Reactor. *Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль (DIPED-2017)*: мат. XXII-го Міжнародного Семінару, м. Дніпро, 25-28 вересня 2017 р. Дніпро, «Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара», 2017. С. 152–156. (Міжнародна індексація: Scopus).

10. Ващук С. В., Лапоша М. Ю. Розробка котушок індуктивності з рівномірним розподіленням індукованого потенціалу. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2014 р. Київ, «Політехніка», 2014. С. 331–332.

11. Бабічева А. А., Лапоша М. Ю. Визначення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2015 р. Київ, «ФЕА НТУУ «КПІ», 2015. С. 395–397.

12. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Ярмоцик Є. С. Зниження рівня радіозавад високовольтних лінійних ізоляторів. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2016 р. Київ, «ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. С. 347–350.

13. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Євдокимов О. І. Дослідження механічних напружень у високовольтному лінійному ізоляторі. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2016 р. Київ, «ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. С. 351–353.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	12
1.1 Відомості про високовольтні лінійні ізолятори.....	12
1.2 Особлива роль зниження рівня електромагнітних завад лінійних ізоляторів	15
Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2 РЕГУЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В КОТУШЦІ ІНДУКТИВНОСТІ (РЕАКТОРІ) ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЗАГОРОДЖУВАЧА.....	40
2.1 Розробка математичної моделі компенсуючого реактора високочастотного загороджувача.....	40
2.2 Розподілення індукованого та електричного потенціалів в соленоїдальній котушці індуктивності високочастотного загороджувача.....	49
2.3 Оптимізація форми ізоляційного остову котушки	65
Висновки до розділу 2	70
РОЗДІЛ 3 ВИПРОБУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІЗОЛЯТОРІВ НА ДОПУСТИМИЙ РІВЕНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД.....	72
3.1 Опис установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.....	72
3.2 Дослідження впливу конструктивного виконання ізолятора на рівень електромагнітних завад	81
Висновки до розділу 3	87
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІЗОЛЯТОРІВ.....	89
4.1 Розрахунок розподілення електричного поля ізолятора.....	90
4.2 Зниження напруженості електричного поля за допомогою профілювання стрижня ізолятора	95

4.3 Виникнення часткових розрядів в ізоляторі.....	101
4.4 Експериментальні дослідження рівня електромагнітних завад удосконалених високовольтних скляних ізоляторів	104
Висновки до розділу 4	106
ВИСНОВКИ.....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	111
ДОДАТОК А	122
ДОДАТОК Б	125
ДОДАТОК В	128
ДОДАТОК Г	130
ДОДАТОК Д	131
ДОДАТОК Е	139
ДОДАТОК Ж	144

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВЧЗ – високочастотний загороджувач;

ЕМВ – електромагнітне випромінювання;

ЕМЗ – електромагнітна завада (радіозавада);

ЕН – елемент настроювання;

ЗП – захисний пристрій;

КЗ – коротке замикання;

ЛЕП – лінія електропередачі;

ОПН – обмежувач перенапруг нелінійний;

ПК – персональний комп'ютер;

ПЛ – повітряна лінія;

РЗ – реактор загороджувача;

СКЗ – середньоквадратичне значення;

ССЕ – сітка скінченних елементів;

ТзОВ «ЛПК» – товариство з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія»;

ЦПЗ – цементно-піщане закладення (високовольтного ізолятора);

ЧР – частковий розряд;

ANSI – Американський національний інститут стандартів
(англ. American National Standards Institute);

CISPR – Міжнародний спеціальний комітет з радіозавад
(англ. Special International Committee On Radio Interference);

NEMA – Національна асоціація виробників електрообладнання
(англ. National Electrical Manufacturers Association).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасному світі передача електроенергії від місць її виробництва до споживачів відбувається, в значній частині, по повітряних лініях електропередач, що потребує надійного функціонування їх основних елементів, у тому числі високовольтних ізоляторів. Щоб ізолятори зберігали свої характеристики протягом багатьох років, повинні бути детально відпрацьовані технологічні процеси їх виготовлення, проведений ряд електричних, механічних, а також спільних – електромеханічних випробувань. Багаторічна практика проведення випробувань ізоляторів показала, що найбільш чутливою ланкою в оцінці якості ізоляторів є їх рівні електромагнітних завад.

Електромагнітні завади від ізоляторів пов'язані з явищами, що відбуваються на їх поверхні, а саме з частковими розрядами, викликаними збільшенням локальних градієнтів потенціалу, коронними розрядами, обумовленими неоднорідностями у вигляді нальотів сухих речовин або крапель води або іскрінням на сухих ділянках, спричиненим струмами витоку на забруднених ізоляторах. Електромагнітні завади можуть бути також викликані іскрінням у внутрішніх раковинах або тріщинах ізоляції, зокрема в результаті розрядів у мікровключеннях повітря цементно-піщаного закладення. Це в свою чергу впливає на екологію навколишнього середовища, і, що особливо важливо в останній час, – на якість інтернет зв'язку, радіо- і телеєфіру. З урахуванням вище зазначеного зростають вимоги міжнародних стандартів до необхідного зниження рівня електромагнітних завад як від ізоляторів, так і від інших працюючих електротехнічних пристроїв. Слід відмітити, що випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад може бути також розповсюджено на інші види електроустаткування як чутливий та доступний метод контролю стану ізоляції.

В якості елементів існуючих установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень високочастотних електромагнітних завад використовують великогабаритні конструкції реакторів (котушок індуктивності)

та конденсаторів, які мають, як правило, інше призначення для роботи при частоті 50 Гц, що не дозволяє виконувати обов'язкове екранування активних частин випробувальних установок від зовнішніх електромагнітних завад. Згадані елементи установок у більшості випадків розраховані як низькочастотні, проте при роботі на високих частотах, виникає непередбачувана взаємодія їх ємнісних та індуктивних складових струмів, що призводить до нестабільності результатів випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад і, як наслідок, до зниження ефективності відповідного випробувального електрообладнання, його невиправданого здорожчання та надмірного впливу зовнішніх електромагнітних завад.

Суттєві наукові результати щодо дослідження питань високовольтного випробувального електрообладнання, а також безпосередньо випробувань високовольтних ізоляторів, присвячена значна кількість робіт як вітчизняних, так і зарубіжних авторів, серед яких слід відзначити таких вчених як Журавльов Е. М., Щерба А. А., Подольцев О. Д., Шумілов Ю. М., Кім Є. Д., Мікуцький Г. В., Биховський Я. Л., Рижавський Г. Я., Цимберов А. Й., Злаказов А. Б., Кулик Н. М., Allan R. N., Kuffel E., Reddy V. S., Kumar U.

Однак аналіз їх праць та існуючих публікацій показав, що для забезпечення високої ефективності електрообладнання (відповідних установок) для проведення випробувань на допустимий рівень електромагнітних завад виникає необхідність в додатковій розробці математичної моделі реактора високочастотного загороджувача, розвитку методів регулювання електричного поля на основі теорії кіл з розподіленими параметрами, розрахунку та узгодження розподілення електричних та магнітних полів у високочастотній котушці індуктивності з розширеним використанням сучасної обчислювальної техніки.

В цілому можна зробити висновок, що підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля

для елементів відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів є актуальним та важливим науковим завданням, вирішенню якого присвячена дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота виконана в ході проведення на кафедрі теоретичної електротехніки факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» науково-дослідних робіт: «Розробка, виготовлення та поставка експериментального зразка установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад» (№ державної реєстрації 0115U005172) та «Дослідження характеристик високовольтних лінійних скляних ізоляторів» (№ державної реєстрації 0116U005679), в яких здобувач був головним виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля для елементів відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів.

Для досягнення мети поставлені наступні основні задачі:

1. Аналіз стану досліджень і розробок в області випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.
2. Розробка математичної моделі реактора високочастотного загороджувача на основі теорії кіл з розподіленими параметрами.
3. Розвиток методу регулювання електричного поля в високочастотній котушці індуктивності за допомогою формування її ізоляційного остову.
4. Визначення граничних значень напруги виникнення часткових розрядів у високовольтному лінійному тарілчастому ізоляторі.

5. Удосконалення високовольтного лінійного тарілчастого ізолятора для зниження його рівня електромагнітних завад.

6. Розробка, виготовлення та підготовка до проведення калібрування промислової установки для випробувань високовольтних ізоляторів, що виробляються в Україні, на допустимий рівень електромагнітних завад.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в електрообладнанні для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.

Предмет дослідження – методи та засоби підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад.

Методи дослідження базуються на використанні:

– теорії електромагнітного поля та аналізу дії його електричних та магнітних складових (розрахунок електричної та магнітної складових електромагнітного поля в високочастотних загороджувачах дозволяє визначати їх вплив на розподілення індукованого та електричного потенціалів в них);

– теорії високовольтних електричних апаратів (визначення конструктивних та функціональних особливостей використовуваних високовольтних пристроїв дозволяє узгоджувати їх характеристики з розподіленням електромагнітного поля в елементах конструкції);

– теорії електроізоляційних матеріалів (визначення граничних меж застосування електротехнічних матеріалів та змін їх властивостей в цих межах дозволяє впливати на характеристики високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів);

– теорії електричних вимірювань та високовольтних випробувань (визначення параметрів електричних та магнітних кіл високочастотних загороджувачів за різних режимів роботи дозволяє в подальшому виконувати прогнозування їх характеристик);

– методів математичного моделювання та розрахунку електричних і магнітних полів за допомогою відповідних програм з використанням ПК

(моделювання процесів в високочастотних загороджувачах та чисельні розрахунки за допомогою ПК дозволяють одержувати розрахункові параметри загороджувачів для їх порівняння з експериментальними даними);

– методів математичної статистики (обробка експериментальних даних за допомогою програмних засобів дозволяє оцінювати достовірність отриманих результатів);

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

– методів виконання метрологічних робіт з високовольтними засобами вимірювальної техніки (визначення метрологічних характеристик розробленого високовольтного електрообладнання експериментальним шляхом дозволяє контролювати запропоновані в роботі теоретичні положення).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено математичну модель реактора високочастотного загороджувача, що на відміну від існуючих моделей, враховує вплив індуктивності та взаємоіндуктивності окремих витків та частин провідників, а також їхню ємність, що дозволяє забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувача на задану високу частоту та суттєво збільшити його прохідний опір.

2. Розвинуто метод регулювання електричного поля в котушці індуктивності високочастотного загороджувача шляхом формування її ізоляційного остову, що дозволяє узгодити розподілення електричного потенціалу з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу, а також послабити негативний вплив зовнішніх електромагнітних полів.

3. Знайшло подальший розвиток визначення залежності граничних значень напруг виникнення часткових розрядів від розмірів повітряних мікрровключень у цементно-піщаному закладенні високовольтного ізолятора, які обумовлені електричним пробоем цих мікрровключень, що дозволяє

прогнозувати порогові значення напруги появи електромагнітних завад ізоляторів.

4. Вперше запропоновані взаємозалежності лінійних розмірів профілювання конічної частини сталевого стрижня ізолятора, які виходять із забезпечення незмінності напружень стискання та зрізу в його цементно-піщаному закладенні, що дозволяє досягти зниження локальних значень напруженості електричного поля та рівня електромагнітних завад ізолятора.

Практичне значення отриманих результатів:

Запропоновано виконання ізоляційного остову котушки індуктивності високочастотного загороджувача на основі оптимізації електричного поля в її конструкції за плануванням багатofакторного експерименту, використання якого дозволяє забезпечити гостре резонансне настроювання загороджувача, збільшити його прохідний опір з 20 кОм до 100 кОм та зменшити його габаритні розміри (за висотою) в 3,5 рази, що забезпечує відповідне зниження матеріальних витрат та дає змогу застосування екранування установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад (пріоритет підтверджено патентом України «Високочастотний загороджувач» № 115475 від 10.11.2017 р.).

Обґрунтовано удосконалення високовольтного скляного тарілчастого ізолятора, яке полягає у профілюванні його конічної частини стрижня та врахуванні співвідношень розмірів елементів ізолятора, що дозволяє знизити локальні значення напруженості електричного поля в ізоляторі в 2,14 рази.

Розроблене та експериментально перевірене в порівнянні з контрольними зразками ізоляторів типу ПС 120Б удосконалене виконання високовольтного скляного тарілчастого ізолятора підтверджує можливість створення нових високовольтних лінійних ізоляторів зі зменшенням на 16...29 дБ рівнем електромагнітних завад.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» в установці для випробувань

високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, яка була розроблена, виготовлена в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» разом з Науковим парком «Київська політехніка» за безпосередньої участі здобувача. Державним підприємством «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт») проведено калібрування виготовленої установки, за результатами якого видано свідоцтво про калібрування № UA/29/291113/000951 від 30.09.2019 р. Результати дисертаційної роботи також впроваджені в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і теоретичні результати, викладені в дисертаційній роботі, одержано автором особисто.

В наукових працях, які опубліковані в співавторстві, здобувачу належить фактичний матеріал і основний творчий доробок, а саме: в [72, 73, 90] – проведено дослідження розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці; в [65, 95] – проведено регулювання розподілення напруженості електричного поля в ізоляційній конструкції котушки шляхом формування ізоляційного остову; в [74, 76] – обґрунтовано та досліджено математичну модель компенсуючого реактора високочастотного загороджувача; в [112] – проведено дослідження максимальної напруженості електричного поля та порогового значення напруги виникнення часткових розрядів в цементно-піщаному закладенні удосконаленої конструкції ізолятора; в [101] – визначено основні параметри та характеристики розробленої установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад; в [104] – планування та проведення експериментальних досліджень високовольтних ізоляторів, а також обробка їх результатів; в [117] – проведено дослідження

впливу профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень за темою дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

– Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», (Україна, м. Київ, 2014, 2015, 2016 рр.);

– XIX Міжнародному симпозіумі SIEMA'2016 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (Україна, м. Харків, 2016 р.);

– XXII Міжнародному семінарі «Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль (DIPED–2017)» (Україна, м. Дніпро, 2017 р.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 165 сторінках машинописного тексту, складається із анотацій на 12 сторінках, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Обсяг основної частини дисертації складає 105 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 45 рисунками та 20 таблицями. Список використаних джерел містить 117 найменувань та викладений на 11 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Відомості про високовольні лінійні ізолятори

Лінійні ізолятори призначаються для електричної ізоляції, кріплення проводів та блискавкозахисних тросів на повітряних лініях електропередач (ЛЕП), а також в розподільних пристроях електростанцій та підстанцій постійного та змінного струму напругою вище 1000 В. Спеціалізовані лінійні ізолятори застосовуються для кріплення контактної мережі електрифікованих залізничних доріг. Деякі типи лінійних ізоляторів використовуються в якості ізолюючих міжфазних розпірок, а також для ізоляції траверс опор ліній електропередач [1, 2, 3].

В умовах експлуатації ізолятори знаходяться під електричною напругою і одночасно сприймають механічні навантаження від маси проводів, ожеледних відкладень, вітрового навантаження, вібрації, «пляски», а також від натягу проводів. Тому правильний вибір типів ізоляторів при проектуванні повітряних ЛЕП в значній мірі забезпечує їх надійність [4].

На даний час найбільш поширеними ізоляторами є скляні та фарфорові, причому скляні ізолятори завдяки своїм унікальним якостям, у тому числі «ідентифікування» в разі пошкодження діелектрика, але при цьому зберігання механічної міцності конструкції, найбільш масово експлуатуються в повітряних лініях (ПЛ) високої напруги [5].

На рис. 1.1 представлена будова лінійного тарілчастого підвісного ізолятора [6], що складається з чавунної шапки, сталевго стрижня, ізоляційної деталі та цементно-піщаного закладення (ЦПЗ). На головці скляної (або фарфорової) ізоляційної деталі ізолятора за допомогою ЦПЗ кріпиться шапка з високоміцного чавуну. Стрижень, який має потовщення (з одного боку – конічне, з іншого – у вигляді еліпсоїду обертання), кріпиться за допомогою ЦПЗ своєю конічною частиною у внутрішній порожнині головки ізолятора.

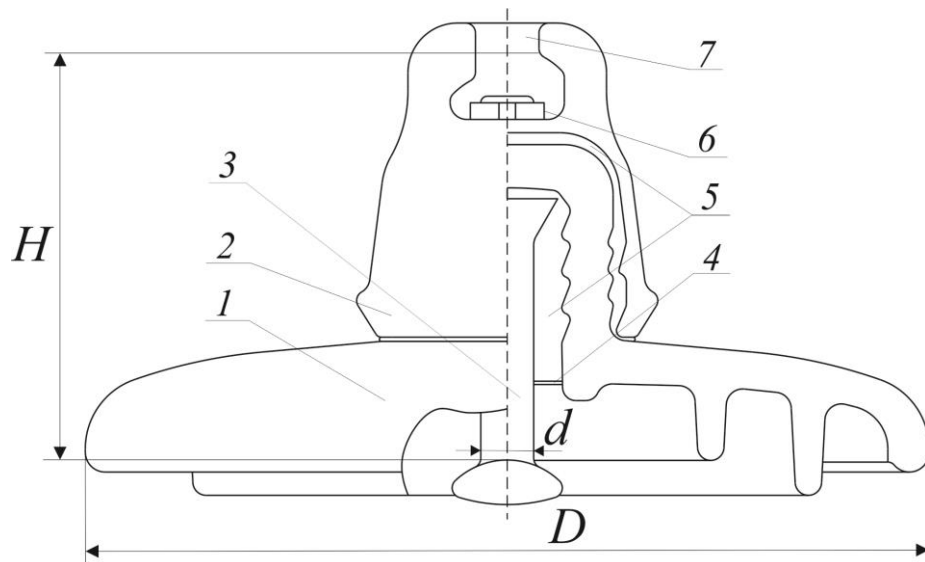


Рис. 1.1 Лінійний підвісний тарілчастий ізолятор [6], де 1 – ізоляційна деталь ізолятора; 2 – шапка ізолятора; 3 – стрижень ізолятора; 4 – бітумна промазка; 5 – цементно-піщане закладення; 6 – пружинний замок; 7 – паз; H – будівельна висота ізолятора; D – діаметр ізоляційної деталі ізолятора; d – діаметр стрижня ізолятора

Щоб ізолятор був надійним протягом багатьох років повинні бути детально опрацьовані методи конструювання, фізико-механічні та електрофізичні характеристики високовольтних ізоляторів, у тому числі за допомогою розрахунку картини дії електричного поля [7–9].

Внутрішня частина головки ізолятора і частина стрижня, яка стикається зі зв'язкою, покриваються тонким, близько 0,1 мм, шаром бітумної промазки. Для запобігання корозії всі металеві частини оцинковуються [10].

У високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторах ізоляційна деталь і ЦПЗ знаходяться під основним електричним навантаженням. Фізичний стан ЦПЗ характеризується певним вмістом повітря (пористістю), що впливає на електричну провідність зв'язки, яка, в свою чергу, впливає на внутрішню електричну міцність ізолятора, роблячи зв'язку вразливою до впливу сильного електричного поля [11].

При застосуванні до ізолятора механічного навантаження, тобто розтягуючого зусилля, в його силовому вузлі відбувається розподілення

механічних напружень, яке залежить від конфігурації та фізико-механічних властивостей складових елементів високовольтного ізолятора [12–15].

Конфігурація, конструктивне виконання та характеристики підвісних тарілчастих ізоляторів варіюються в широкому діапазоні. Однак всі модифікації цих ізоляторів можуть бути класифіковані відповідно з рекомендаціями публікації ІЕС 60305 [16], яка пропонує встановлені значення електричних, механічних характеристик, рівнів електромагнітних завад і основних розмірів підвісних ізоляторів тарілчастого типу, виконаних із загартованого скла або фарфору.

Незважаючи на те, що останніми роками в будівництві повітряних мереж відзначається широке використання полімерних ізоляторів [17–20], все ж на більшості високовольтних ліній та підстанцій основними ізолюючими елементами гірлянд залишаються скляні тарілчасті ізолятори. Спостерігається значне збільшення об'єму виробництва високовольтних скляних ізоляторів.

У зв'язку з цим посилюється гострота конкурентної боротьби між компаніями-виготовлювачами, що змушує шукати шляхи зниження питомих витрат і підвищення технічних характеристик ізоляторів, у тому числі зниження їх рівня електромагнітних завад. Розробляються нові більш технологічні склади скла, прийоми його загартування, збирання ізоляторів, методи контролю і т.п. [21].

Значна кількість вітчизняних та зарубіжних публікацій, присвячених дослідженню характеристик ізоляторів, спрямовані на вдосконалення методів конструювання, покращення фізико-механічних та електрофізичних характеристик високовольтних ізоляторів.

Так в роботі [22] наведено результати розрахунків напруженості електричного поля в об'ємі скляного ізолятора шляхом моделювання поля за допомогою методу скінченних елементів, який реалізовано в пакетах Maxwell та CST EM Studio. Проведене моделювання [22] показує, що небезпечні значення напруженості поля виникають на поверхнях ЦПЗ як біля стрижня, так і шапки в місцях контакту з повітрям. Такі значення полів можуть призводити до появи

поверхневих розрядів на внутрішній та зовнішній поверхнях, що в результаті може ініціювати перекриття всього ізолятора.

Авторами експериментальних та теоретичних досліджень зразків ізоляторів типу ПС 120Б, які знаходились в експлуатації на ПЛ [23], доведено, що при напрузі 28 кВ на їх внутрішній поверхні виникають поверхневі розряди, які можуть ініціювати перекриття всієї гірлянди ізоляторів. Результати розрахунку напруженості електричного поля в об'ємі ізолятора за [23] показали, що максимального значення напруженість поля досягає на поверхні стрижня, а також в ЦПЗ, що може призводити до появи електричних розрядів і високочастотних коливань та відповідних перенапруг на ізоляції повітряних ліній.

В [24] представлено спосіб розрахунку електричного поля тривимірної моделі високовольтних ізоляторів за допомогою програмного забезпечення на основі методу скінченних елементів. Порівняння результатів розрахунків та експериментальних даних показало, що метод моделювання [24] є визначальним для розрахунку електричного поля високовольтних ізоляторів при проектуванні високовольтних ліній електропередач.

1.2 Особлива роль зниження рівня електромагнітних завад лінійних ізоляторів

При передачі електроенергії по лініям електропередач обов'язково необхідно враховувати електромагнітні випромінювання, які обумовлені короною на проводах, частковими розрядами в ізоляторах і на деталях арматури, що створюють електромагнітні завади (ЕМЗ) на радіозв'язок навіть при нормальному режимі роботи лінії електропередачі [25].

Визначення рівня ЕМЗ необхідно проводити на частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц [26]. В існуючих стандартах по рівню ЕМЗ наведені відповідні значення допустимих рівнів ЕМЗ для різних елементів ПЛ, що перебувають під високою напругою. В стандартах [6, 26–28] описані методики випробування та наведені

допустимі рівні ЕМЗ при нормованих напругах тарілчастих лінійних ізоляторів, значення яких представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Допустимі рівні ЕМЗ при нормованих напругах ізоляторів [6]

№ п/п	Клас ізолятора	Рівні ЕМЗ при нормованих напругах					
		Нормована напруга, кВ	Рівень ЕМЗ, дБ, не більше	Нормована напруга, кВ	Рівень ЕМЗ, дБ, не більше	Нормована напруга, кВ	Рівень ЕМЗ, дБ, не більше
1	40	10	34	12	55	20	86
2	70	10	34	18	55	25	86
3	80	10	34	18	55	25	86
4	100	10	34	18	55	25	86
5	120	10	34	18	55	25	86
6	160	10	34	20	55	30	86
7	190	10	34	20	55	30	86
8	210	10	34	20	55	30	86
9	240	10	34	20	55	30	86
10	300	10	34	20	55	30	86
12	400	10	34	25	55	35	86
13	530	10	34	25	55	35	86

Високочастотні поля, що утворюються навколо ПЛ, є джерелом постійних завад, які призводять до інтенсивного впливу високочастотних хвиль ЕМЗ на антенні радіоприймачі та радіостанції, а також на високочастотні канали зв'язку, організовані по проводах або тросах повітряних ліній електропередач [29].

Електромагнітні завади також мають значний вплив на екологію навколишнього середовища поряд з іншими факторами дії повітряних ліній електропередач. Причиною їх виникнення є і прояви коронних та часткових розрядів у високовольтних ізоляторах, які супроводжуються безперервно повторюваними імпульсами, що генерують коливання на частотах від 0,15 МГц до 100 МГц. Це призводить до появи недопустимого електромагнітного випромінювання [30].

Отже, при виробництві високовольтних тарілчастих ізоляторів за сучасними міжнародними та національними стандартами [31, 32] обов'язково

необхідно приділяти увагу питанням екології, захисту навколишнього середовища та зниженню їх рівня ЕМЗ.

Уведення нормування ЕМЗ вимагає від проектувальників і власників ПЛ прийняття заходів для того, щоб рівень ЕМЗ не перевищував допустимих значень протягом заданого відсотка річного часу [29]. У більшості країн встановлені національні норми на величини напруженості поля ЕМЗ, створюваних повітряними лініями електропередач і високовольтним обладнанням.

У табл. 1.2 наведені норми на ЕМЗ від ПЛ деяких країн. Для порівняння вимог національних норм допустимі рівні ЕМЗ були перераховані на відстань 100 метрів від ПЛ і на частоту 0,5 (1,0) МГц, які рекомендовані Міжнародним спеціальним комітетом щодо радіозавад (CISPR) в якості базисних при розрахунках [33].

Таблиця 1.2

Норми рівня електромагнітних завад різних країн від повітряних ліній [33]

№ п/п	Країна	Частота вимірювання	Місце вимірювання	Погодні умови, % за часом	Норми, дБ	Допустимі рівні ЕМЗ на відстані 100 м від проекції крайньої фази на землю, дБ	
						в ясну погоду	80 % часу
1	2	3	4	5	6	7	8
1	США	1,0 МГц	Відстань від проекції крайньої фази ПЛ 362 кВ – 14 м	80	52 (ANSI)	27,3	33,3
			ПЛ >550 кВ – 20 м			29,6	35,6
2	Канада	1,0 МГц	Під лінією. N – число будівель в зоні 60 м від проекції крайньої фази	В ясну погоду	34 (ANSI) (N>50)	7,3	26,3
					40 (ANSI) (N=10–50)	13,3	19,3
					43,5 (ANSI) (N<10)	16,8	22,8

3	Бразилія	1,0 МГц	На границі зони відчуження (30 м)	В ясну погоду	42 (ANSI)	23,3	29,3
4	Японія	1,0 МГц	Під лінією	50, дощ	53	24,9	30,9
5	Індія	0,5 МГц	На границі зони відчуження (30 м)	В ясну погоду	46	24,7	30,7
			45 м		46	30,7	36,7
6	Італія	0,5 МГц	Відстань від проекції крайньої фази (15 м)	80	60	32,2	38,3
7	Швейцарія	0,5 МГц	Відстань від проекції крайньої фази (20 м)	50, в ясну погоду	46	27,6	33,6
8	Польща	0,5 МГц	Відстань від проекції крайньої фази (20 м)	В ясну погоду	57,5	37,0	43,0

З табл. 1.2 видно, що норми Канади та Бразилії встановлюють більш жорсткі вимоги до рівнів допустимих електромагнітних завад від ПЛ, ніж норми інших країн.

Разом з тим, норми ЕМЗ, створюваних ізоляторами, для західноєвропейських країн є найбільш жорсткими, згідно з якими середньостатистичний рівень ЕМЗ при частоті 0,5 МГц та поданій напрузі 20 кВ (частотою 50 Гц) не повинен перевищувати 60 дБ [34]. На Американському континенті, як правило, базисна частота дорівнює 1,0 МГц, випробувальна напруга – 10 кВ, допустимий рівень ЕМЗ – 50 мкВ, що еквівалентно 32 дБ [35].

Хоча вимоги по рівню ЕМЗ ізоляторів істотно різняться, але сама процедура та умови випробування на ЕМЗ в різних національних стандартах засновані на одних і тих же рекомендаціях IEC 60437, CISPR 18-2 [26, 37].

Електромагнітні завади безпосередньо пов'язані з розподіленням електричного поля в ізоляторах, яке суттєво залежить і від умов експлуатації. Практично складно експериментально моделювати реальні конструкції ПЛ в закритих лабораторіях, а саме, в зв'язку з обмеженою висотою випробувальної установки, впливом стін та об'єктів. Випробування є складними і в зовнішніх умовах, оскільки необхідні протяжні з'єднання та великі випробувальні конструкції, які необхідні при вимірюванні напруги появи ЕМЗ гірлянд ізоляторів [36].

Вже з 1940 року умови лабораторних випробувань високовольтних ізоляторів за рівнем ЕМЗ були вперше стандартизовані Національною асоціацією виробників електрообладнання США (NEMA), та після накопичення експериментальних даних стандарти були модернізовані.

На сьогоднішній день регламентуючим міжнародним нормативним документом щодо методів випробування та процедури встановлення норм електромагнітних завад високовольтних ізоляторів є CISPR 18-2 [37].

На рис. 1.2 показано стандартизовану схему випробувань за рекомендаціями CISPR 18-2 [37]. Дану схему можливо використовувати для лабораторних вимірювань рівня електромагнітних завад, що створюються високовольтними ізоляторами або іншими випробуваними об'єктами I .

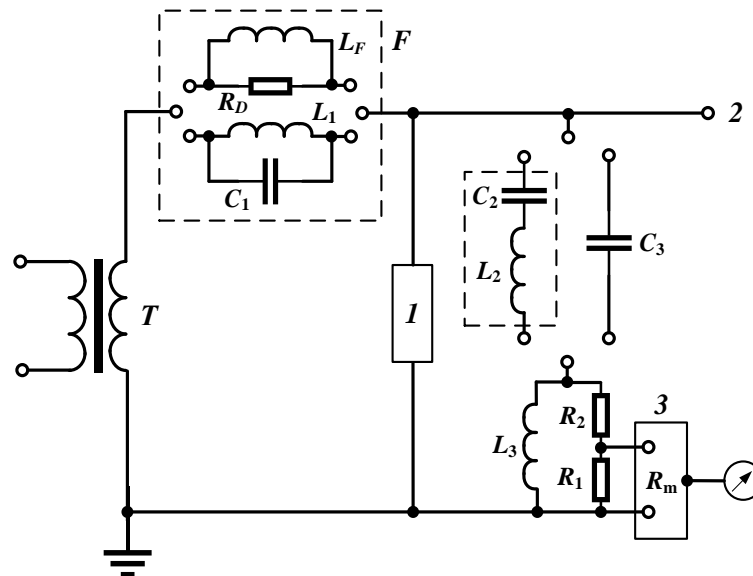


Рис. 1.2 Схема випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад за [37], де T – високовольтний трансформатор; F – загороджуючий фільтр; L_F – котушка індуктивності фільтра F ; R_D – демпфуючий опір; I – випробуваний об'єкт (ізолятор); 2 – кінцевий некоронуючий пристрій (навантаження); 3 – вимірювальний прилад

Випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад необхідно проводити всередині екранованої камери, щоб позбутися впливу завад із навколишнього середовища. Крім того, мережі електроживлення та освітлення повинні проходити в екрановану камеру через

відповідні фільтри, щоб уникнути проникнення завад, наявних в навколишньому середовищі [37].

Фільтр F може бути аперіодичним (L, R) або складатися з паралельно з'єднаних котушки індуктивності L_1 та конденсатора C_1 .

Зробивши фільтр F аперіодичним, використовуючи, наприклад, індуктивність L_F , задемпфовану впаралель опором R_D , можна проводити випробування на частотах, відмінних від базисних (0,5 МГц та 1,0 МГц), але при цьому необхідно забезпечити дуже високий імпеданс фільтру F та використовувати великогабаритні котушки індуктивності L_F , що призводить до невиправданого здорожчання випробувальної установки та унеможливорює проведення випробувань всередині екранованої камери [37].

Послідовне коло L_2C_2 і паралельне коло L_1C_1 утворюють фільтри (див. рис. 1.2), які налаштовані на випробувальну частоту. Перевага цього варіанту схеми випробувань полягає в тому, що значення ємності C_1 може бути відносно малим і тому її виконання може характеризуватись невеликими габаритами та доступною вартістю [37].

Використання резонансного контуру L_1C_1 , який правильно налаштований в якості фільтра F , може бути ефективним засобом зниження порогу чутливості схеми випробування, що визначається зменшенням зовнішніх ЕМЗ (фону установки), а, отже, дозволяє фіксувати менші рівні ЕМЗ об'єкту випробування.

Замість послідовного резонансного кола L_2C_2 можна використовувати лише один конденсатор C_3 , але він повинен мати велику ємність, щоб його реактивний опір $X_3 = 1/\omega C_3$ був набагато меншим опору групи R_2, R_1, R_m (рис. 1.2). При використанні такого рішення, знову-таки ускладнюється екранування випробувальної установки через великі габаритні розміри конденсатора C_3 . Крім того, використання конденсатора C_3 великої ємності (як і великої індуктивності L_F) викликає також невиправдане здорожчання установки.

Схема випробувань повинна бути змонтована так, щоб забезпечити точні вимірювання рівня електромагнітних завад, створюваних випробуваним об'єктом – ізолятором. Будь-які завади, що впливають на схему випробувань

ззовні, включно з завадами живлення або завади від інших елементів кола, повинні бути незначними і бути на 10 дБ нижче рівня, встановленого для випробуваного об'єкта [37].

При подачі на схему випробувальної напруги рівень зовнішніх завад повинен бути (в гіршому випадку) на 6 дБ нижче найнижчого рівня вимірювання. Ці умови можуть бути перевірені за допомогою заміни випробуваного об'єкта таким, який не створює завади [37].

Відповідно, граничні нормовані значення зовнішніх електромагнітних завад (фону установки) представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Граничні нормовані значення зовнішніх електромагнітних завад
(фону установки) за [37]

№ п/п	Випробувальна напруга ізолятора, кВ	Рекомендоване значення, дБ	Допустиме значення, дБ
1	10	≤ 24	28
2	12...25	≤ 45	49
3	30...35	≤ 76	80

На рис. 1.3 наведена схема випробувальної установки, яка рекомендована NEMA [38].

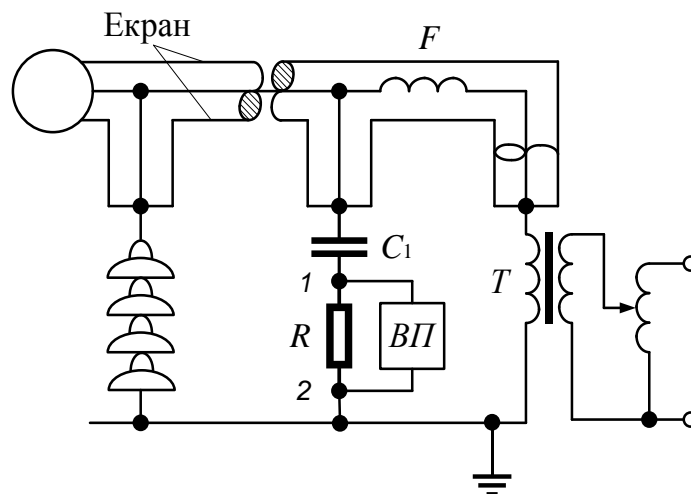


Рис. 1.3 Схема визначення електромагнітних завад за рекомендаціями NEMA (США) [38], де T – високовольтний трансформатор; $ВІІ$ – вимірювальний прилад; C_1 – ємність конденсатора зв'язку; F – індуктивність, яка розділяє кола за високою частотою; R – узгоджувачий опір

Наявність власної індуктивності L_1 конденсатора зв'язку, а також вплив паразитних ємностей конденсатора зв'язку C_1 і ємностей C_2 при вимірюванні на високих частотах призводять до додаткових похибок.

Значення ємності еталонного конденсатора C_1 обмежено до мінімальної величини $0,001$ мкФ [39]. Загороджуючий фільтр F ($L = 150$ мГн, $C_{\text{макс}} = 500$ пФ) було встановлено замість дроселя F безпосередньо біля конденсатора зв'язку, і до нього пред'являлися наступні вимоги: його опір Z на частоті $1,0$ МГц повинен бути більше 20 кОм.

В схемі NEMA для визначення ЕМЗ від ізоляторів та ізоляційних конструкцій за стандартом Великобританії CEEB Standard 9931/5 [40] значення опору R_1 становить 75 Ом для подальшого спрощення узгодження зі стандартним високочастотним кабелем. Детально схема цієї частини установки представлена на рис. 1.5.

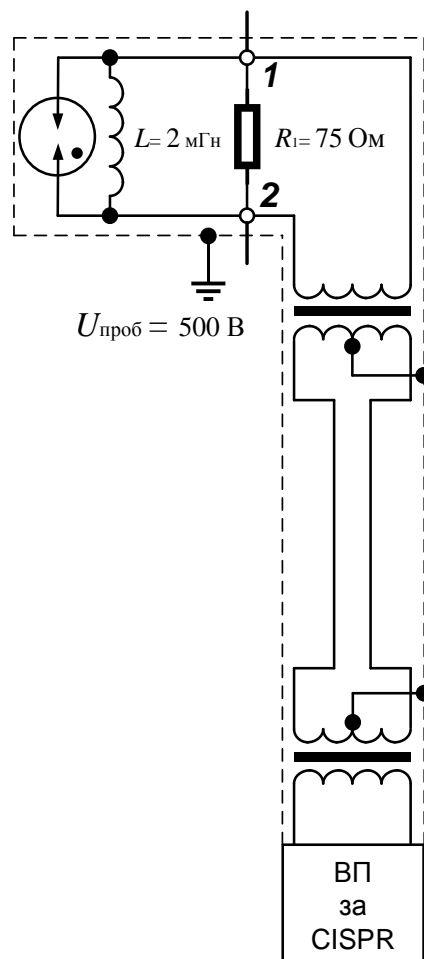


Рис. 1.5 Схема приєднання вимірювального приладу за CEEB Standart 9931/5 [40]

Установка для дослідження електромагнітних завад на гірляндах ізоляторів і лінійній арматурі Всесоюзного науково-дослідного інституту електроенергетики (ВНИИЕ) відповідає рекомендаціям за публікацією CISPR [39].

Схематичне зображення елементів цієї установки наведена на рис. 1.6, а її схема заміщення на рис. 1.7 [41].

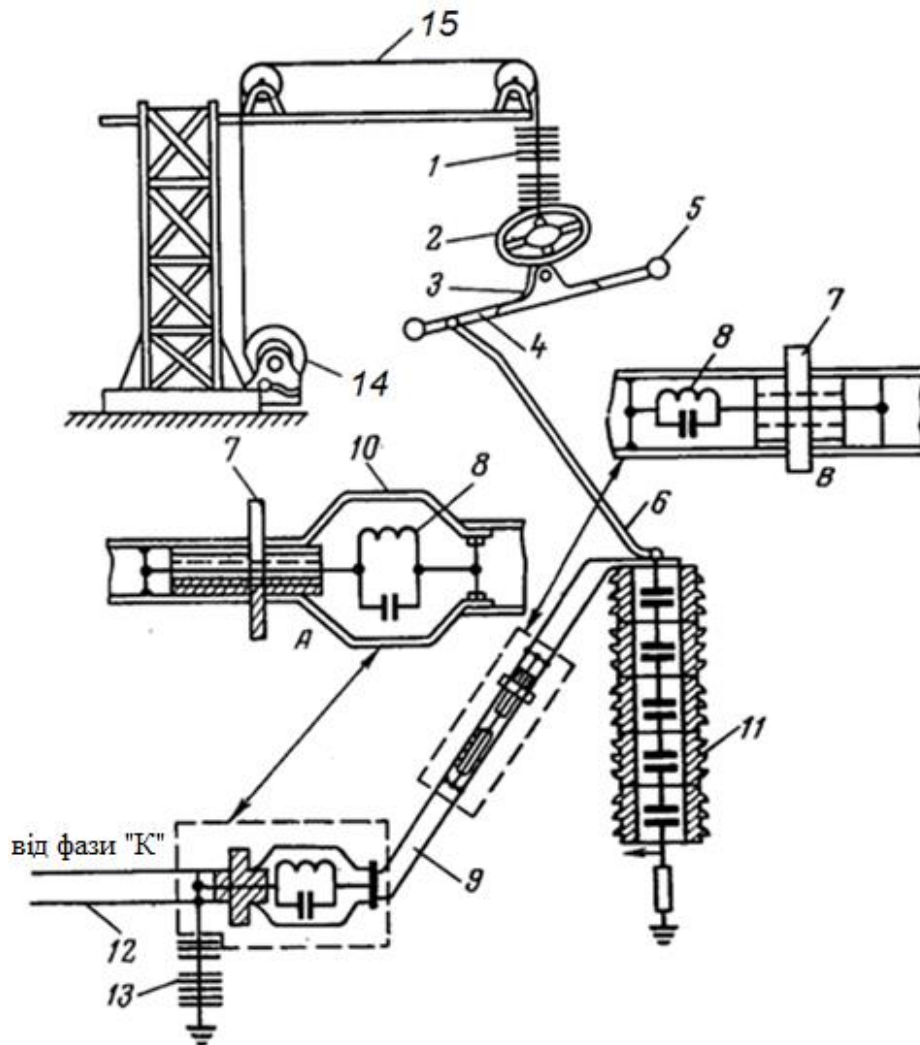


Рис. 1.6 Установка для визначення рівня електромагнітних завад від гірлянд ізоляторів і лінійної арматури лінії [41], де 1 – гірлянда ізоляторів; 2, 3 – лінійна арматура; 4 – алюмінієва труба; 5 – латунні кулі; 6 – з'єднуюча шина; 7 – роз'єм; 8 – фільтрові загороджувачі; 9 – з'єднуюча шина; 10 – корпус фільтрового загороджувача; 11 – конденсатор зв'язку; 12 – з'єднуюча шина; 13 – заземлення; 14 – система блоків і лебідка; 15 – трос

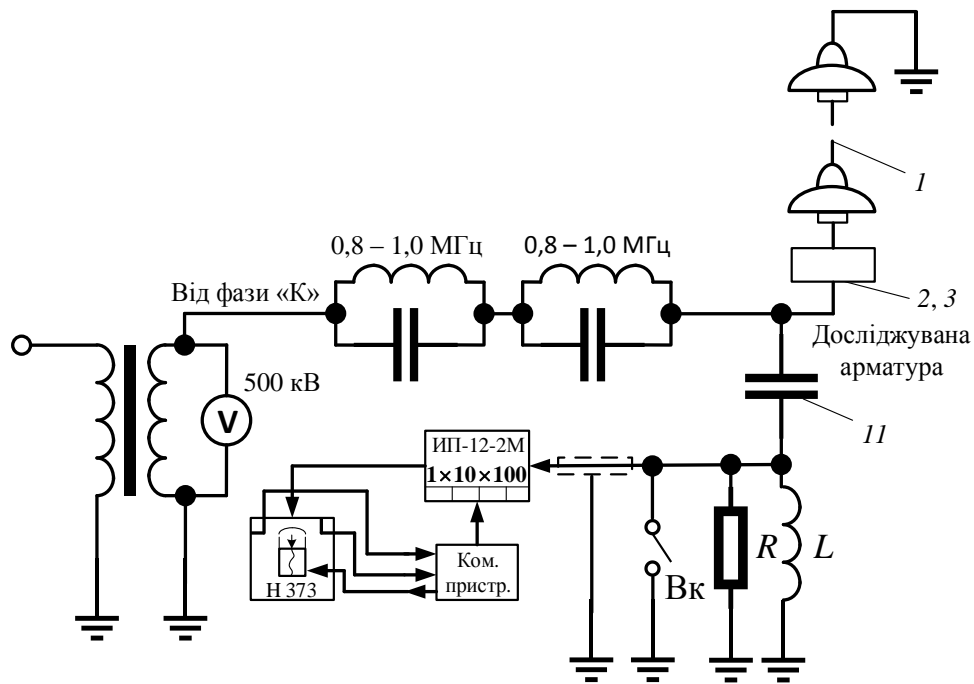


Рис. 1.7 Схема заміщення випробувальної установки для визначення рівня електромагнітних завад від гірлянд ізоляторів і лінійної арматури [41], де 1 – гірлянда ізоляторів; $2, 3$ – лінійна арматура; 11 – конденсатор зв'язку

Конденсатор зв'язку 11 складається з чотирьох послідовно з'єднаних конденсаторів типу $СМР-133/\sqrt{3}-4400$ і має ємність 1100 пФ. Шини $6, 9, 12$ виконані з алюмінієвої труби діаметром 60 мм. Високочастотна частина установки відокремлена від кола високовольтного трансформатора двома послідовно установленими загороджувачами 8 , налаштованими на частоту $1,0$ МГц. Гірлянда ізоляторів 1 обладнана стандартною лінійною арматурою $2, 3$, причому замість лінійного проводу використовується зачищена алюмінієва труба 4 діаметром 50 мм і довжиною 3 м, на кінцях якої закріплені поліровані латунні кулі 5 діаметром 150 мм. Це дозволяє запобігти виникненню коронних розрядів на всіх близьких до гірлянди ізоляторів частинах установки. Значення опору між обкладками конденсатора зв'язку та землею становить 292 Ом на частоті $1,0$ МГц з кутом $14^\circ 20'$. Високочастотна напруга ЕМЗ знімається з опору $R = 300$ Ом і через неузгоджений коаксіальний кабель довжиною 10 м подається на вхід вимірювача завад типу ІП-12 [42], зі входу якого вимірюваний рівень ЕМЗ подається на реєструючий прилад (самописець)

типу Н-373/2. Ці прилади доповнені автоматичним перемикачем діапазонів вимірювань.

Гірлянда ізоляторів закріплена за допомогою тросу 15, системи блоків і лебідки 14, що дозволяє швидко опускати гірлянду на землю і змінювати досліджувану арматуру.

У зв'язку з прийнятими в ряді країн умовами визначення ЕМЗ використання наведених схем [38–41] на підвищених частотах ≥ 1 МГц нашттовхується на ряд труднощів, оскільки габарити елементів індуктивностей та конденсаторів зв'язку стають співмірними з довжиною хвилі на високій частоті, що не дозволяє ідентифікувати результати випробувань достовірно.

Дослідження авторів [43] показали, що при кількості елементів в гірлянді більше одного схема вимірювання струму систематично дає менші значення ЕМЗ, ніж схема NEMA [36]. Це визначається наявністю паразитних ємностей, за якими відгалужується частина високочастотного струму ЕМЗ, що утворюється ізоляторами. Тому в [43] запропонована модифікація схеми, яка наведена на рис. 1.8.

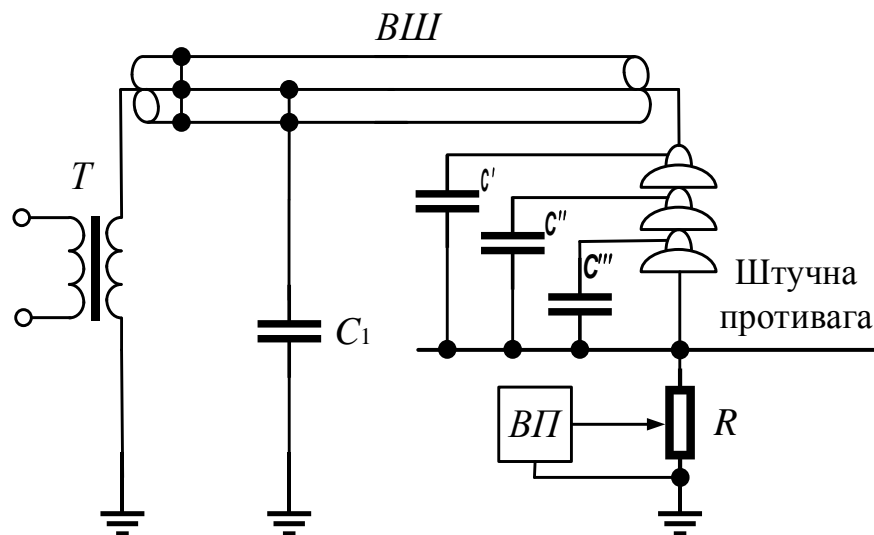


Рис. 1.8 Схема вимірювання електромагнітних завад в колі випробуваного об'єкта з використанням штучної противаги [43], де T – високовольтний трансформатор; $VШ$ – високовольтна шина; C_1 – конденсатор зв'язку;

$ВП$ – вимірювальний прилад; R – узгоджувач опір

Відповідно, модернізація схеми за рис. 1.8 полягає в створенні протяжної металевої противаги, ізолюваної від землі, при включенні вимірювального опору та приладу між противагою і землею. Дослідження за [43] показали істотне наближення результатів до отриманих за звичайною схемою NEMA [38]. Використання ж в якості противаги циліндра, співвісного з гірляндою, дозволило отримати результати, які практично повністю збігаються з результатами NEMA.

На основі результатів лабораторних досліджень в [44] було показано, що напруга формування корони та початкова напруга ЕМЗ для сухого та чистого ізолятора є однаковими. Автор досліджень F. O. McMillan [44] пропонує засоби для зниження ЕМЗ від коронуючого ізолятора, які базуються на використанні провідних покриттів елементів поверхні ізолятора.

В [45] описано лабораторне дослідження рівня електромагнітних завад, які виникають від електричних розрядів на штирових ізоляторах та елементах гірлянди ізоляторів тарілчастого типу при високій постійній напрузі. Було вивчено вплив значення та полярності прикладеної напруги, стану поверхні ізолятора і відносної вологості повітря, а також вивчені особливості досліджуваних явищ в порівнянні з умовами змінної напруги. Авторами [45] було виявлено, що ЕМЗ від ізолятора значно нижче при постійній напрузі, ніж при змінній при однаковому піковому значенні.

В публікації [46] описано дослідження рівня електромагнітних завад гірлянд ізоляторів при нормальних лабораторних умовах, у ході якого було отримано результати для двох видів гірлянд ізоляторів при різних умовах, а саме: а) в першому випадку в якості гірлянди використовувався ряд тарілчастих ізоляторів; б) в другому випадку використовувався ряд тарілчастих ізоляторів з електродом ослаблення поля, який був прикріплений на контактний перехід ізолятора. Авторами [46] експериментально підтверджено зниження рівня електромагнітних завад ізоляторів, які оснащені електродом ослаблення поля. Однак, для підтвердження запропонованого способу зниження ЕМЗ ізоляторів необхідно провести додаткові експериментальні дослідження для з'ясування механізму впливу електричного поля ізолятора на рівень ЕМЗ.

Установка для випробувань високовольних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад (УИР-110) акціонерного товариства «Южноуральський арматурно-ізоляторний завод» (РФ) [47] розроблена у відповідності [26, 27, 48]. Схематичне зображення елементів випробувальної установки наведено на рис. 1.9.

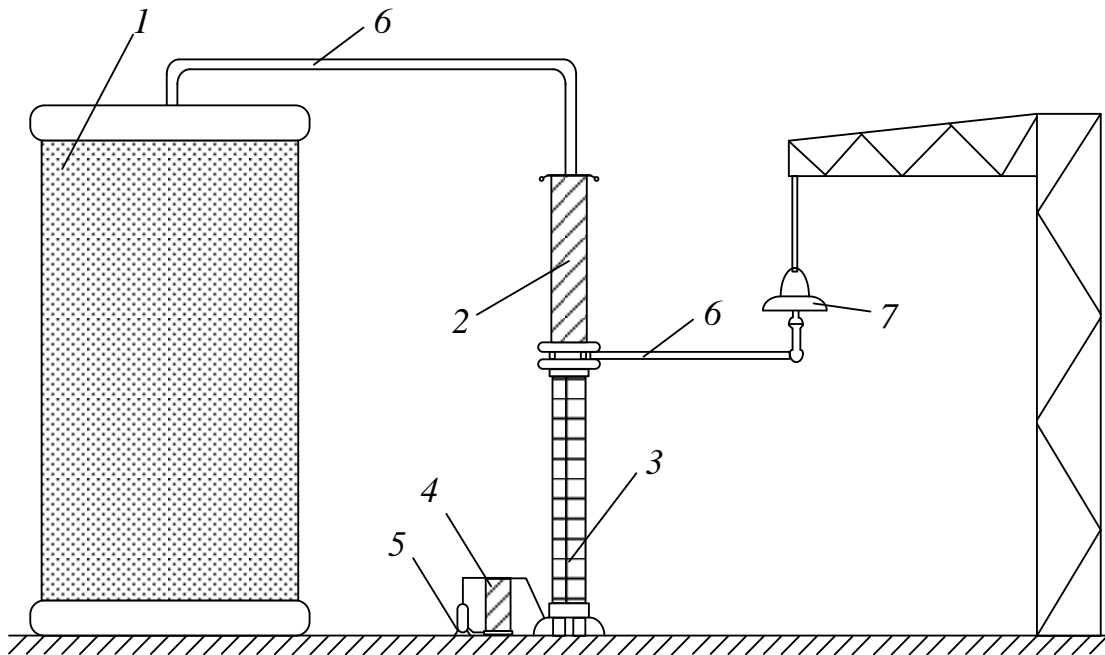


Рис. 1.9 Схематичне зображення елементів випробувальної установки [47], де
 1 – високовольний випробувальний трансформатор; 2 – фільтр L_1 ;
 3 – конденсатор зв'язку; 4 – фільтр L_2 ; 5 – елемент подільника напруги;
 6 – підвідна ошиновка; 7 – об'єкт випробувань

У випробувальній установці використовується омичний подільник напруги, коефіцієнт ділення якого становить при частоті вимірювання 0,5 МГц $K_d = 6,77$, а при частоті 1,0 МГц – $K_d = 6,33$.

В якості вимірювального приладу випробувальна установка укомплектована селективним мікровольтметром SMV-11 фірми RFT [49], який призначений для вимірювання квазіпікових значень напруги завад.

Для підключення вимірювального приладу в схемі установки використовується екрануючий кабель довжиною 20 метрів з хвильовим опором, що дорівнює 50 Ом.

Електрична схема установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад представлена на рис. 1.10.

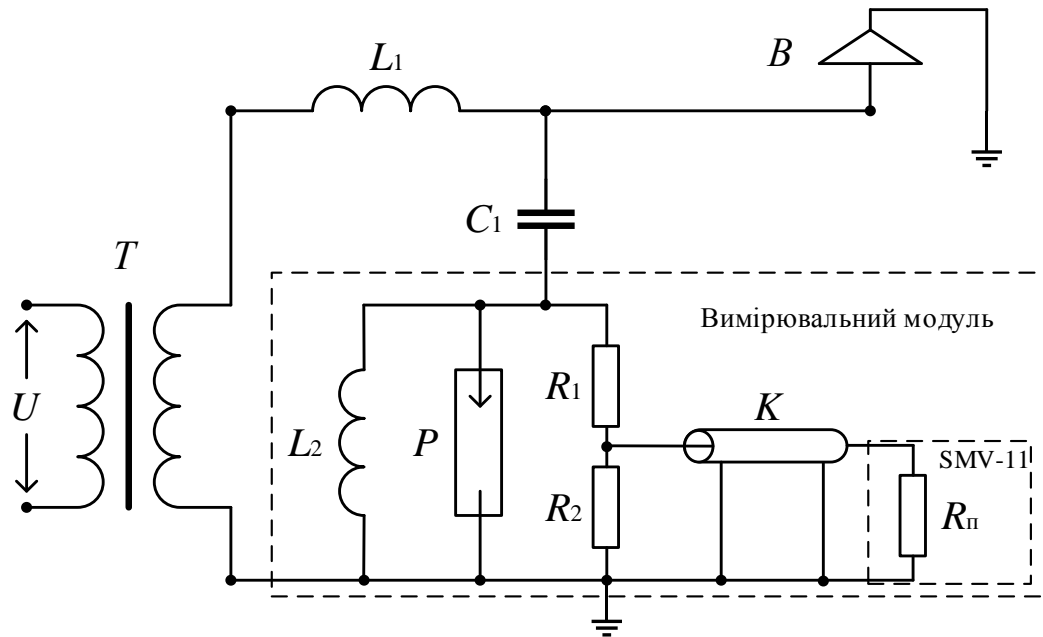


Рис. 1.10 Електрична схема установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад [47], де T – високовольтний випробувальний трансформатор; L_1 – фільтр; C_1 – конденсатор зв'язку; L_2 – фільтр; P – розрядник; R_1, R_2 – елементи подільника напруги (відповідно 254 Ом та 500 Ом); K – коаксіальний кабель; B – об'єкт випробувань; $R_{\text{п}}$ – внутрішній опір селективного мікрівольтметра SMV-11 [49]

Фільтр L_1 виконаний у вигляді котушки індуктивності, яка запобігає проходженню високочастотних струмів завад від джерела високої напруги або інших сторонніх джерел завад у вимірювальне коло. Індуктивність використовуваної котушки L_1 становить 11 мГн, що забезпечує її опір на частоті вимірювання 0,5 МГц рівний 34,6 кОм, а на частоті 1,0 МГц – 69 кОм. Габаритні розміри котушки індуктивності L_1 становлять: висота 590 мм, а її діаметр 130 мм. Розрахунок параметрів котушки L_1 за вище зазначеними характеристиками за довідником [50] визначає кількість її витків 680 при масі міді 1,24 кг (без врахування маси конструкційних елементів).

Елемент зв'язку ZS являє собою високовольтний конденсатор C_1 типу КОІS-3-500/4,5п ємністю 4500 пФ, габаритні розміри якого за висотою та діаметром відповідно дорівнюють 850 мм та 128 мм.

При $RL = 300$ Ом результуючий опір послідовно з'єднаних ZS та RL на частоті 0,5 МГц становить 308,2 Ом, а на частоті 1,0 МГц – 302,1 Ом. Фазний кут дорівнює $13,3^\circ$ на частоті 0,5 МГц і $6,7^\circ$ на частоті 1,0 МГц.

Вимірювальна частина установки містить фільтр L_2 , який виконаний у вигляді котушки індуктивності та призначений для шунтування струму промислової частоти. Індуктивність фільтра L_2 дорівнює 1,3 мГн. На частоті 0,5 МГц опір котушки індуктивності L_2 дорівнює 4084 Ом, а на частоті 1,0 МГц – 8168 Ом.

Розрахункове значення коефіцієнту ослаблення сигналу в випробувальній установці становить $K = 16,6$ дБ при частоті вимірювання, яка дорівнює 0,5 МГц, і $K = 16,4$ дБ при частоті 1,0 МГц.

За результатами первинної атестації даної установки було визначено коефіцієнт ослаблення сигналу: на частоті 0,5 МГц $K = 16,9$ дБ, а на частоті 1,0 МГц $K = 16,7$ дБ.

Недоліком установки [47] є оснащеність її великогабаритними, не спеціалізованими елементами L_1 , C_1 , та, в зв'язку з цим, – відсутність екранованої камери, що призводить до недостовірних значень вимірюваного рівня ЕМЗ. Виконання котушки L_1 є таким, що вона фактично виконує роль розвинутої антени для зовнішніх електромагнітних завад. Крім того, для штучного зниження коефіцієнту ослаблення сигналу K установки опір низьковольтного плеча подільника напруги R_2 вибраний в 10 раз більшим за рекомендоване CISPR 18-2 [37] значення 50 Ом, що призводить до порушення узгодженості елементів схеми установки на високих частотах.

Установка для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад акредитованої випробувальної лабораторії Акціонерного товариства «EGU Praha Engineering» (Чехія) [51] розроблена за

вимогами [26]. Схема установки наведена на рис. 1.11, а фото самої установки представлено на рис. 1.12.

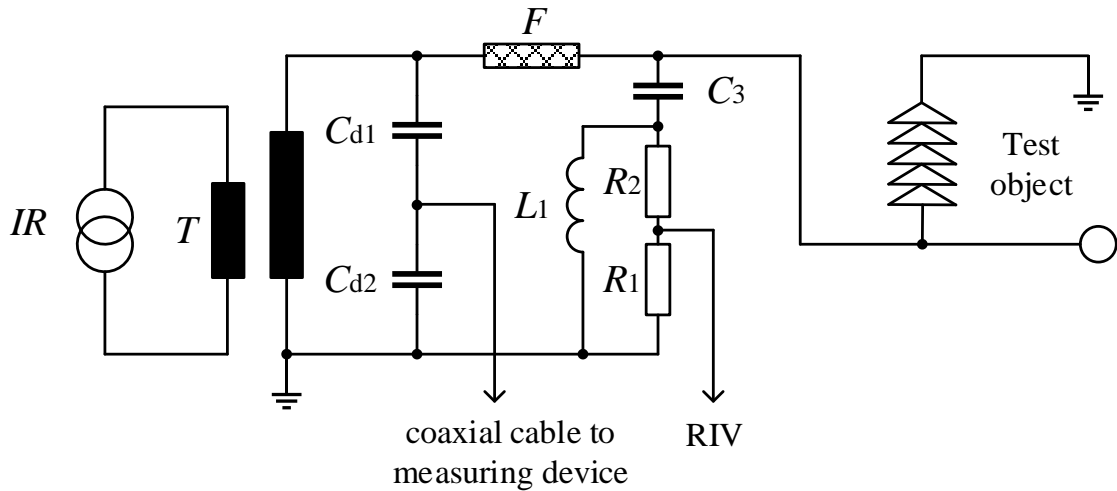


Рис. 1.11 Схема для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад [51], де IR – індуктивний регулятор; T – високовольтний випробувальний трансформатор; F – загороджуючий фільтр; C_{d1}/C_{d2} – подільник випробувальної напруги; C_3 – конденсатор зв'язку; L_1 – фільтр; R_1/R_2 – подільник напруги; RIV – вимірювач електромагнітних завад

В установці використано випробувальний трансформатор T фірми Fischer-Koln 3-6/250 кВ, 250 кВА.

Загороджуючий фільтр F виконаний у вигляді котушки, значення індуктивності якої становить 6,4 мГн, а її повний опір при частоті вимірювання 1,0 МГц – 40 200 Ом.

Конденсатор зв'язку C_3 розрахований на напругу 450 кВ та має номінальне значення ємності 2500 пФ. Габаритні розміри конденсатора зв'язку C_3 становлять: висота 1500 мм, а його діаметр – 260 мм, маса орієнтовно 100 кг.

Для визначення рівня електромагнітних завад в склад установки входить вимірювач електромагнітних завад типу ESH-2 фірми Rohde-Schwarz.



Рис. 1.12 Фото установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад за [51]

Фільтр L_1 виконаний у вигляді котушки індуктивності, значення індуктивності якої становить 3,2 мГн. Фільтр L_1 приєднаний паралельно до подільника напруги R_1/R_2 , фактичне значення опорів якого становить 275/50 Ом (що відповідає рекомендаціям CISPR 18-2 [37]).

Також установка оснащена подільником випробувальної напруги C_{d1}/C_{d2} типу LK-250, універсальним вольтметром типу MU15 фірми Siemens, цифровим таймером типу PM-172 фірми Olympia та вимірною системою стану атмосфери типу D4130 фірми Comet.

Установка за [51] дозволяє проводити випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад лише на одній частоті 1,0 МГц та має коригувальний коефіцієнт, який становить 22 дБ.

Як приклад, в табл. 1.4 представлено результати випробування двох зразків високовольтного ізолятора на допустимий рівень електромагнітних завад на частоті 1,0 МГц [51].

Таблиця 1.4

Рівень електромагнітних завад двох зразків високовольтного ізолятора

№	Випробувальна напруга, кВ	Рівень ЕМЗ, дБ		Допустимий рівень ЕМЗ ізолятора, дБ
		Ізолятор № 1	Ізолятор № 2	
1	33	70	54	73
2	30	24	48	67
3	28	24	47	65
4	26	24	46	62
5	20	24	43	55
6	10	24	31	34
7	0	24	24	–

Аналіз даних табл. 1.4 показує, що рівень електромагнітних завад випробуваних зразків високовольтного ізолятора в діапазоні випробувальної напруги від 10 кВ до 33 кВ не перевищує допустимого рівня ЕМЗ.

Недоліком [51] є те, що в публікації не наведені дані про рівень фону установки в діапазоні випробувальних напруг високовольтних ізоляторів. Наведені в табл. 1.4 дані рівня ЕМЗ при «нульовій» напрузі можуть бути ототожені як рівень фону установки. В зв'язку з цим наведення даних ізолятора № 1 згідно табл. 1.4 в діапазоні напруг від 10 кВ до 30 кВ включно протирічить вимогам CISPR 18-2 [37].

Відсутність (аналогічно [47]) в установці [51] екранованої камери призводить до проходження зовнішніх завад у вимірювальне коло, що в свою чергу значно впливає на результат визначення рівня ЕМЗ об'єкта випробування.

Елементи існуючих випробувальних установок на рівень ЕМЗ [47, 51] являють собою громіздкі конструкції. Згадані елементи установок розраховані як низькочастотні, проте при роботі на високих частотах, виникає непередбачувана взаємодія їх ємнісних та індуктивних складових струмів, що призводить до нестабільності результатів випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад і, як наслідок, до зниження ефективності відповідного випробувального електрообладнання, його не виправданого здорожчання та надмірного впливу зовнішніх електромагнітних завад. Крім того, значні розміри цих елементів унеможливають необхідне

екранування активних частин випробувальних установок від зовнішніх ЕМЗ (що є обов'язковим за рекомендаціями CISPR 18-2 [37]).

В якості загороджуючого фільтру в установках для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень ЕМЗ, гіпотетично, можливе використання високочастотних загороджувачів (ВЧЗ), які призначені для організації каналів високочастотного (ВЧ) зв'язку по високовольтних лініях електропередачі. В зв'язку з цим розглянемо їх деякі особливості.

Високочастотні загороджувачі здатні забезпечити необхідний опір для сигналів протиаварійної автоматики, релейного захисту і телемеханіки, промодульованих високою частотою, для їх передачі по фазних проводах або грозотросах високовольтних ПЛ (6 – 1150 кВ) [52, 53].

Високочастотні загороджувачі являють собою загороджуючі фільтри, які включаються в перетин фазного проводу, і можуть бути налаштовані на певні смуги частот загородження в діапазоні 16 – 1000 кГц.

Основними параметрами ВЧЗ є: клас напруги лінії електропередачі; смуга частот загородження; номінальний тривалий струм; номінальний короткочасний струм; ударний струм; значення активної складової повного опору; індуктивність реактора.

Основні складові конструкції ВЧЗ [54]:

– реактор загороджувача (РЗ) – силова котушка індуктивності, призначена для пропускання струму промислової частоти, що протікає по проводу лінії електропередачі, в якій включено ВЧЗ;

– захисний пристрій (ЗП), призначений для захисту реактора та елемента настроювання від перенапруг, що виникають в лініях і розподільних пристроях підстанцій (атмосферних, від короткого замикання, комутаційних);

– елемент настроювання (ЕН), призначений для отримання (разом з реактором) необхідного опору загородження в заданій смузі частот.

Конструктивно РЗ представляє собою силову котушку індуктивності (одношарову або багатшарову) виготовлену із проводу (як правило,

алюмінієвого або мідного), який розміщений на остові, виконаному з матеріалу з високими ізоляційними властивостями.

Елемент настроювання, який містить звичайно конденсатори та резистори, призначений для забезпечення, разом з реактором, необхідного опору загородження в заданій смузі частот. Елемент настроювання, в залежності від необхідної смуги частот загородження, виконується за схемою одночастотної настройки, двох- або триконтурної схеми загороджувального фільтра.

В якості захисного пристрою від комутаційних та грозових перенапруг використовують обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН), які виконані у вигляді колонки варисторів, розміщених в герметичному полімерному корпусі [54, 55].

Принцип дії високочастотного загороджувача заснований на використанні явища резонансу струмів $\dot{I}_C = -\dot{I}_L$ у паралельному контурі [56].

Сумарний опір загороджувача між вузловими точками приєднання є комплексним, тобто має активну та реактивну складові. Відповідно розрізняють смуги загородження по повному та активному опорам. У середній частині смуги загородження по повному опорі – це опір активний, на межах смуги він майже чисто реактивний [54].

Орієнтовна залежність від частоти повного опорі і його активної і реактивної складових показана на рис. 1.13 [55].

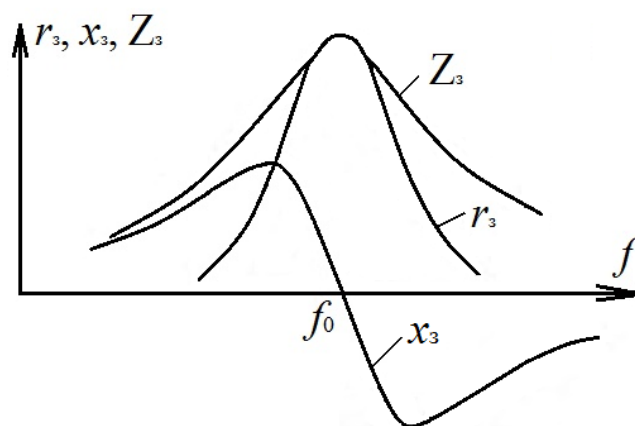


Рис. 1.13 Залежність опору високочастотного загороджувача від частоти [55], де r_3 – активна складова повного опорі; x_3 – реактивна складова повного опорі;

Z_3 – повний опір високочастотного загороджувача; f_0 – резонансна частота;

f – поточна частота

Із табл. 1.5 видно, що ВЧЗ охоплюють класи напруг ЛЕП від 6 кВ до 750 кВ із забезпеченням активної складової повного опору в діапазоні від 440 Ом до 650 Ом.

Протягом останніх десятиліть розроблено нові високочастотні загороджувачі, індуктивність яких може становити від 0,1 мГн до 2,5 мГн та активна складова опору загородження досягати 1000 Ом [59]. Виробники ВЧЗ заявляють про їхню можливість створення ВЧЗ з наступними перевагами:

- вага на 20 – 50 % менше від аналогів, що дозволяє встановлювати загороджувачі на опорних ізоляторах, конденсаторах та трансформаторах напруги;
- діаметр реактора на 15 – 20 % менше від аналогів, що дозволить знизити вітрове навантаження;
- можливість вибору смуги загородження з кроком 1,0 кГц [60].

Детальний аналіз існуючих високочастотних загороджувачів різних вітчизняних та зарубіжних виробників [59–64] показав, що вони також являють собою громіздкі елементи та характеризуються високою вартістю. Разом з тим їх прохідний опір не перевищує 1 кОм, в той час як для установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад опір ВЧЗ повинен бути не менше 20 кОм (що є обов'язковим за рекомендаціями CISPR 18-2 [37]).

При роботі загороджувачів на високих частотах ємнісні розподілені струми в реакторі частково компенсують індуктивну складову струмів, що призводить до нестабільності характеристик високочастотних загороджувачів у широкому діапазоні частот. Внаслідок цього частотні характеристики загороджувачів можуть не мати явно виражених резонансних частот, при цьому не реалізуються переваги резонансу паралельного з'єднання L , C -елементів.

Для запобігання подібних явищ необхідно враховувати при розробці високочастотного загороджувача розподілення електричного поля, що створюється в конструкції котушки індуктивності (реакторі), а також його зміни внаслідок впливу різних факторів. Це в свою чергу потребує вирішення задачі

регулювання електричного поля шляхом зміни розмірів ізоляційних елементів котушки [65].

До кола пов'язаних з ВЧЗ питань належить регулювання розподілення електричного поля в ізоляційній конструкції котушки за допомогою формування границь розділу діелектриків, яке, власне, є однією з ключових задач у техніці високих напруг при створенні високовольтних установок та пристроїв [66–68].

Аналіз робіт [69–71] показав, що дослідження ВЧЗ проводяться без узгодження розподілення індукованого потенціалу котушки з електричним потенціалом в широкому діапазоні частот, хоча базові основи таких розрахунків запропоновані в [72–74]. Існуючі ВЧЗ для повітряних ліній не можуть бути використані в установках для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, оскільки мають невелике значення прохідного опору (до 650 Ом, в той час як прохідний опір ВЧЗ для таких установок має бути щонайменше 20000 Ом).

В зв'язку з цим виникає необхідність розробки нових підходів до розгляду електромагнітних процесів у високочастотних загороджувачах в установках для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад на основі теорії кіл з розподіленими параметрами з метою створення загороджувачів як малогабаритних спеціалізованих елементів з прогнозованими розрахунковими характеристиками.

Висновки до розділу 1

Проблема підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад обумовлена зростаючими вимогами міжнародних стандартів до необхідного зниження рівня електромагнітних завад як від ізоляторів, так і від інших працюючих електротехнічних пристроїв. За результатами аналізу проведених досліджень в даній області можна зробити наступні висновки:

1. Високовольтні підвісні тарілчасті ізолятори, які є одними з основних елементів повітряних ліній електропередач, повинні відповідати підвищеним

сучасним вимогам, що стосуються зниження їх рівня електромагнітних завад в діапазоні частот 0,5 – 1,0 МГц і вище.

2. Для зниження електромагнітних завад від ізоляторів необхідно проводити пошук нових підходів до удосконалення їх конструкції, проведення наукових досліджень процесів, пов'язаних з випробуваннями високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, забезпечити розвиток методів випробувань з широким використанням сучасної обчислювальної техніки та розрахунково-теоретичних досліджень.

3. Існуючі установки для випробувань високовольтних тарілчастих ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад є недосконалими та неефективними, не мають необхідного екранування, побудовані на основі теорії кіл з зосередженими параметрами з використанням електрообладнання, яке складається з неспеціалізованих великогабаритних елементів, що обмежує їх застосування в розширених діапазонах частот, а також можливість доступного практичного тиражування.

4. Одними із визначальних елементів створення випробувальних установок на допустимий рівень електромагнітних завад є їх високоомні високочастотні загороджувачі, які не можуть бути запозичені з техніки існуючих високочастотних загороджувачів, призначених для організації каналів високочастотного зв'язку по високовольтних лініях електропередач. Необхідні для випробувальних установок на допустимий рівень електромагнітних завад високочастотні загороджувачі повинні розроблятися на основі нових наукових підходів, пов'язаних з використанням теорії електромагнітного поля та кіл з розподіленими параметрами.

РОЗДІЛ 2

РЕГУЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В КОТУШЦІ ІНДУКТИВНОСТІ (РЕАКТОРІ) ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЗАГОРОДЖУВАЧА

2.1 Розробка математичної моделі компенсуючого реактора високочастотного загороджувача

При дослідженні електромагнітних процесів у високоомних високочастотних загороджувачах їх математичне моделювання є принципово важливою задачею. Сучасні засоби розрахунку, на відміну від класичного методу дослідження складних електромагнітних систем [75], дозволяють швидко одержувати конкретні розрахункові результати за допомогою математичного моделювання з використанням персонального комп'ютера (ПК).

Задачею наступного розгляду є побудова теорії реактора ВЧЗ на основі методології електричних мереж з розподіленими параметрами, що дасть змогу опанувати у майбутньому розширені діапазони частот до ~ 5 МГц.

На рис. 2.1 представлено запропоновану структурну модель, яка враховує електрофізичні взаємодії в реакторі $L_{I;II}$ високочастотного загороджувача [76].

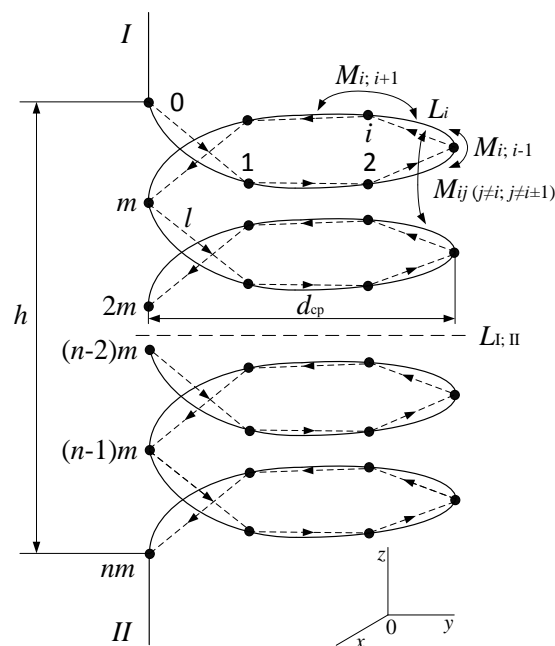


Рис. 2.1 Структурна модель реактора високочастотного загороджувача

На рис. 2.1 прийняті наступні позначення: I, II – підводи реактора; n – кількість витків реактора; m – відображає розбиття одного витка реактора на ціле число провідників (для досягнення прийнятної похибки $\sim 1\%$, $m \geq 12$), причому ці частини замінюються елементарними прямолінійними провідниками (хордами) $0 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 2; \dots i-1 \rightarrow i; i \rightarrow i+1; \dots nm-1 \rightarrow nm$. В цьому випадку довжина кожного прямолінійного провідника є однаковою – l ; стрілка \rightarrow показує вибраний позитивний напрямок протікання струму; номерами $0; 1; 2; \dots i; \dots nm$ позначені вузли, які знаходяться на середній лінії проводу гвинтової (як правило) намотки реактора по діаметру $d_{\text{ср}}$.

До речі, згідно [54] в деяких країнах (ФРН) використовуються загороджувачі у вигляді силової котушки без елементів настроювання.

Для аналізу процесів та визначення параметрів реактора високочастотного загороджувача розглянемо схему заміщення із застосуванням типових Т-елементів, наведену на рис. 2.2.

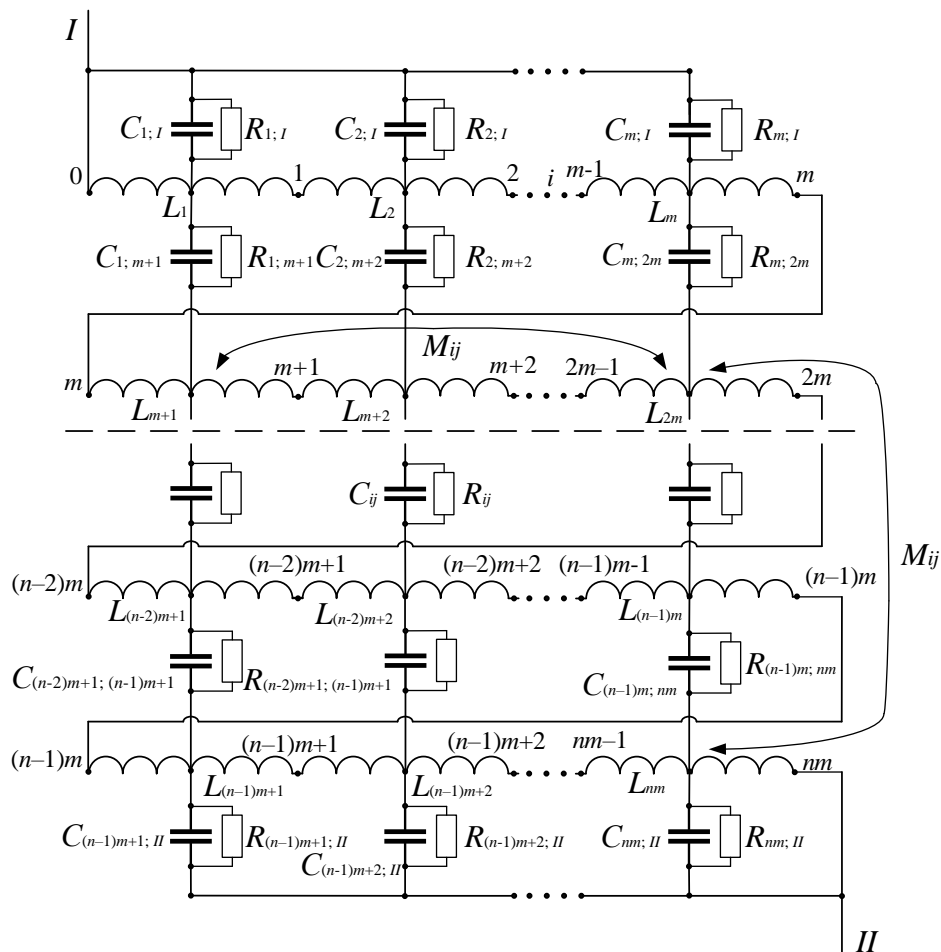


Рис. 2.2 Схема заміщення реактора з використанням типових Т-елементів

Вважаючи, що координати кожної з точок i (x_i, y_i, z_i) відомі в довільній декартовій системі координат $(0; x; y; z)$ довжину l , яка є однаковою для всіх елементарних провідників, можна записати у вигляді виразу:

$$l = \sqrt{d_{\text{cp}}^2 \sin^2 \frac{\pi}{m} + \frac{h^2}{n^2 m^2}}, \quad (2.1)$$

де h – висота реактора (рис. 2.1).

Індуктивність L_l кожного елементарного провідника l можна представити відомим виразом, як для прямолінійного провідника кругового перерізу при досить високій частоті [77]:

$$L_l = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad (2.2)$$

де l – довжина елементарного провідника за (2.1); $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Гн/м) – магнітна стала, r – радіус перерізу проводу намотки реактора. При використанні в реакторі височастотного загороджувачі іншої форми перерізу проводу, формула (2.2) може бути уточнена за [77], що не є принциповим.

Ємність між елементарними провідниками C_{ij} розраховуємо за формулою (2.3), як для двох паралельних провідників при однаковій довжині l та радіусі r [78]:

$$C_{ij} = C_l = \frac{\pi \epsilon_0 l}{\ln \left(\frac{h/n}{2r} + \sqrt{\frac{h^2/n^2}{4r^2} - 1} \right)}, \quad (2.3)$$

де h/n – відстань між центрами провідників за рис. 2.1;

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (Ф/м) – електрична стала.

Формула (2.3) може бути уточнена при некруговій формі перерізу проводу реактора [79]. Ємності $C_{i;I}$ та $C_{i;II}$ залежать від форми струмопроводів I, II , їх можливого екранування тощо, але вони завжди можуть бути визначені [79].

Значення опорів R_{ij} , що моделюють активні втрати в ізоляції та мають малий вплив при використанні високоякісних ізоляційних матеріалів, можна визначити, як

$$R_{ij} = \frac{1}{\omega C_{ij} \operatorname{tg} \delta_{ij}}, \quad (2.4)$$

де $\operatorname{tg} \delta_{ij}$ – характерний кут втрат у діелектрику в залежності від частоти f ($\omega = 2\pi f$) [80].

Взаємоіндуктивності M_{ij} ($j \neq i$) повинні бути враховані для всіх без винятку елементарних провідників, що моделюють обмотку реактора. Але із них необхідно виокремити визначення взаємоіндуктивностей для «сусідніх» та «віддалених» провідників.

Взаємоіндуктивність елементарних провідників, що мають спільну точку, пропонується розраховувати за виразом:

$$M_{i \rightarrow i; i \rightarrow i+1} = -\frac{\mu_0 l}{2\pi} \cdot \cos \varphi_c \cdot \ln \left(1 + \frac{2l}{c} \right), \quad (2.5)$$

де φ_c – кут між «сусідніми» провідниками l ; c – протилежна йому сторона у трикутнику, створеному цими провідниками, при цьому

$$c = \sqrt{\frac{d_{\text{сп}}^2}{2} \left(1 - \cos \frac{4\pi}{m} \right) + \left(2 \frac{h}{nm} \right)^2}, \quad (2.6)$$

а $\cos \varphi_c = 1 - \frac{c^2}{2l^2}$. При виводі (2.5) використовувались матеріали виразу (2-87) [77] із протилежним знаком.

Взаємоіндуктивність для «віддалених» елементарних провідників $i \rightarrow i+1$; $j \rightarrow j+1$, які не мають спільної точки, визначається методом участків [77, 78] наступним чином. Введемо координату $0 \leq l' \leq l$ від початку до кінця елементарного провідника $i \rightarrow i+1$, а координату $0 \leq l'' \leq l$ від початку до кінця провідника $j \rightarrow j+1$. Тоді відстань D між точками, що визначаються координатами l' та l'' на відповідних елементарних провідниках визначається виразом:

$$D = \sqrt{\left[x_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{l'}{l} - x_j - (x_{j+1} - x_j) \frac{l''}{l} \right]^2 + \left[y_i + (y_{i+1} - y_i) \frac{l'}{l} - y_j - (y_{j+1} - y_j) \frac{l''}{l} \right]^2 + \left[z_i + (z_{i+1} - z_i) \frac{l'}{l} - z_j - (z_{j+1} - z_j) \frac{l''}{l} \right]^2}, \quad (2.7)$$

а косинус кута $\varphi_{i \rightarrow i+1; j \rightarrow j+1}$ між спрямуваннями провідників $i \rightarrow i+1$ та $j \rightarrow j+1$ за [81]:

$$\cos \varphi_{i \rightarrow i+1; j \rightarrow j+1} = \frac{(x_{j+1} - x_j)(x_{i+1} - x_i) + (y_{j+1} - y_j) \times (y_{i+1} - y_i) + (z_{j+1} - z_j)(z_{i+1} - z_i)}{\sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2 + (z_{j+1} - z_j)^2} \times \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}. \quad (2.8)$$

Тоді вираз $M_{i \rightarrow i+1; j \rightarrow j+1}$ має вигляд:

$$M_{i \rightarrow i+1; j \rightarrow j+1} = \frac{\mu_0 l}{4\pi} \cos \varphi_{i \rightarrow i+1; j \rightarrow j+1} \int_0^{l'=l} \int_0^{l''=l} \frac{dl' dl''}{D}, \quad (2.9)$$

де D визначається (2.7).

Подвійний інтеграл в (2.9) має завжди $D > 0$, і може бути розрахованим за допомогою програмного пакету Mathcad при відомих координатах точок $i, i+1; j, j+1$ [82].

Для зниження порядку системи рівнянь, що описують усталений режим реактора з формулами (2.2) – (2.9), перейдемо до його схеми заміщення з використанням типових П-елементів, яка представлена на рис. 2.3, де ланка $C_{1,2;l}$ означає паралельне з'єднання «половинних» за провідністю ланок

$$\frac{C_{1;l}}{2}; 2R_{1;l} \text{ та } \frac{C_{2;l}}{2}; 2R_{2;l} \text{ (... і далі до } C_{m-1,m;l}; R_{m-1,m;l}).$$

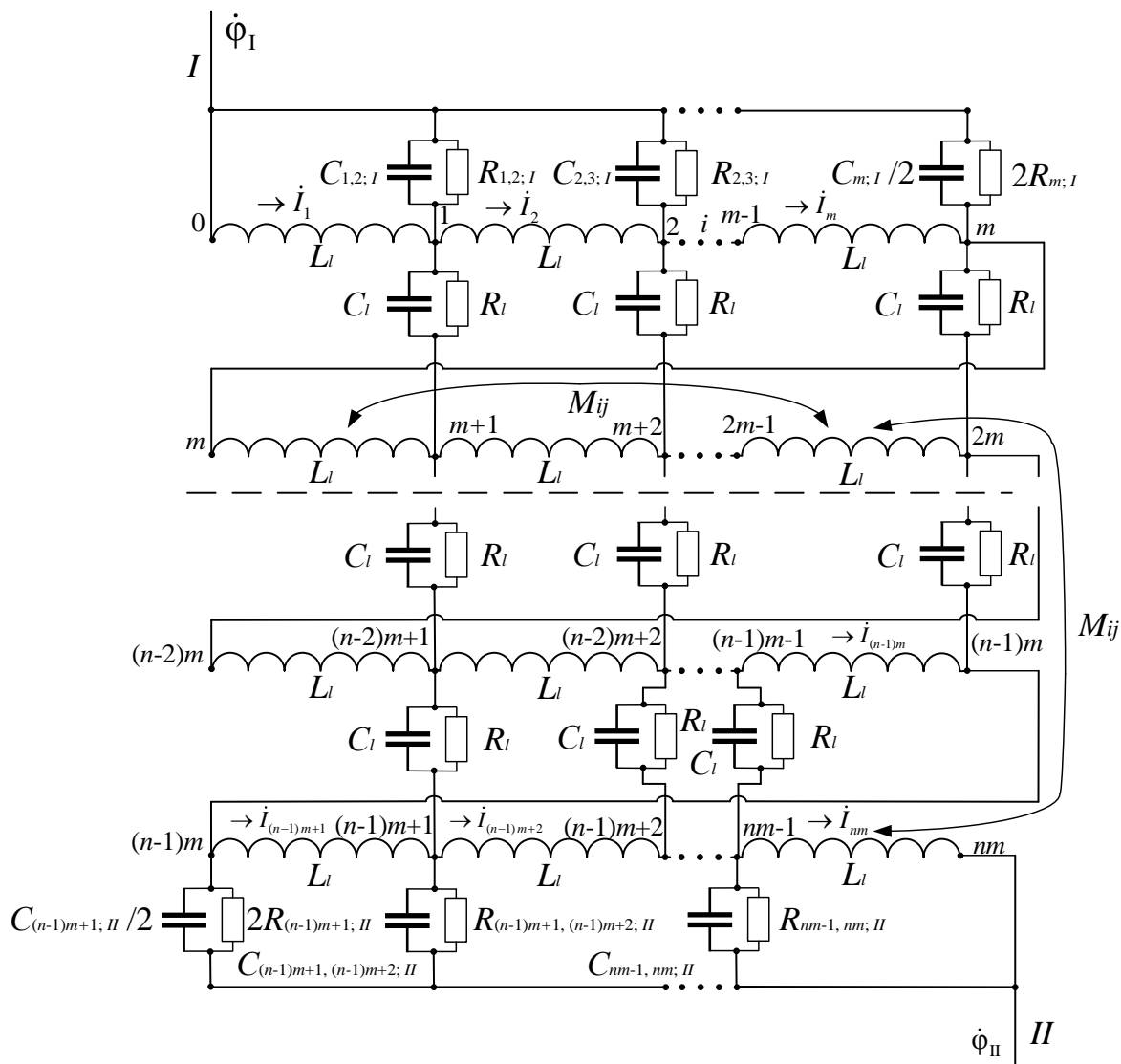


Рис. 2.3 Схема заміщення реактора з використанням типових П-елементів

Аналогічно утворюються елементи виду:

$$C_{(n-1)m+1, (n-1)m+2; II}; R_{(n-1)m+1, (n-1)m+2; II} \dots C_{nm-1, nm; II}; R_{nm-1, nm; II}.$$

Для складання системи рівнянь реактора вводяться потенціали струмопроводів $\dot{\phi}_I$, $\dot{\phi}_{II}$, які вважаються заданими. Шуканими є різниці потенціалів вузлових точок $\dot{\phi}_1; \dot{\phi}_2 \dots \dot{\phi}_{m-1}$, а також струми в індуктивних елементах $\dot{I}_1; \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_{nm}$. Тоді маємо систему рівнянь для потенціалів (2.10) та для струмів (2.11):

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_1 = j\omega L_l \dot{I}_1 + j\omega \sum_{i=2}^{nm} M_{1i} \dot{I}_i; \\
\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 = j\omega L_l \dot{I}_2 + j\omega M_{21} \dot{I}_1 + j\omega \sum_{i=3}^{nm} M_{2i} \dot{I}_i; \\
\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3 = j\omega L_l \dot{I}_3 + j\omega M_{31} \dot{I}_1 + j\omega M_{32} \dot{I}_2 + j\omega \sum_{i=4}^{nm} M_{3i} \dot{I}_i; \\
\cdots \\
\dot{\phi}_{nm-1} - \dot{\phi}_{\text{II}} = j\omega L_l \dot{I}_{nm} + j\omega \sum_{i=1}^{nm-1} M_{nmi} \dot{I}_i;
\end{array} \right. \quad (2.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{I}_1 + \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_1}{\underline{Z}_{1,2; \text{I}}} = \dot{I}_2 + \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_{m+1}}{\underline{Z}_l}; \\
\dot{I}_2 + \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2}{\underline{Z}_{2,3; \text{I}}} = \dot{I}_3 + \frac{\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_{m+2}}{\underline{Z}_l}; \\
\cdots \\
\dot{I}_m + \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_m}{\underline{Z}_{m; \text{I}}} = \dot{I}_{m+1} + \frac{\dot{\phi}_m - \dot{\phi}_{2m}}{\underline{Z}_l}; \\
\dot{I}_{m+1} + \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_{m+1}}{\underline{Z}_l} = \dot{I}_{m+2} + \frac{\dot{\phi}_{m+1} - \dot{\phi}_{2m+1}}{\underline{Z}_l}; \\
\cdots \\
\dot{I}_{(n-1)m} + \frac{\dot{\phi}_{(n-2)m} - \dot{\phi}_{(n-1)m}}{\underline{Z}_l} = \dot{I}_{(n-1)m+1} + \frac{\dot{\phi}_{(n-1)m} - \dot{\phi}_{\text{II}}}{\underline{Z}_{(n-1)m; \text{II}}}; \\
\dot{I}_{(n-1)m+1} + \frac{\dot{\phi}_{(n-2)m+1} - \dot{\phi}_{(n-1)m+1}}{\underline{Z}_l} = \dot{I}_{(n-1)m+2} + \frac{\dot{\phi}_{(n-1)m+1} - \dot{\phi}_{\text{II}}}{\underline{Z}_{(n-1)m+1, (n-1)m+2; \text{II}}}; \\
\cdots \\
\dot{I}_{nm-1} + \frac{\dot{\phi}_{(n-1)m-1} - \dot{\phi}_{nm-1}}{\underline{Z}_l} = \dot{I}_{nm} + \frac{\dot{\phi}_{nm-1} - \dot{\phi}_{\text{II}}}{\underline{Z}_{nm-1, nm; \text{II}}};
\end{array} \right. \quad (2.11)$$

$$\text{де } \underline{Z}_{m; \text{I}} = 2R_{m; \text{I}} + \frac{2}{j\omega C_{m; \text{I}}}, \quad \underline{Z}_{(n-1)m; \text{II}} = 2R_{(n-1)m+1; \text{II}} + \frac{2}{j\omega C_{(n-1)m+1; \text{II}}}.$$

Всього маємо замкнену систему з $nm-1$ невідомими різницями потенціалів та з nm невідомими струмами \dot{I}_i ($i = 1, \dots, nm$).

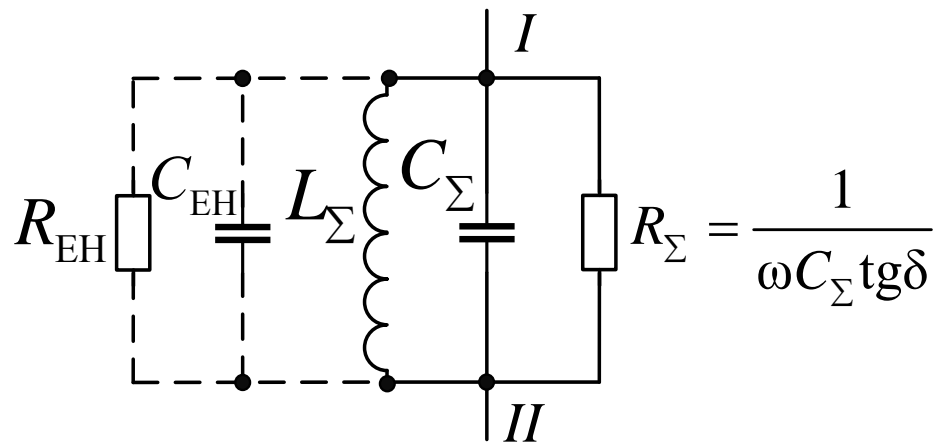


Рис. 2.4 Еквівалентна схема заміщення високочастотного реактора в узгодженому режимі, де L_{Σ} – «сумарна» індуктивність реактора, C_{Σ} – «власна» ємність реактора (штриховими лініями показані додаткові параметри елементів настроювання R_{EH} , C_{EH} при використанні реактора в схемі ВЧЗ)

Такий режим реактора, в якому індуктивні та ємнісні складові струмів в широкому діапазоні частот не будуть залежати один від одного, можна назвати компенсуючим. При цьому еквівалентна схема заміщення реактора за рис. 2.4 залишається незмінною, а параметри реактора – стабільними та прогнозованими в області робочих частот до ~ 5 МГц. Без виконання взаємоузгодження ємнісних та індуктивних струмів в реакторі його параметри будуть нестабільними, а характеристики – такими, що не підлягають прогнозованому розрахунку за схемою рис. 2.4.

У підсумку, в роботі запропоновано вперше математичну модель реактора високочастотного загороджувача, що заснована на використанні теорії кіл з розподіленими параметрами та можливостей сучасної обчислювальної техніки, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує вплив індуктивності та взаємоіндуктивності його окремих витків та частин провідників, а також їхню ємність.

2.2 Розподілення індукованого та електричного потенціалів в соленоїдальній котушці індуктивності високочастотного загороджувача

При розробці установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад значну увагу приділяють одному з основних складових елементів – високочастотному загороджувачу, який виконує функцію запобігання проникненню ззовні струмів ЕМЗ в високовольтні з'єднувальні кола і, отже, послаблення струмів ЕМЗ від впливу завадоутворюючих джерел у високовольтній частині установки.

Щоб високочастотний загороджувач характеризувався високою вибірковістю та високим опором на частотах $\geq 1,0$ МГц необхідно проводити регулювання електричного поля на основі узгодження розподілення індукованого та електричного потенціалів в реакторі (котушці індуктивності) загороджувача (за розглядом попереднього розділу).

Питання, які пов'язані із проведенням регулювання електричного поля в високовольтних конструкціях вирішується шляхом зміни геометрії електродів, вибором типу та розмірів ізоляційних елементів розрахунково-теоретичним та (або) експериментальним методами, які розглянуті в [83–85].

Значний досвід розвитку теоретичних засад регулювання електричного поля отримано при розробці високовольтних подільників напруги [86–89].

В подальшому будемо розглядати режим компенсуючого реактора при його виконанні як соленоїдальної котушки, що найпростіше реалізувати в установці для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень ЕМЗ, оскільки в зазначеній установці відсутні значні струми навантаження або короткого замикання (для запобігання виникнення як аварійної ситуації високовольтна частина установки приєднується до високовольтного трансформатора через запобіжник [37]). Ізоляційний остов соленоїдальної котушки має осьову симетрію, в зв'язку з чим розрахункова модель для визначення індукованого потенціалу в котушці представлена на рис. 2.5 [90].

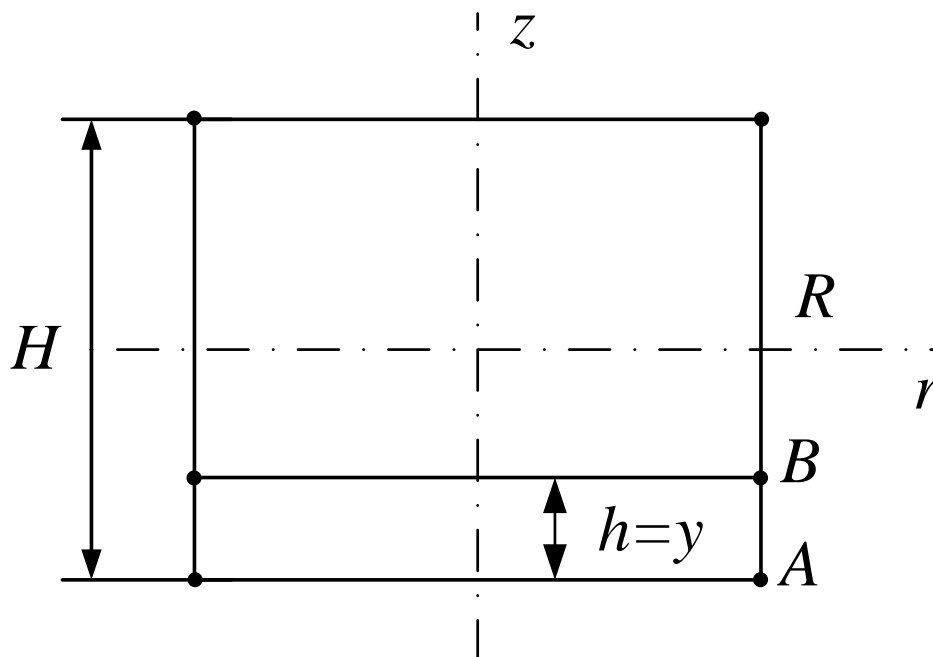


Рис. 2.5 Розрахункова модель соленоїдальної котушки [90], де H – висота котушки; R – радіус котушки; h – відстань між центрами контурів A та B

Взаємну індуктивність для двох однакових кругових контурів A та B , які розташовані в паралельних площинах так, що їх центри знаходяться на одній вісі z можна представити відомим виразом [77]:

$$M = \mu_0 R f(k), \quad (2.14)$$

де R – радіус контурів, $f(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right)K - \frac{2}{k}E$, K та E – повні еліптичні інтеграли

першого та другого роду з модулем $k = \sqrt{\frac{4R^2}{h^2 + 4R^2}}$, h – відстань між центрами контурів, а значення K та E мають загальновідомі вирази (2.15), (2.16) [91]:

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2}} d\beta, \quad (2.15)$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2} d\beta. \quad (2.16)$$

З урахуванням виразів (2.15, 2.16) та приведенням формули (2.14) до безрозмірного вигляду ($h = y$, $y = \alpha R$) отримаємо загальний вираз:

$$\begin{aligned} \frac{M}{R\mu_0} = F(\alpha) = & \left(\frac{\alpha^2 + 2}{\sqrt{\alpha^2 + 4}} \right) \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2}} d\beta - \\ & - \sqrt{\alpha^2 + 4} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2} d\beta, \end{aligned} \quad (2.17)$$

де $k = \sqrt{\frac{4}{\alpha^2 + 4}}$.

В якості прикладу вираз (2.17) застосуємо для окремого випадку при загальній висоті соленоїда $H = 2R$.

Допустимо, що в соленоїдальній котушці протікає струм $i = I_m \cdot \sin \omega t$, а кількість витків котушки $N \gg 1$. Визначення розподілення індукованого потенціалу в котушці проводимо в залежності від висоти y , $0 \leq y \leq 2R$. Оскільки $y = \alpha R$, досліджуємо залежність індукованого потенціалу $\varphi = \varphi(\alpha)$.

Виділимо на відстані h' шар витків dh' , який містить кількість витків $dN' = dh' \frac{N}{H}$. Напруга, яка індукується в шарі витків dh' , буде визначатися виразом:

$$\begin{aligned} d\varphi = \pm dh' \frac{N}{H} \cdot \omega \int_0^H dy \frac{N}{H} \cdot I_m \cdot \cos \omega t \cdot M(h', y) = \\ = \pm \omega \cdot dh' \frac{N^2}{H^2} I_m \cdot \cos \omega t \int_0^H M(h', y) dy, \end{aligned} \quad (2.18)$$

де $\int_0^H M(h', y) dy = \Phi(h')$, а знак «+» або «-» обирається виходячи із заданого позитивного напрямку струму в котушці.

В загальному випадку індукований потенціал φ в котушці з врахуванням виразу (2.18) може бути представлений як $\varphi = \sum d\varphi$:

$$\varphi = \pm \omega \frac{N^2}{H^2} I_m \cdot \cos \omega t \int_0^H \Phi(h') dh', \quad (2.19)$$

а його розподілення по висоті h' визначається виразом:

$$\varphi(h') = \pm \omega \frac{N^2}{H^2} I_m \cdot \cos \omega t \int_0^{h'} \Phi(h') dh'. \quad (2.20)$$

Розглянемо в (2.18) інтеграл $\Phi(h') = \int_0^H M(h', y) dy$. Проводячи в ньому підстановку $h' = y' = \alpha' R$, $y = \alpha R$ та провівши необхідні скорочення, замість (2.17) одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{M(h', y)}{R\mu_0} = F(\alpha', \alpha) = & \frac{(\alpha' - \alpha)^2 + 2}{\sqrt{(\alpha' - \alpha)^2 + 4}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2}} d\beta - \\ & - \sqrt{(\alpha' - \alpha)^2 + 4} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2} d\beta, \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\text{де } k = \sqrt{\frac{4}{(\alpha' - \alpha)^2 + 4}}.$$

Тоді:

$$\Phi(\alpha') = \mu_0 R^2 \int_0^{\alpha_{\max}} F(\alpha', \alpha) d\alpha, \quad (2.22)$$

$$\text{де } \alpha_{\max} = \frac{H}{R}.$$

Одержаний за (2.22) графік залежності $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ від α' представлений на рис. 2.6.

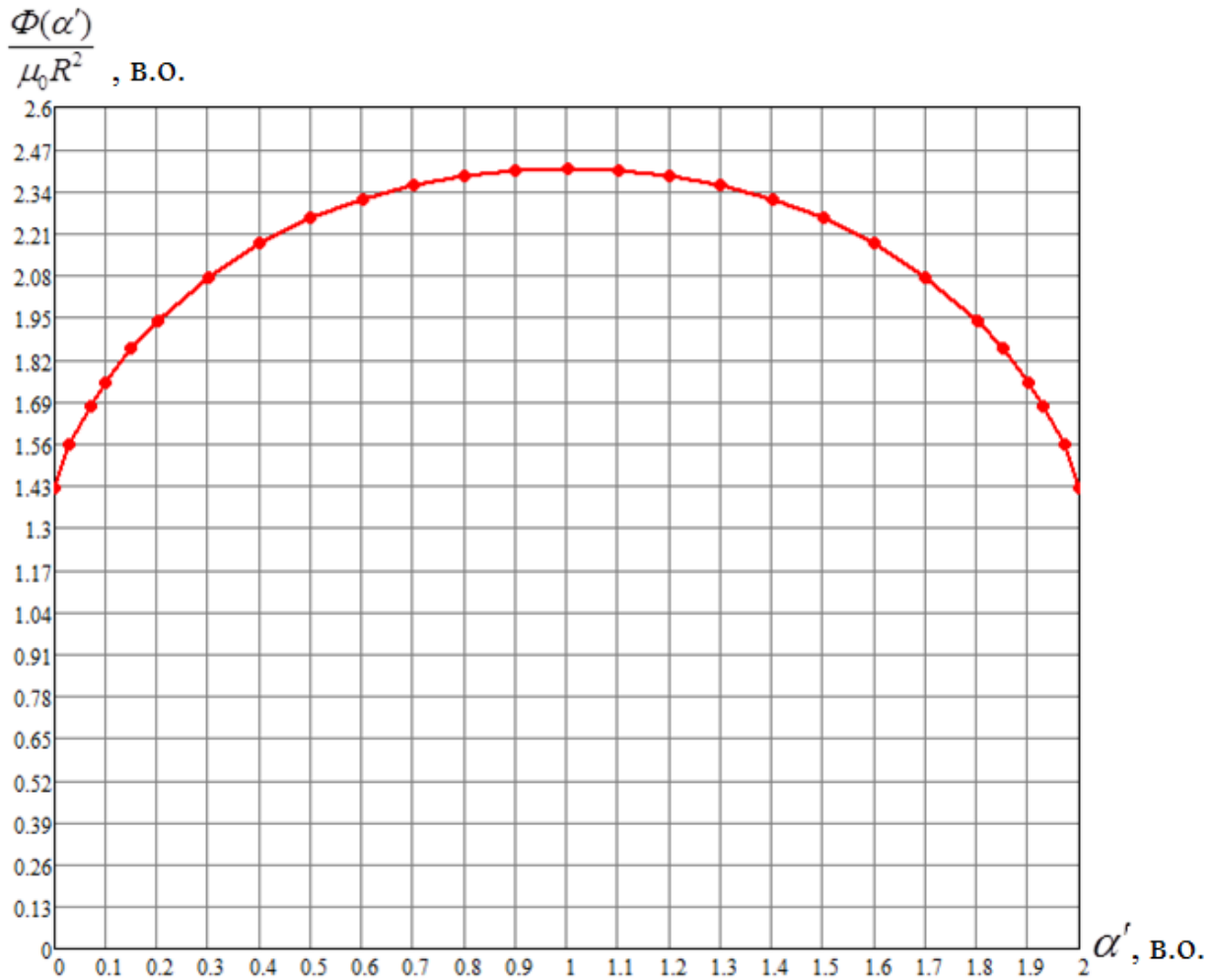


Рис. 2.6 Графік залежності $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ від α'

Мінімальне значення $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ відповідає значенням $\alpha' = 0; \alpha' = 2,0$ і складає 1,42392. Максимальне значення $\frac{\Phi(\alpha')_{\max}}{\mu_0 R^2}$ відповідає значенню $\alpha' = 1,0$ і складає 2,41208. Функція $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ монотонно змінюється від мінімального до максимального значень, і має екстремум в точці $\alpha' = 1,0$.

На основі (2.20) визначимо залежність:

$$\varphi(\alpha') = \pm \mu_0 \cdot \omega \frac{N^2}{H^2} R^3 I_m \cdot \cos \omega t \int_0^{\alpha'} \Phi(\alpha') d\alpha'. \quad (2.23)$$

Введемо функцію $\psi(\alpha') = \int_0^{\alpha'} \Phi(\alpha') d\alpha'$ та за даними рис. 2.10 з

використанням розрахункового методу трапецій [92] визначимо розподілення індукваного потенціалу ψ від α' (у відносних одиницях). Метод трапецій використовувався у визначенні площі за рис. 2.6 з кроком $\Delta\alpha' = 0,1$ (в.о). В результаті було отримано графік залежності функції $\psi(\alpha')$, який представлено на рис. 2.7.

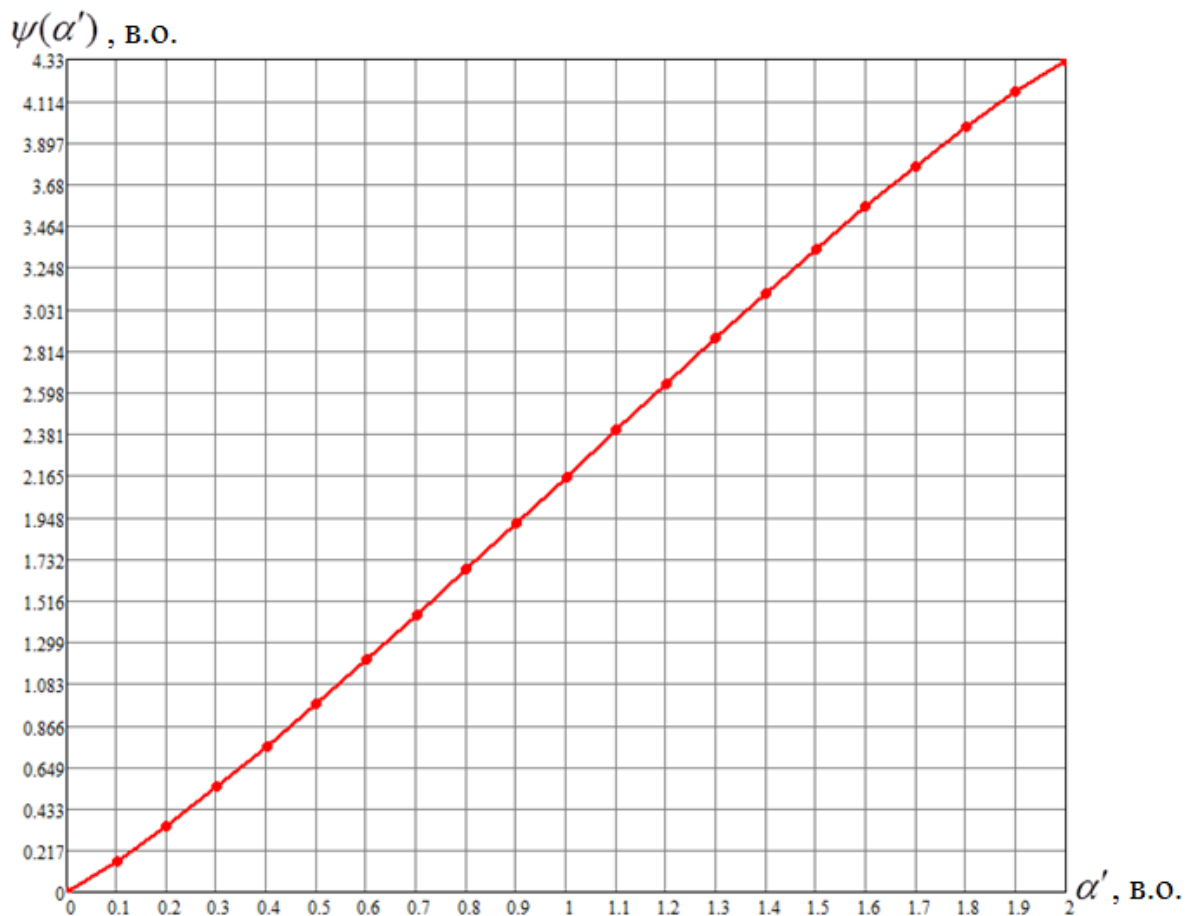


Рис. 2.7 Графік залежності функції $\psi(\alpha')$

Аналіз залежності функції ψ від α' на рис. 2.7 показує, що вона має нелінійний характер.

Числові значення розподілення індукваного потенціалу по висоті котушки $H = 140$ мм (з кроком між точками 7 мм) та заданому потенціалі $\Delta\phi = 100$ В наведені в табл. 2.1, а також представлено графічно на рис. 2.8.

Таблиця 2.1

Числові значення розподілення індукованого потенціалу по висоті котушки H

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H , мм	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
φ_1 , В	0	3,72	7,99	12,64	17,56	22,69	27,98	33,38	38,88	44,43	50,00
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
H , мм	77	84	91	98	105	112	119	126	133	140	
φ_1 , В	55,57	61,12	66,62	72,02	77,31	82,43	87,36	92,00	96,28	100	

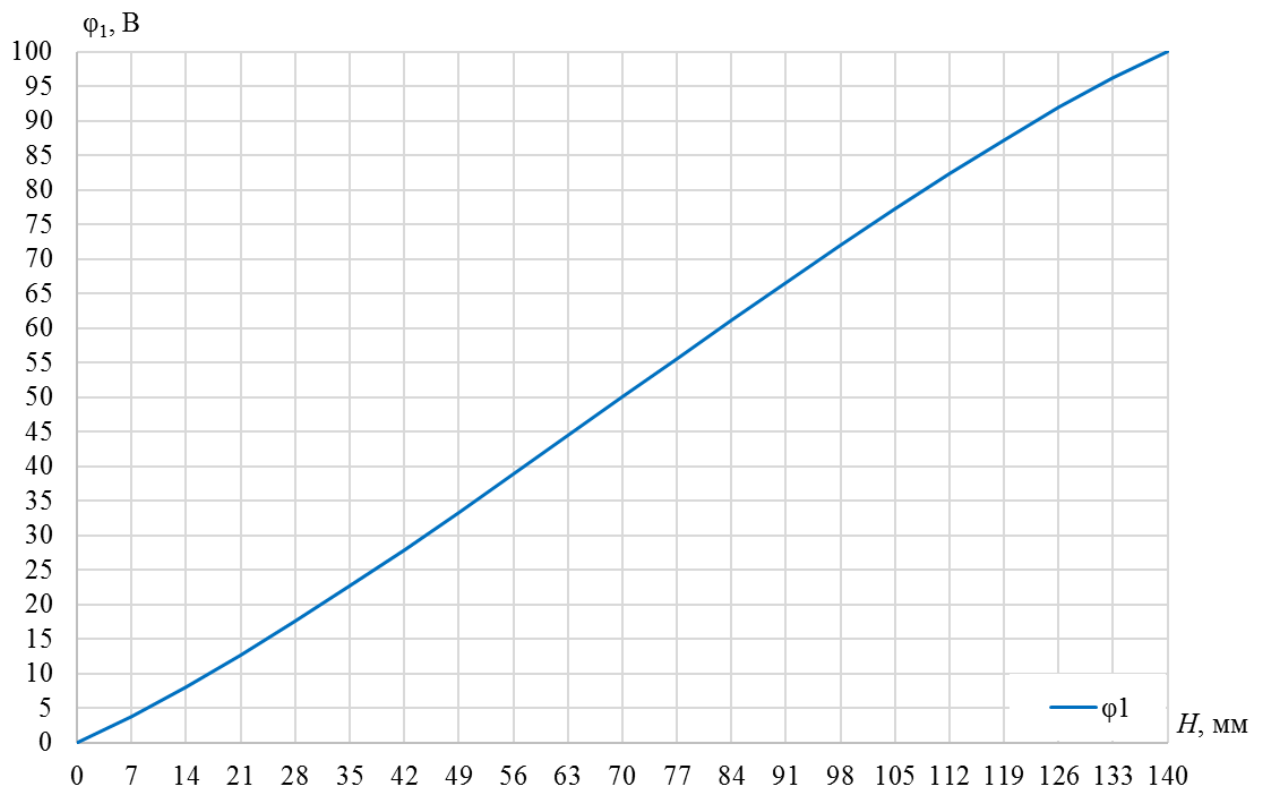


Рис. 2.8 Розподілення індукованого потенціалу φ_1 по висоті котушки H

В результаті проведення серії розрахунків при значеннях $\alpha_{\max}=0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32,0; 100,0$ були одержані дані, подібні за змістом тим, що містяться на рис. 2.6. Результати розрахунків наведені в табл. 2.2 та представлені на рис. 2.9.

Таблиця 2.2

Результати розрахунків функції $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ від $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}}$ для різних значень α_{\max}

№ п/п	$\alpha_{\max} \rightarrow$	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0	100,0
1	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,0$	0,8304	0,7838	0,7323	0,6643	0,5903	0,5358	0,5108	0,5029	0,5007	0,5001
2	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,1$	0,9100	0,8856	0,8593	0,8274	0,8036	0,8169	0,8751	0,9411	0,9802	0,9977
3	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,2$	0,9529	0,9402	0,9266	0,9110	0,9026	0,9193	0,9566	0,9846	0,9957	0,9995
4	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,3$	0,9799	0,9745	0,9687	0,9624	0,9599	0,9693	0,9856	0,9954	0,9988	0,9998
5	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,4$	0,9951	0,9938	0,9924	0,9908	0,9904	0,9929	0,9969	0,9991	0,9998	0,9999
6	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,5$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,6$	0,9951	0,9938	0,9924	0,9908	0,9904	0,9929	0,9969	0,9991	0,9998	0,9999
8	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,7$	0,9799	0,9745	0,9687	0,9624	0,9599	0,9693	0,9856	0,9954	0,9988	0,9998
9	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,8$	0,9529	0,9402	0,9266	0,9110	0,9026	0,9193	0,9566	0,9846	0,9957	0,9995
10	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,9$	0,9100	0,8856	0,8593	0,8274	0,8036	0,8169	0,8751	0,9411	0,9802	0,9977
11	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 1,0$	0,8304	0,7838	0,7323	0,6643	0,5903	0,5358	0,5108	0,5029	0,5007	0,5001

Графічні залежності функції $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ від $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}}$, згідно табл. 2.2, представлено на рис. 2.9.

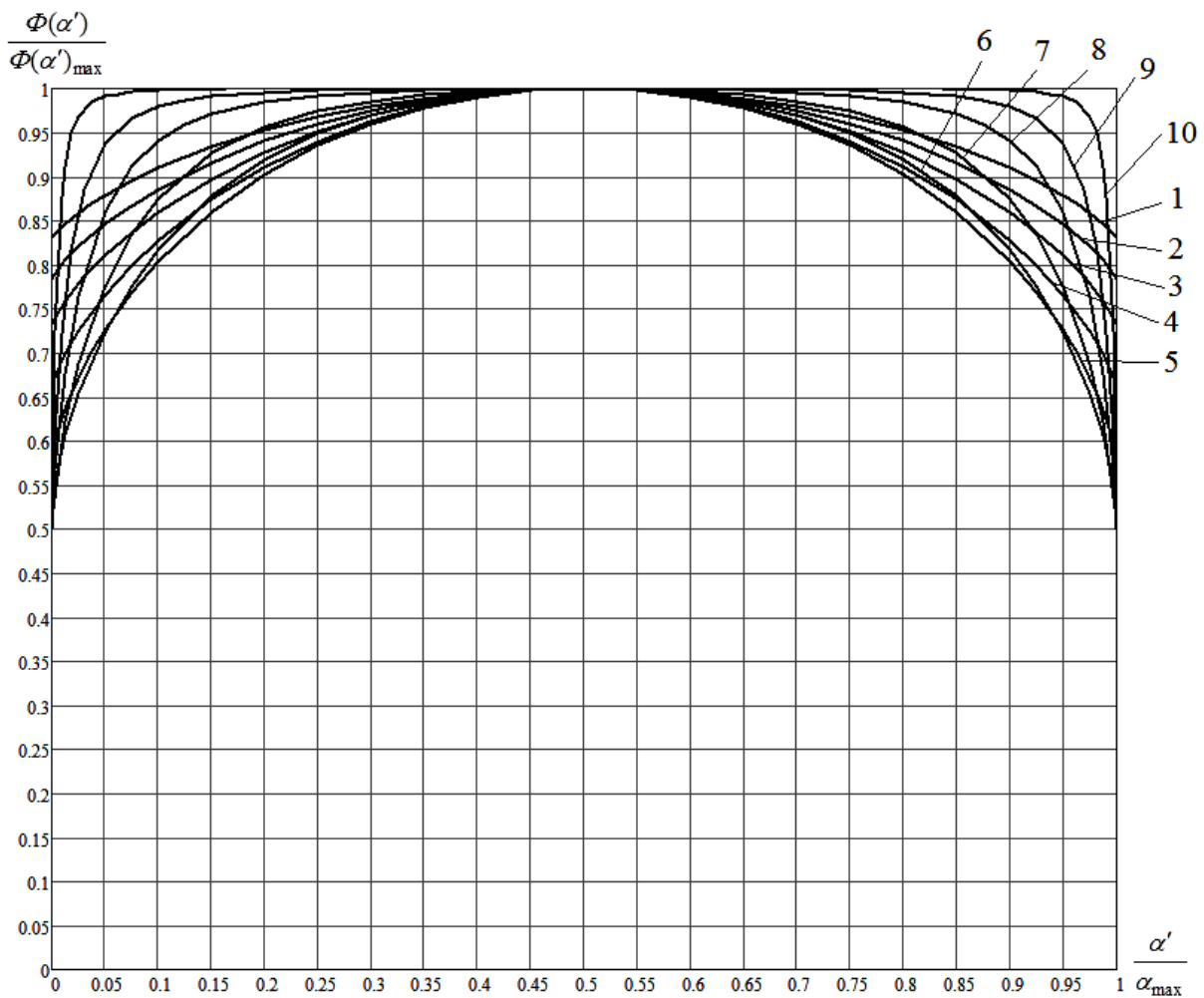


Рис. 2.9 Графік залежності функції $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ від $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}}$ при значеннях α_{\max} :

1 ($\alpha_{\max} = 0,1$); 2 ($\alpha_{\max} = 0,25$); 3 ($\alpha_{\max} = 0,5$); 4 ($\alpha_{\max} = 1$); 5 ($\alpha_{\max} = 2$);

6 ($\alpha_{\max} = 4$); 7 ($\alpha_{\max} = 8$); 8 ($\alpha_{\max} = 16$); 9 ($\alpha_{\max} = 32$); 10 ($\alpha_{\max} = 100$)

Як слідує із даних рис. 2.8 розподілення індукованого магнітним полем соленоїдальної котушки потенціалу по її довжині є суттєво нелінійним.

Граничні значення $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ для $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,0$ (або $1,0$) при збільшенні α_{\max}

від 0,1 до 100,0 монотонно зменшуються від 0,8304 до 0,5001.

Проте, значення $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,2$ (або 0,8) при збільшенні α_{\max} (від 0,1 до 2,0) спочатку зменшується від 0,9529 до 0,9026, а потім (зі зростанням α_{\max} від 4,0 до 100,0) збільшується від 0,9193 до 0,9995.

Таким чином, одержуємо складну залежність розподілення індукованого магнітним полем котушки потенціалу.

Для визначення розподілення електричного потенціалу в конструкції високочастотного загороджувача доцільно використовувати чисельні методи. Чисельна реалізація виконується в програмному пакеті Comsol Multiphysics [93] методом скінченних елементів в розрахунковій області, який обрано з метою одержання найбільш точних результатів розрахунку, оскільки математичний апарат даного програмного пакету дозволяє виконувати точні розрахунки та має більш гнучку систему настроювання та перевірене роками використання.

На початковій стадії розрахунку в діалоговому вікні Comsol Multiphysics створюється вісесиметрична модель високочастотного загороджувача, задаються граничні умови та властивості матеріалів конструкції.

Потім проводиться вирішення задачі методом скінченних елементів, а також обробка результатів з метою знаходження розподілення електричного потенціалу по висоті в міжелектродному проміжку конструкції.

Метод скінченних елементів полягає в розбитті розрахункової області на сукупні підобласті малих розмірів, кожна з яких називається скінченним елементом. Скінченні елементи утворюють сітку скінченних елементів (ССЕ), що повністю покриває розрахункову область. Найбільшого поширення в практиці отримали трикутні скінченні елементи. Чисельні методи дозволяють отримати розв'язок задачі, незважаючи на складність і нелінійність сформульованих рівнянь. Результатом чисельного розв'язання задачі є набір числових значень шуканих змінних, який називають результатом чисельного експерименту.

На рис. 2.10 представлений переріз конструкції ВЧЗ, конфігурація та габаритні розміри якої відповідають рішенню [65].

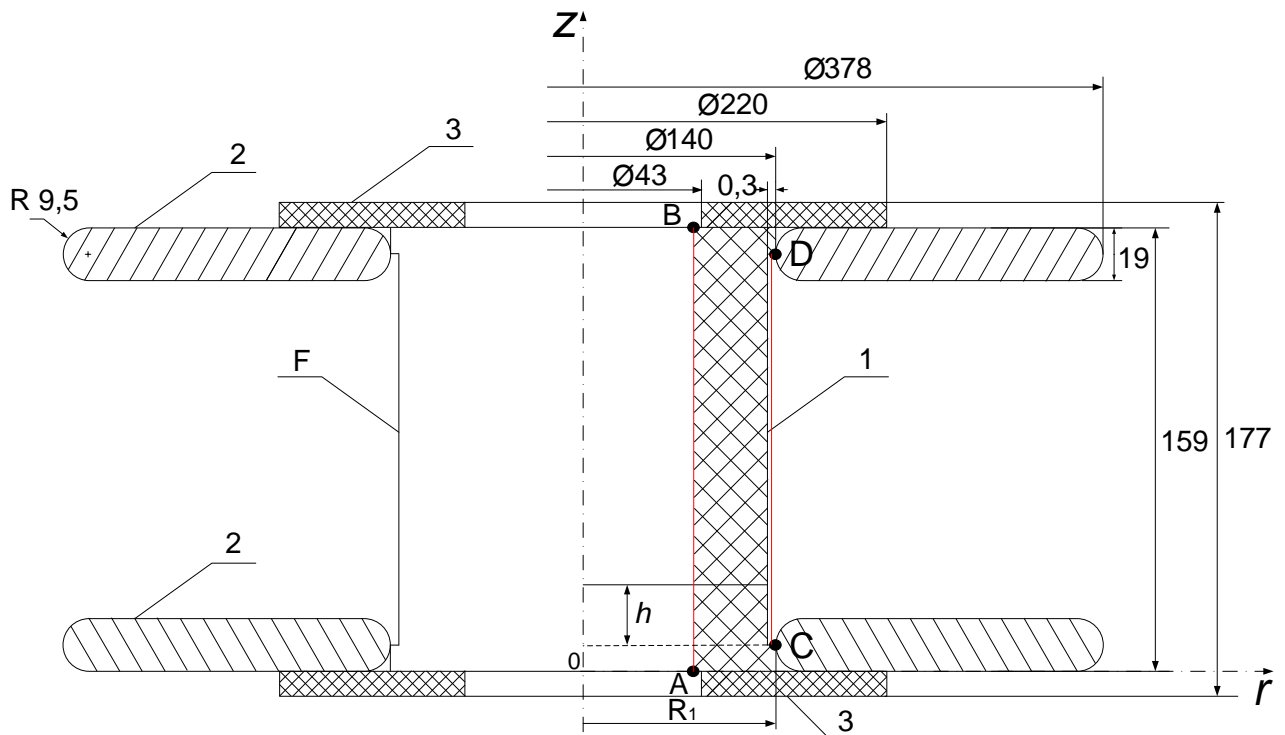


Рис. 2.10 Переріз конструкції ВЧЗ [65], де 1 – ізоляційний остов котушки; 2 – металеві кільцеві електроди; 3 – ізоляційні з'єднуючі кільця; F – канавка для намотки обмотки соленоїда

В якості матеріалу ізоляційного остову котушки та з'єднуючих кілець було обрано капролон, відносна діелектрична проникність ϵ_v якого становить 3,15 [94]. Матеріалом металевих кільцевих електродів є алюмінієвий сплав марки Д16. Між точками С, D зовнішньої циліндричної поверхні остову котушки виконана виточка канавки F глибиною 0,3 мм для намотки обмотки соленоїда.

На рис. 2.11 зображено вісесиметричну модель реальної конструкції високочастотного загороджувача в програмному пакеті Comsol Multiphysics із зазначенням основних його елементів. Розміри по горизонтальній та вертикальній вісях наведені в метрах.

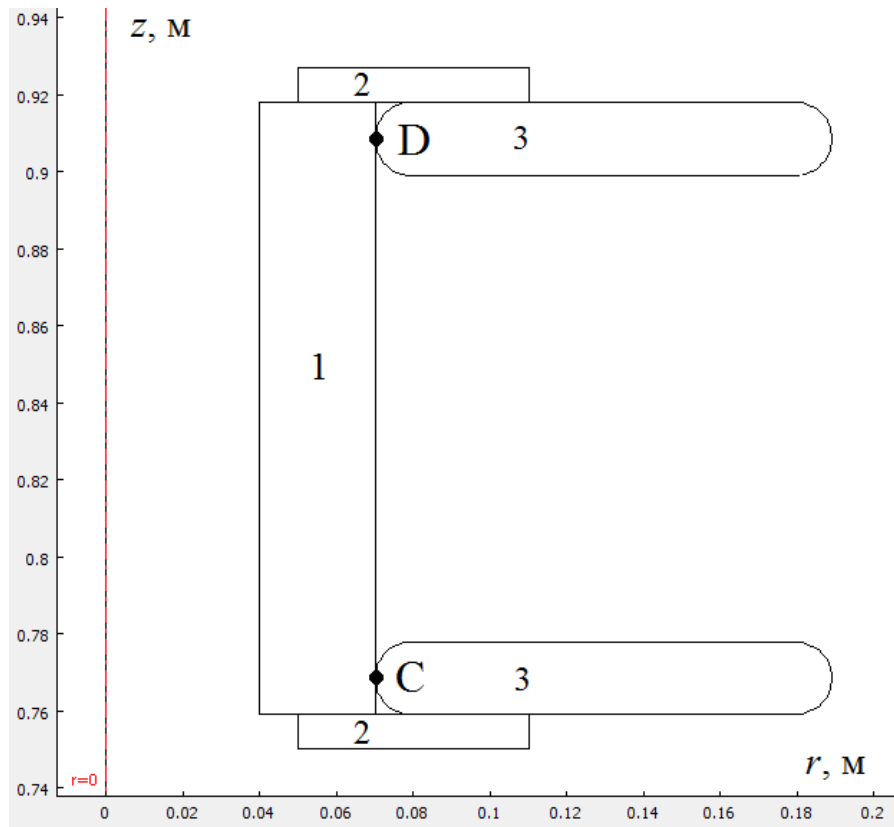


Рис. 2.11 Модель високочастотного загороджувача в програмному пакеті Comsol Multiphysics, де 1 – ізоляційний остов котушки; 2 – ізоляційні з’єднуючі кільця; 3 – металеві кільцеві електроди

Створення кінцево-елементної моделі високочастотного загороджувача в Comsol Multiphysics виконується в режимі AC/DC Module > Static, Electric > Electrostatics в наближенні постійного струму. Можливість застосування даного наближення витікає з рівняння Даламбера для електричного потенціалу [56]:

$$\nabla^2 U = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (2.24)$$

при цьому для характерних частот задачі $f \leq 10^7$ Гц права частина (2.24) $\ll 1$.

Задання фізичних параметрів кожної підобласті моделі відбувається в меню Physics > Subdomain Settings. Далі в меню Mesh > Free Parameters обираємо параметри сітки скінченних елементів та натискаємо кнопку Remesh (створити сітку). Після того буде побудована сітка, яка складається зі скінченних елементів трикутної форми. Побудована SSE містить 196672 граничних елементів, що покривають межі розрахункової області. Точність розв’язання задачі

забезпечується налаштуванням параметрів сітки скінченних елементів за допомогою спеціальних коефіцієнтів у кожній підобласті. Після побудови SSE відкриваємо меню Solve > Solve Problem та здійснюємо розв'язання даної задачі, час якої на ПК з параметрами: Intel® Core™ 2 Duo CPU T8100 + 2.10 GHz, 2.00 ГБ ОЗУ, Windows 8.1, AMD Radeon™ HD 3470 1Gb, 400 МГц в середньому складає ~ 13 с, час візуалізації менше секунди.

Для визначення розподілення електричного потенціалу по прямій CD використовуємо меню Postprocessing > Cross Section Plot Parameters, де задаємо координати прямої CD із зазначенням розрахункових точок. В результаті отримаємо значення електричного потенціалу у відповідних точках, які можливо представити графічно та експортувати в текстовий файл.

На рис. 2.12 зображена кінцево-елементна модель високочастотного загороджувача в осьовому перерізі, яка побудована в Comsol Multiphysics.

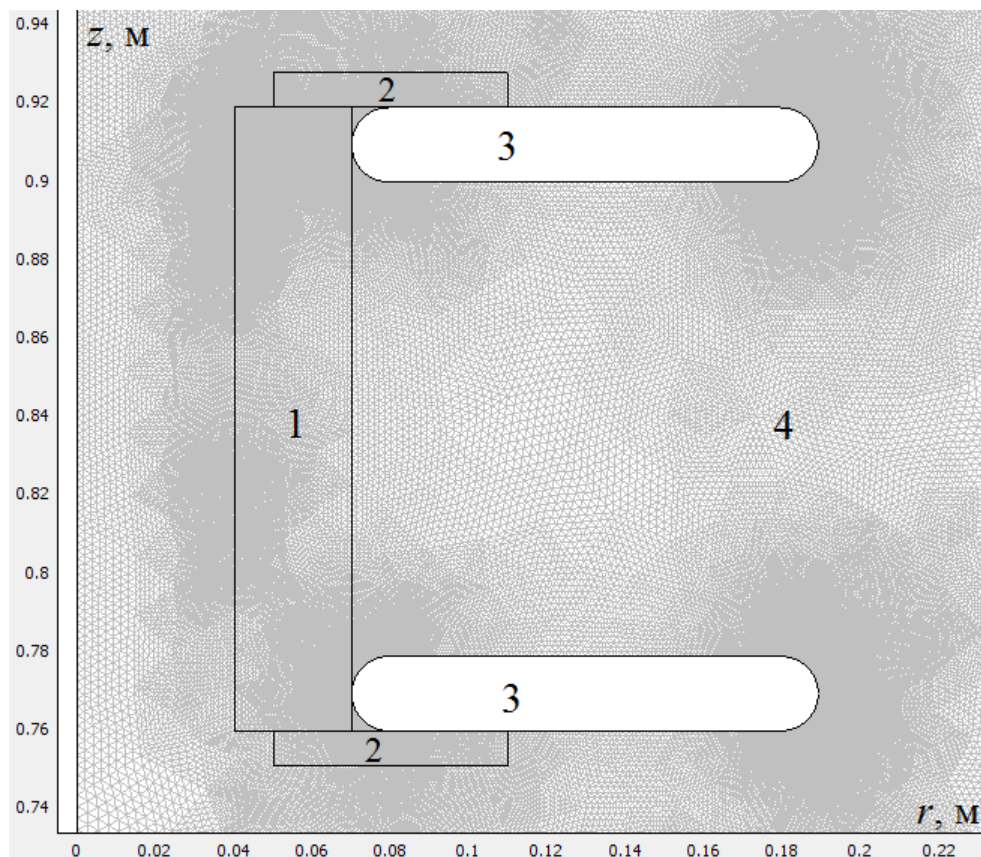


Рис. 2.12 Кінцево-елементна модель високочастотного загороджувача, де 1 – ізоляційний остов котушки; 2 – ізоляційні з'єднуючі кільця; 3 – металеві кільцеві електроди; 4 – повітря

Модель високочастотного загороджувача, що представлена на рис. 2.11, має наступні основні електричні дані:

- $U_{в.е.} = 100 \text{ В}$ – електричний потенціал верхнього електроду;
- $U_{н.е.} = 0 \text{ В}$ – електричний потенціал нижнього електроду.

На рис. 2.13 показано розподілення електричного потенціалу в ізоляційно-електродній конструкції високочастотного загороджувача з візуалізацією картини поля у вигляді ізоліній.

Фонове забарвлення рівнів розподілення електричного потенціалу відповідає приведеній на рисунку шкалі.

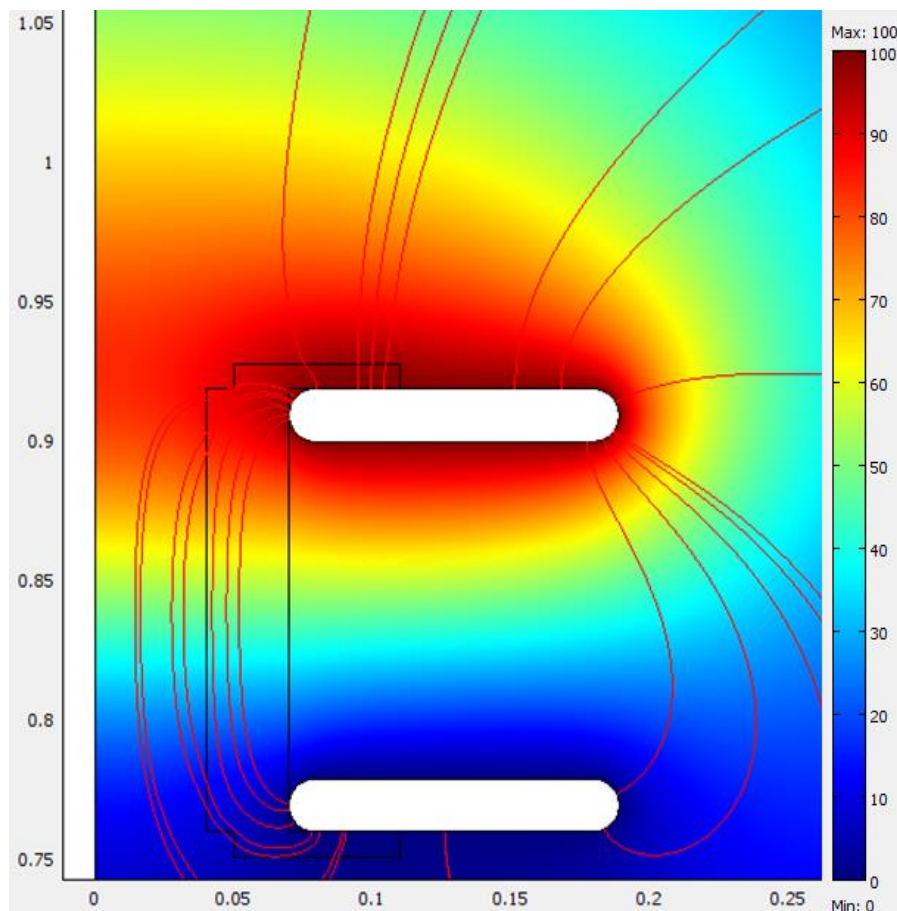


Рис. 2.13 Моделювання розподілення електричного потенціалу в ізоляційно-електродній конструкції високочастотного загороджувача

З рис. 2.13 видно, що максимальне розподілення електричного потенціалу проявляється біля верхнього електроду високочастотного загороджувача.

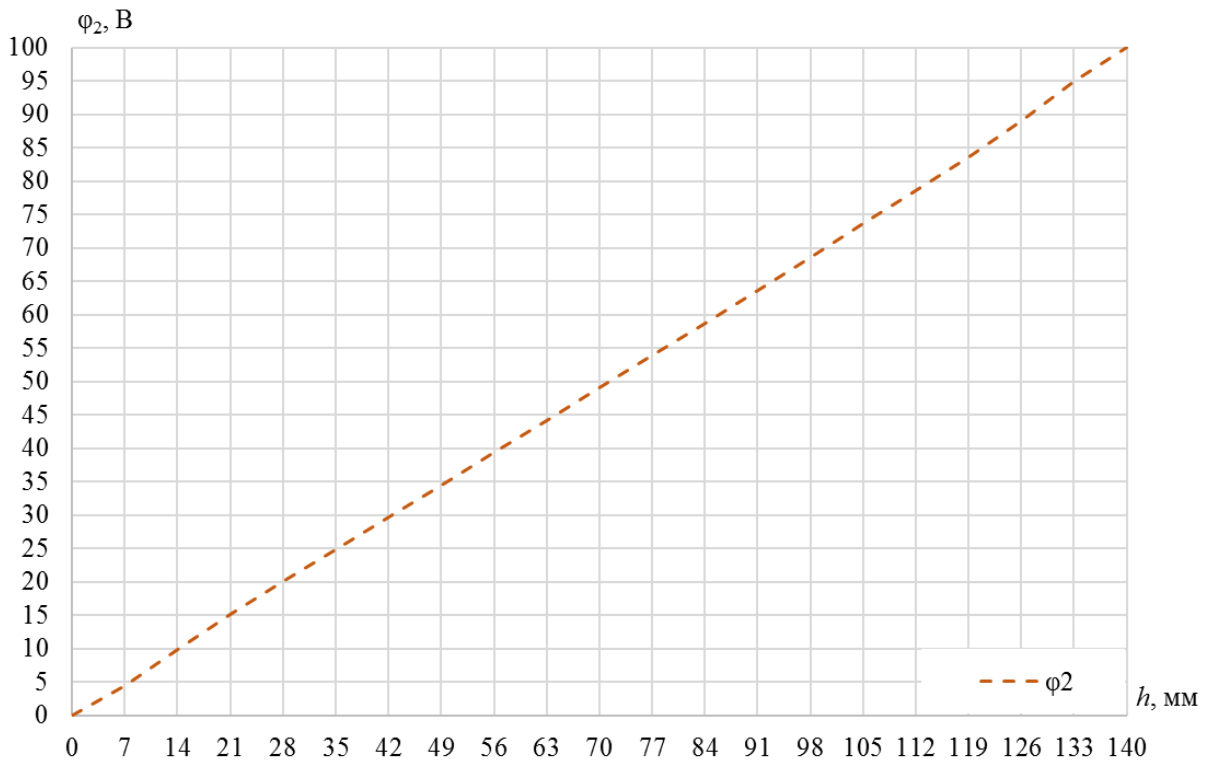
Розподілення електричного потенціалу φ_2 розраховується шляхом визначення числових значень потенціалу між електродами в 21 точках по прямій CD згідно рис. 2.10 (з відстанню між ними 7 мм) при $h = 0; 7; 14; 21 \dots 140$ мм за допомогою влаштованих в Comsol Multiphysics засобів постобробки та візуалізації результатів моделювання.

Значення електричного потенціалу в міжелектродному проміжку зведені до табл. 2.3 та представлені графічно на рис. 2.14.

Таблиця 2.3

Значення електричного потенціалу φ_2 в міжелектродному проміжку h

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
h , м	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
φ_2 , В	0	4,39	9,90	15,04	19,97	24,82	29,64	34,47	39,31	44,16	49,03
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
h , м	77	84	91	98	105	112	119	126	133	140	
φ_2 , В	53,92	58,82	63,73	68,65	73,60	78,60	83,73	89,14	95,05	100	

Рис. 2.14 Розподілення електричного потенціалу φ_2 в міжелектродному проміжку h

За даними рис. 2.14 можна сказати, що крива розподілення електричного потенціалу φ_2 в міжелектродному проміжку h має нелінійний характер.

На рис. 2.15 в якості порівняння представлено розрахункові залежності розподілення індукованого φ_1 та електричного φ_2 потенціалів в міжелектродному проміжку h (без формування ізоляційного остову котушки).

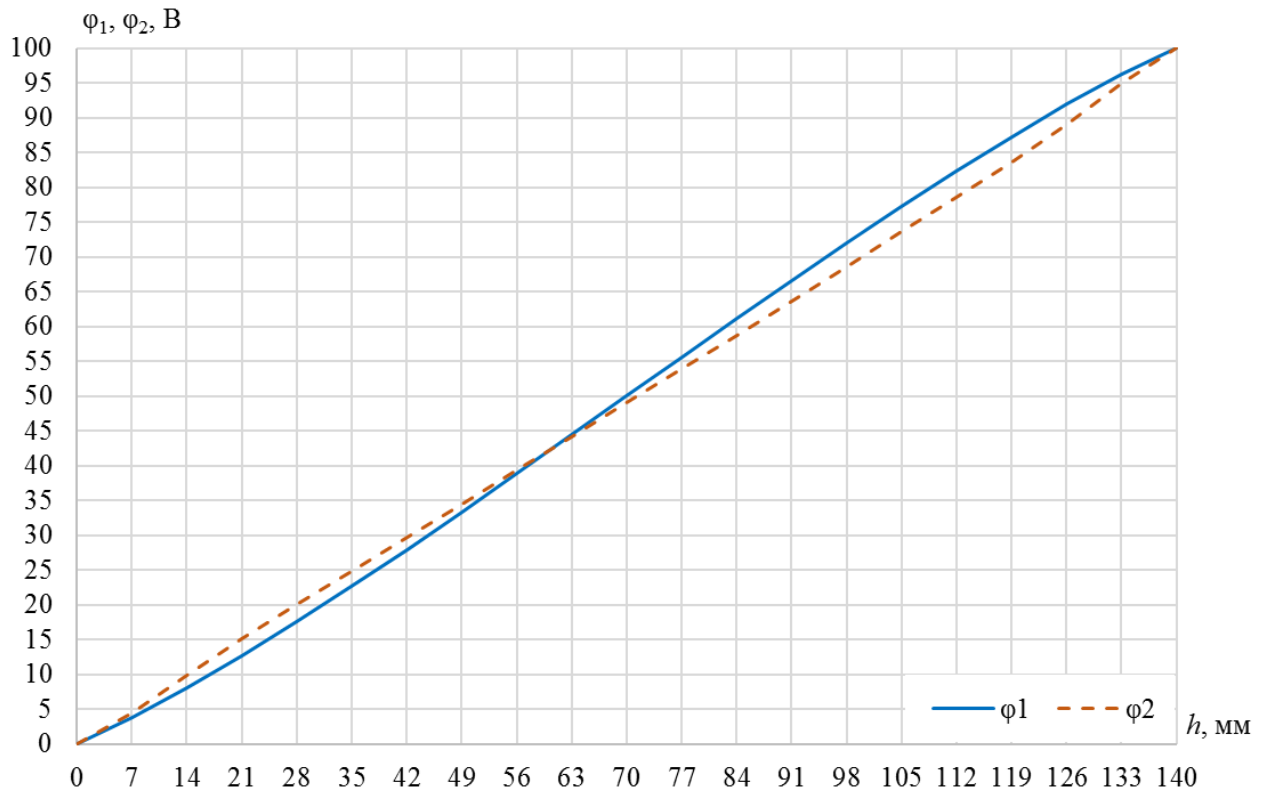


Рис. 2.15 Залежності розподілення індукованого φ_1 та електричного φ_2 потенціалів в міжелектродному проміжку h (без формування ізоляційного остову котушки)

Аналіз результатів за рис. 2.15 показав, що нерівномірність розподілення індукованого та електричного потенціалів в міжелектродному проміжку h досягає $\sim 4,5\%$. Тому для забезпечення максимального узгодження зазначених потенціалів було застосовано спосіб формування внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки, який описано в наступному підрозділі.

2.3 Оптимізація форми ізоляційного остову котушки

Розміщення установок для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад у випробувальних лабораторіях відбувається в умовах, коли не можна нехтувати впливом навколишнього обладнання на характеристики ВЧЗ. Порушення цього призводить до нестабільності характеристик при випробуванні високовольтних ізоляторів на допустимий рівень ЕМЗ. Обмеження дії цих обставин можливо лише на початкових стадіях розробки ВЧЗ з урахуванням відповідних елементів їх конструкції та виконання установок.

Пошук форми ізоляційного остову котушки проводимо на представленій на рис. 2.10 конструкції високочастотного загороджувача.

Мета проведення даних розрахунків полягала у визначенні форми ізоляційного остову, що забезпечує разом з металевими кільцевими електродами узгодження розподілення індукованого потенціалу з електричним [95].

Виходячи з технологічних умов виготовлення ізоляційного остову котушки ВЧЗ встановлено, що достатня кількість опорних розрахункових точок внутрішньої поверхні ізоляційного остову становитиме 11 (10 відрізків). Перша та остання точки внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки в системі $r0z$ з координатами ($r = 40$ мм, $z = 159$ мм; $r = 40$ мм, $z = 0$), які з'єднуються прямою АВ, є вузловими.

Таким чином, кількість незалежних факторів оптимізації склало 18, оскільки пошукова оптимізація відбувається для 9 проміжних точок з координатами r_i та z_i .

У зв'язку із значною кількістю незалежних факторів, пошук оптимальної форми остову в загальному виді є складним. Тому для даного пошуку доцільно використовувати відомі статистичні методи планування експериментів.

Для пошуку оптимуму було використано відомий послідовний симплекс метод (ПСМ) розв'язання задач пошукової оптимізації з використанням двох факторів для кожної i -точки: координат r_i та z_i шуканої точки поверхні [96–98].

Застосування ПСМ для визначення форми контуру внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки проводимо наступним чином.

Спочатку задавались початкові значення факторів оптимізації, щоб вершини з відповідними даними дослідів утворювали регулярний симплекс [99] в k -факторному просторі.

Координати вершин в цьому випадку описуємо матрицею виду [99]:

$$\begin{pmatrix} -x_1 & -x_2 & \dots & -x_i & \dots & -x_{k-1} & -x_k \\ x_1 & -x_2 & \dots & -x_i & \dots & -x_{k-1} & -x_k \\ 0 & 2x_2 & \dots & -x_i & \dots & -x_{k-1} & -x_k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & ix_i & \dots & -x_{k-1} & -x_k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & (k-1)x_{k-1} & -x_k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & kx_k \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

де k – кількість факторів, i – поточний номер фактору.

Матрицю реальних значень факторів A_{x_i} для проведення експерименту формуємо з виразу [99]:

$$A_{x_i} = x_{i,k+1} \cdot \Delta A_i + A_{0i}, \quad (2.26)$$

де ΔA_i – шаг зміни i -го фактору, A_{0i} – середнє значення i -го фактору.

Після проведення визначення значення цільової функції $K = \varphi_2 - \varphi_1$ для початкової матриці симплексу, яке ґрунтується на порівнянні залежностей розподілення індукваного потенціалу φ_1 та розподілення електричного потенціалу φ_2 при завданні форми внутрішньої поверхні остову точками з координатами, що відповідають рядкам матриці початкового симплексу, розрахованому за (2.26), виконується порівняння отриманих значень K .

Вершину симплекса, що відповідає максимальному одержаному значенню функції відгуку K (якщо воно перевищує 1,0 В), відкидаємо і будуємо новий симплекс, шляхом додавання однієї нової вершини до решти вершин [99].

Коефіцієнти $x_{i,k+1}$ для визначення координат нової вершини визначаємо за формулою:

$$x_{i,k+1} = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k x_i^* - x_i^*, \quad (2.27)$$

де $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i$ – середнє значення координат всіх вершин симплекса крім вершини з

максимальним значенням функції відгуку K , x_i^* – координати вершини з максимальним значенням функції відгуку K .

Розрахунок розподілення індукованого потенціалу φ_1 та розподілення електричного потенціалу φ_2 між двома металевими кільцевими електродами по прямій CD (рис. 2.10) проводиться за методикою, яка описана в підрозділі 2.2 даної роботи [90, 95].

В результаті проведення 15 серій оптимізаційних розрахунків було визначено максимальне (за абсолютною величиною) числове значення цільової функції $K = -0,9858$ В, яке було прийняте достатнім. Підсумкові результати розрахунків цільової функції K наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Результати розрахунків цільової функції

№ п/п	h , мм	φ_1 , В	φ_2 , В	$K = \varphi_2 - \varphi_1$, В
1	2	3	4	5
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	7,0	3,72307	3,39647	-0,3266
3	14,0	7,99940	8,21494	0,2155
4	21,0	12,6415	13,2312	0,5897
5	28,0	17,5601	18,3372	0,7771
6	35,0	22,6887	23,4982	0,8095
7	42,0	27,9771	28,7005	0,7234
8	49,0	33,3849	33,9385	0,5536
9	56,0	38,8778	39,2098	0,332
10	63,0	44,4255	44,5131	0,0876
11	70,0	50,0	49,8473	-0,1527
12	77,0	55,5744	55,2112	-0,3632
13	84,0	61,1221	60,6021	-0,5200
14	91,0	66,6150	66,0128	-0,6022
15	98,0	72,0228	71,4167	-0,6061

№ п/п	h , мм	φ_1 , В	φ_2 , В	$K = \varphi_2 - \varphi_1$, В
1	2	3	4	5
16	105,0	77,3112	76,7140	- 0,5972
17	112,0	82,4398	81,6970	- 0,7428
18	119,0	87,3584	86,3726	- 0,9858
19	126,0	92,0006	91,0277	- 0,9729
20	133,0	96,2779	95,9506	- 0,3273
21	140,0	100,0	100,0	0,0

В першій колонці табл. 2.4 вказані порядкові номери точок на прямій CD. У другій колонці таблиці вказана відстань h між шуканою точкою та точкою С. В третій, четвертій та п'ятій колонках наведені розрахункові значення індукованого потенціалу φ_1 , електричного потенціалу φ_2 , та їх різниці $K = \varphi_2 - \varphi_1$.

Координати точок внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки, які отримані в результаті оптимізаційних розрахунків, наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Координати точок внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки

№ точки	r_i , мм	z_i , мм
1	40,0	0,0
2	40,0	11,0
3	46,0	17,0
4	60,0	20,9
5	60,0	116,2
6	56,0	117,5
7	44,0	127,0
8	40,0	141,0
9	39,0	145,0
10	38,0	157,0
11	40,0	159,0

На рис. 2.16 наведена одержана форма внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки, яка забезпечує узгодження розподілення індукованого φ_1 та електричного φ_2 потенціалів котушки та характеризується максимальним (за абсолютною величиною) значенням функції відгуку $K = - 0,9858$ В (для $h = 119$ мм згідно табл. 2.4) [95].

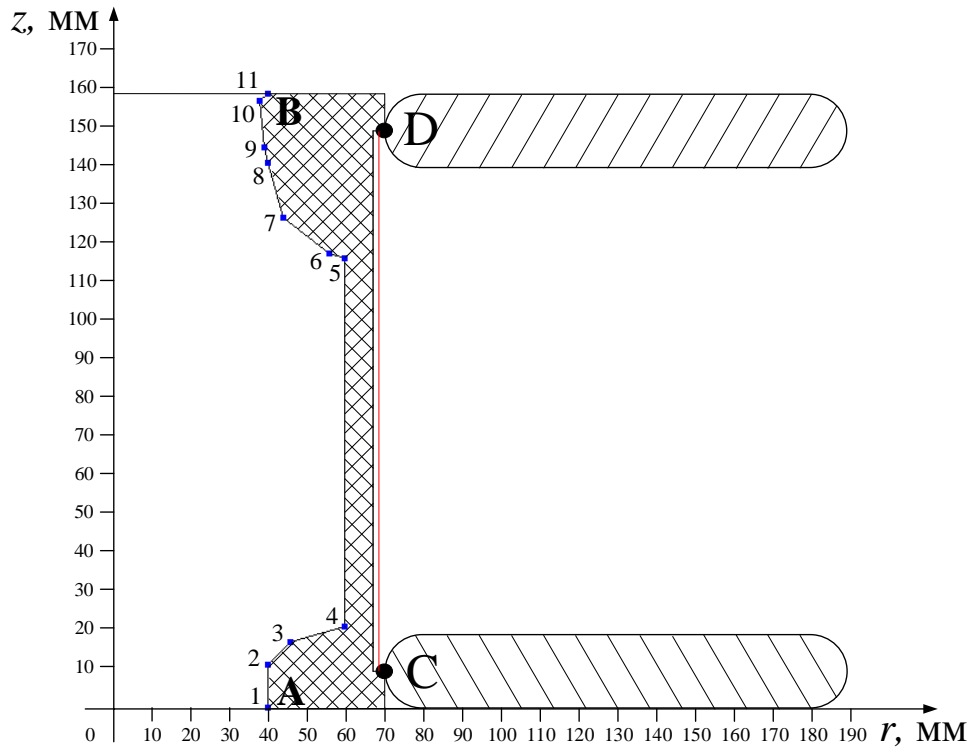


Рис. 2.16 Оптимізована форма внутрішньої поверхні ізоляційного остову котушки ВЧЗ

На рис. 2.17 представлено залежності розподілення індукованого ϕ_1 та електричного ϕ_2 потенціалів в розглянутому випадку, що характеризується значенням $K = -0,9858$ В.

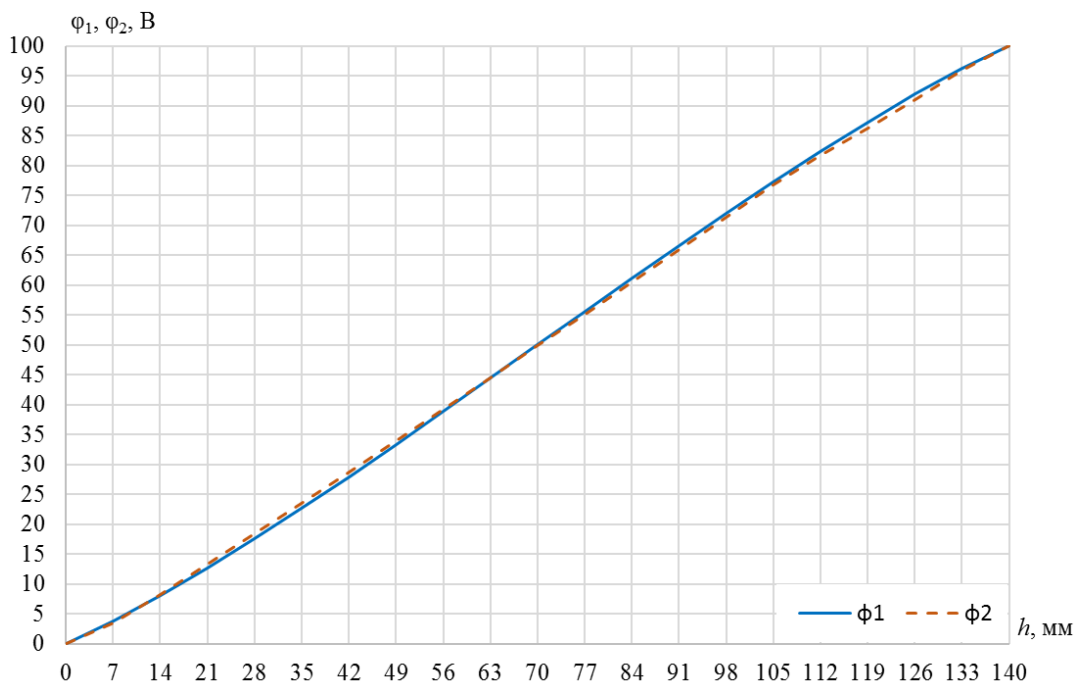


Рис. 2.17 Залежності розподілення індукованого ϕ_1 та електричного ϕ_2 потенціалів при оптимізації форми внутрішньої поверхні ізоляційного остову

Порівняння кривих за рис. 2.17 показує, що проведення оптимізації форми внутрішньої поверхні ізоляційного остову за допомогою послідовного симплекс методу дозволяє узгодити розподілення електричного та індукваного потенціалів до співпадіння $\leq 1\%$.

Проведені розрахунки дозволили оцінити ефективність регулювання поля зміною товщини діелектрика в різних перерізах остову котушки. При цьому виявляється, що найбільш сильно «регулюючий ефект» проявляється при зміні товщини остову в верхній частині котушки, яка характеризується підвищеною напруженістю поля.

Розроблене оптимізоване виконання котушки індуктивності малогабаритного високочастотного загороджувача характеризується стабільністю розподілення електромагнітного поля в його елементах та передбачає його використання в установці для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад. До того ж, заміна елементів настроювання, які звичайно реалізуються з використанням серійних конденсаторів, що характеризуються нестабільністю параметрів при частотах ~ 1 МГц, ємністю між двома металевими кільцевими електродами з розвиненою поверхнею утворює додатковий фактор забезпечення стабільності параметрів малогабаритного ВЧЗ установки для випробувань ізоляторів на допустимий рівень ЕМЗ. Крім того, фактично, унеможливується проникнення ззовні електромагнітних завад в котушку ВЧЗ, що додатково підвищує стабільність його параметрів.

Висновки до розділу 2

1. При роботі високоомних високочастотних загороджувачів в установках для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад на високих частотах відбувається непередбачувана взаємодія ємнісних та індуктивних складових струмів, що призводить до нестабільності результатів експериментального визначення рівня

електромагнітних завад об'єктів випробувань – в даному випадку, високовольтних ізоляторів.

2. Вперше запропоновано математичну модель компенсуючого реактора високочастотного загороджувача, в якій його індуктивні та ємнісні струми є узгодженими. Використання такого компенсуючого реактора дозволить реалізовувати режим високої стабільності параметрів його резонансного настроювання з прогнозованими розрахованими характеристиками, розширити його робочий частотний діапазон до ~ 5 МГц та суттєво збільшити прохідний опір до 20 кОм і вище.

3. Розвинуто метод регулювання електричного поля котушки індуктивності з використанням послідовного симплекс-методу шляхом формування внутрішньої поверхні її ізоляційного остову, новизна якого підтверджена патентом України № 115475 від 10.11.2017 р. «Високочастотний загороджувач».

4. Розроблене виконання високочастотного загороджувача з використанням методу регулювання електричного поля котушки індуктивності за допомогою формування внутрішньої поверхні її ізоляційного остову, дозволяє узгодити розподілення індукованого та електричного потенціалу в її об'ємі до $\leq 1\%$ та забезпечити необхідну завадостійкість високочастотного загороджувача.

РОЗДІЛ 3

ВИПРОБУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІЗОЛЯТОРІВ НА ДОПУСТИМИЙ РІВЕНЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

Для експериментального підтвердження отриманих в роботі теоретичних результатів та результатів математичного моделювання необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Розробити установку для експериментального дослідження рівня електромагнітних завад високовольтних ізоляторів в лабораторних умовах, в основу дії якої покладено розроблену математичну модель компенсуючого реактора високочастотного загороджувача.

2. Провести експериментальні дослідження для визначення рівня електромагнітних завад високовольтних тарілчастих ізоляторів.

3. На основі проведених експериментальних досліджень визначити фактори впливу конструкційного виконання ізоляторів на їх рівень ЕМЗ.

Вирішенню цих питань присвячений третій розділ дисертації.

3.1 Опис установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад

У 2016 році на прохання Товариства з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» (ТЗОВ «ЛІК») було укладено з Науковим парком «Київська політехніка» договір № ВЛ-02-15 від 01.04.2015 р. за темою: «Розробка, виготовлення та поставка експериментального зразка установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад». Метою даної роботи була розробка та виготовлення установки для випробувань підвісних тарілчастих ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад в лабораторних умовах.

За вимогою Замовника, розроблена та виготовлена установка повинна забезпечувати проведення випробувань сухих та чистих ізоляторів за рівнем допустимих електромагнітних завад (відносно 1 мкВ на номінальному

активному опорі 300 Ом), в робочому діапазоні випробувальної напруги від 10 кВ до 40 кВ.

Схема розробленої установки наведена на рис. 3.1, де

РН – регулятор напруги;

ТР – високовольтний трансформатор;

НВО, ВВО, ВО – низьковольтна, високовольтна та вимірювальна обмотки ТР;

F – високовольтний запобіжник;

rV – вольтметр вимірювальної обмотки;

L_B – котушка ВЧЗ;

E_1, E_2 – металеві кільцеві електроди ВЧЗ;

S – монтажний стрижень;

I – ізолятор, що випробовується;

C – високовольтний конденсатор зв'язку;

FV – низьковольтний розрядник;

XT1 – з'єднувальний провід;

P_1 – вхідний роз'єм низьковольтного блока установки;

E – внутрішній екран низьковольтного блока установки;

L_1 – компенсуюча котушка;

L_2 – котушка подільника напруги;

SA1-SA5 – перемикачі;

R_1, R_2 – подільник напруги;

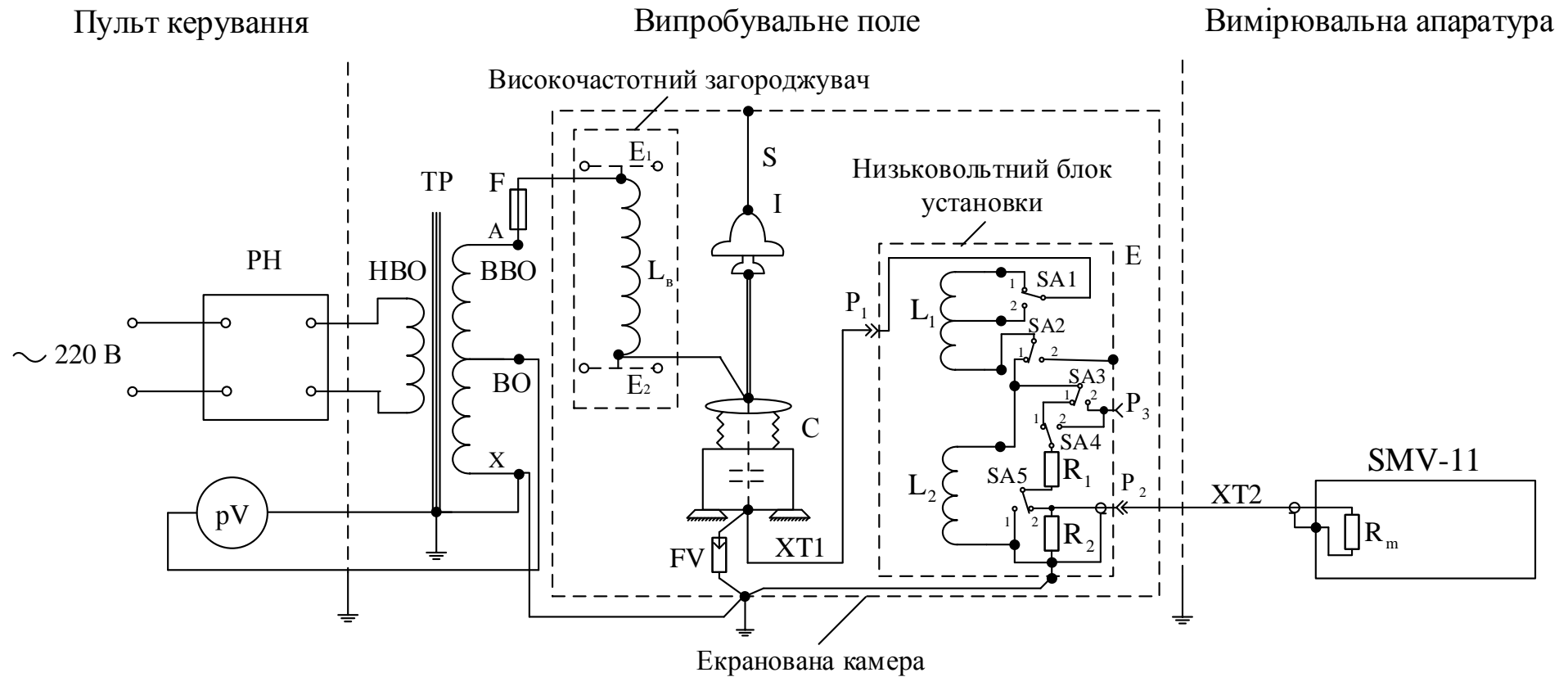
P_2 – вихідний роз'єм низьковольтного блока установки;

P_3 – допоміжний роз'єм;

XT2 – з'єднувальний коаксіальний кабель;

SMV-11 – селективний мікрровольтметр (9 кГц – 30 МГц), який відповідає вимогам встановленим у Публікації CISPR 16-1-1 [100];

R_m – вхідний опір SMV-11.



За проханням Замовника було поєднано в одному пристрої можливість проведення випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень ЕМЗ при режимах частот як 0,5 МГц, так і 1,0 МГц [101].

Для живлення установки було обрано високовольтний трансформатор типу РЕОІ 100/200 А з низьковольтною, високовольтною та вимірювальною обмотками, коефіцієнт трансформації за напругою яких становить $0,4 \text{ кВ}/1 \text{ В} = 400$. Форма вихідної напруги даного високовольтного трансформатора задовольняє вимогам Публікації ІЕС 60060-2 [102]. Струмопровід, який під'єднаний до високовольтної обмотки трансформатора, проходить крізь отвір екранованої камери установки та приєднується до електроду E_1 ВЧЗ.

ВЧЗ установки складається з котушки, індуктивність якої розраховується з умови резонансу:

$$\omega L_b = \frac{1}{\omega C_E}, \quad (3.1)$$

де $\omega = 2\pi f$, f – розрахункова частота, яка дорівнює 0,5 МГц та 1,0 МГц. Стабільність ємності ВЧЗ забезпечується використанням металевих кільцевих електродів E_1 , E_2 , а її значення вираховується за допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics [93] і становить $C_E = 11,17 \text{ пФ}$. В якості ізоляції конденсатора E_1 , E_2 використовується повітря, що забезпечує частотну стабільність параметрів конденсатора та відсутність в ньому нелінійних явищ (за умови недопущення корони).

Для режиму установки 0,5 МГц розрахункова індуктивність котушки ВЧЗ складає $L_b = 9,07 \text{ мГн}$, а для режиму установки 1,0 МГц – $L_b = 2,26 \text{ мГн}$. Зовнішній вигляд високочастотного загороджувача установки представлений на фото рис. 3.2.

Елементи кріплення ВЧЗ за рис. 3.2 з метою зниження спотворення поля виконано з ізоляційного матеріалу (капролон).

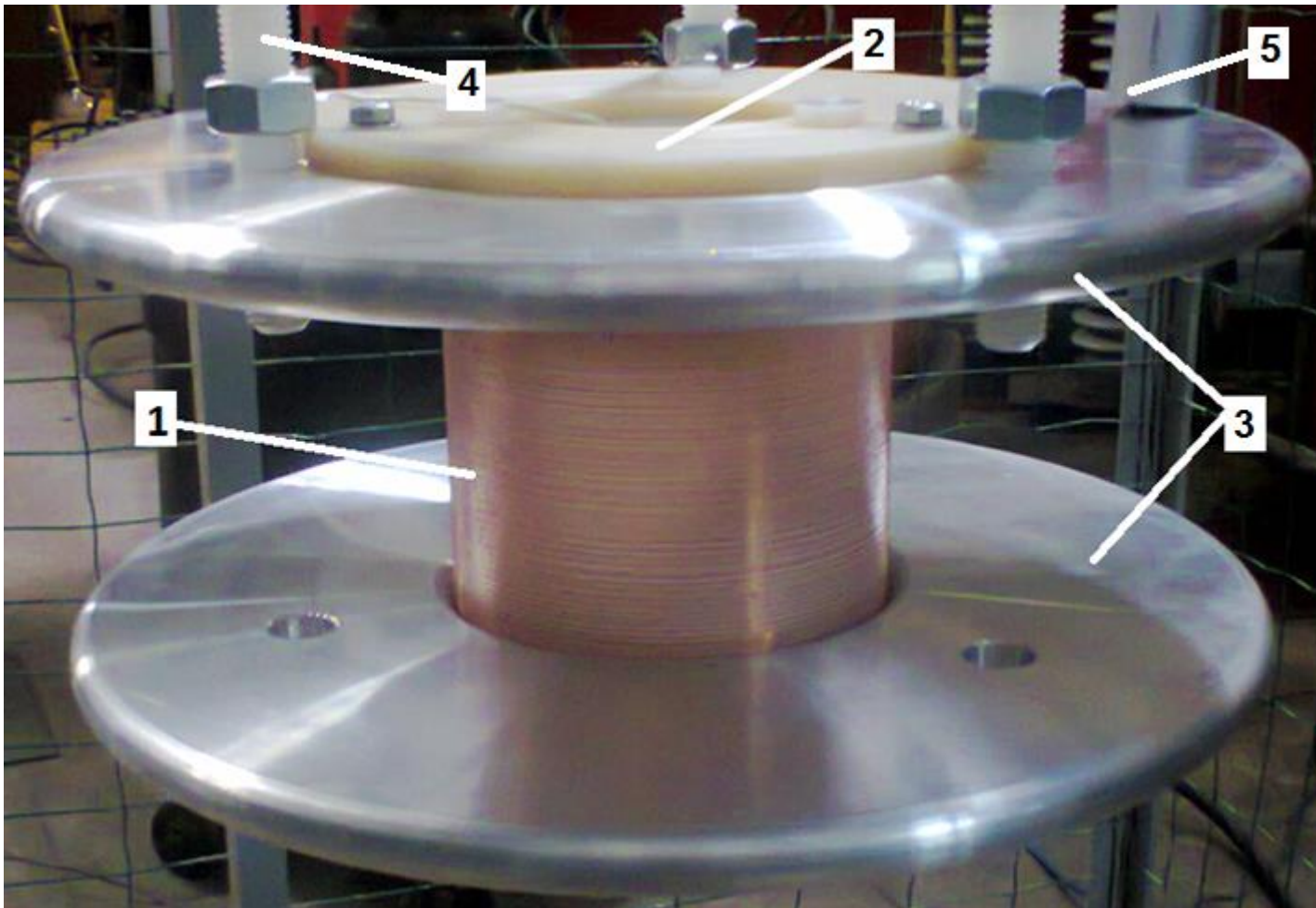


Рис. 3.2 Зовнішній вигляд високочастотного загороджувача установки (фото),
де 1 – котушка ВЧЗ; 2 – ізоляційні з'єднуючі кільця; 3 – металеві кільцеві електроди;
4 – елементи кріплення; 5 – струмопровід

До виходу котушки ВЧЗ (електроду E_2) приєднано високовольтний струмопровід, яким забезпечується подання напруги на вхід високовольтного конденсатора зв'язку, а з нього на об'єкт випробування – ізолятор.

Високовольтний конденсатор зв'язку С виконаний у вигляді конструкції з високовольтною ізоляцією між електродами, що забезпечується відповідним шаром трансформаторного масла Т-1500 [103]. Загальна ємність конденсатора зв'язку С дорівнює сумі послідовно з'єднаних 8-и малоіндуктивних конденсаторів типу КВИ-3-3300 пФ (10 кВ). Максимальна робоча напруга конденсатора зв'язку дорівнює 45 кВ.

З'єднання виходу високовольтного конденсатора зв'язку С з вхідним роз'ємом P_1 низьковольтного блоку установки здійснюється за допомогою з'єднувального проводу ХТ1.

Низьковольтний блок установки, який вмонтовано в захисний екран Е, містить:

1. Компенсуючу котушку L_1 з відводами для вибору випробувальних частот (0,5 МГц та 1,0 МГц), що забезпечується за допомогою перемикача SA1. Індуктивність компенсуючої котушки L_1 обирається за умови послідовного резонансу для зазначених частот та ємності високовольтного конденсатора зв'язку С.

2. Котушку L_2 , яка під'єднана паралельно входу подільника напруги R_1/R_2 , з номінальним значенням індуктивності $>1,3$ мГн.

3. Подільник напруги R_1/R_2 , фактичне значення опорів якого становить 271/50 Ом, а з урахуванням вхідного опору SMV-11 (50 Ом) – складає 271/25 Ом.

4. Вимикачі SA2 – SA5 використовуються при проведенні калібрування установки та вимірюванні параметрів елементів низьковольтного блоку установки.

Опір між високовольтним приєднанням випробуваного ізолятора та землею на частотах вимірювання 0,5 МГц та 1,0 МГц за вимогами CISPR 18-2 [37] повинен знаходитися в діапазоні 300 ± 40 Ом з фазовим кутом, який не перевищує 20° .

Визначення напруги електромагнітних завад (в децибелах по відношенню до $1 \text{ мкВ} - V_m$) здійснюється за допомогою селективного мікрвольтметра SMV-11 [49], який приєднано до вихідного роз'єму низьковольтного блока установки P_2 за допомогою з'єднувального коаксіального кабелю ХТ2 з хвильовим опором 50 Ом (довжиною 10 м).

Для зниження рівня зовнішніх ЕМЗ (фону установки), що забезпечує стабільність експериментального визначення рівня ЕМЗ, створюваних випробуваним об'єктом, в установці передбачено екрановану камеру, габаритні розміри якої становлять $5,9 \times 2,3 \times 3,0$ м. По всім сторонам камери укладена зварна сітка з розміром комірки 25×25 мм та діаметром дроту 1,4 мм. Заповнення зварною сіткою поверхні камери становить 98 %. Такий спосіб виконання екранованої камери дозволяє зменшити будь-які завади, що впливають на схему випробувань ззовні, включно з завадами високовольтної частини або завадами від інших елементів кола, до рівня нижче 10 дБ від встановленого нормованого значення для випробуваного об'єкта [37].

Основними параметрами установки є коефіцієнт передачі схеми K подільника напруги та загасання кола A , які визначаються при проведенні калібрування установки у вигляді суми $K+A$. При розробці установки однією з задач було зменшення значення суми параметрів $K+A$. Це досягалось за допомогою проведення процедури підбору відпайок витків компенсуючої котушки L_1 низьковольтного блоку під час попереднього настроювання установки, яке виконувалось без зміни інших елементів даного блоку.

Зовнішній вигляд розробленої установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад представлений на рис. 3.3.



Рис. 3.3 Зовнішній вигляд установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад (фото), де 1 – досліджуваний високовольтний ізолятор; 2 – високочастотний загороджувач; 3 – конденсатор зв’язку; 4 – низьковольтний блок установки; 5 – екранована камера; 6 – високовольтний струмопровід

При створенні установки було використано ряд нових рішень, сутність яких полягає в наступному:

1. Елементи високочастотного загороджувача установки розроблено та виготовлено як малогабаритні самостійні спеціалізовані об’єкти (без використання «готових» великогабаритних L, C-елементів від інших типових схем).

2. Частотну стабільність конденсатора $E_1; E_2$ забезпечено використанням спеціально профільованих з розвинутою поверхнею металевих електродів (рис. 3.3), з ізоляцією між ними, безпосередньо, повітря, що гарантує при вибраній геометрії електродів відсутність корони.

3. Котушка високочастотного загороджувача L_B має окреме виконання для частоти 0,5 МГц та 1,0 МГц і виготовлена у вигляді змінної конструкції (між електродами $E_1; E_2$).

4. Вимірювання параметрів K та A установки виконується не окремо, а відразу у вигляді суми, при цьому методика вимірювання суми параметрів $K+A$ забезпечує стабільність отримуваних результатів.

Розроблену установку [101], яка призначена для випробувань тарілчастих високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад в лабораторних умовах при режимах частот 0,5 МГц та 1,0 МГц, калібровано Державним підприємством «Укрметртестстандарт» (свідоцтво про калібрування № UA/29/291113/000951 від 30.09.2019 р., Додаток Е дисертації) з рівнем зовнішніх ЕМЗ (фону установки), наведеним в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Досягнутий рівень зовнішніх електромагнітних завад (фону установки)

№ п/п	Випробувальна напруга, кВ	Рівень зовнішніх ЕМЗ (фону установки), дБ		Нормований допустимий рівень зовнішніх ЕМЗ (фону установки), дБ
		при частоті 0,5 МГц	при частоті 1,0 МГц	
1	10	20,0	23,8	24
2	15	20,0	23,8	45
3	20	20,0	23,8	45
4	25	20,2	23,8	45
5	30	20,2	23,8	76
6	35	21,4	23,8	76
7	40	23,8	23,8	76

Як слідує із даних табл. 3.1 рівень зовнішніх електромагнітних завад (фону установки), який становить не більше 23,8 дБ (при частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц),

менший по відношенню до нормованого значення фону установки на 52,2 дБ при випробувальній напрузі 40 кВ.

Досягнуті значення параметрів установки $K+A=24$ дБ (при частоті 0,5 МГц) та $K+A=22,5$ дБ (при частоті 1,0 МГц).

В порівнянні з установками [47, 51] розроблена установка дозволяє проводити випробування зразків високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів з рівнем електромагнітних завад від 26 дБ на частоті 0,5 МГц та від 30 дБ на частоті 1,0 МГц в діапазоні випробувальних напруг 10...40 кВ.

З урахуванням вище зазначеного, навіть при появі в майбутньому значно більш жорстких вимог країн-замовників до допустимого рівня ЕМЗ високовольтних ізоляторів, нова установка дозволяє проводити їх випробування та реєструвати підвищення їх характеристик на перспективу (вище за існуючий рівень міжнародних стандартів) на 4 – 56 дБ в діапазоні випробувальних напруг 10 – 40 кВ.

Розроблена установка може бути рекомендована для випробувальних лабораторій на рівень ЕМЗ в системах контролю ізоляції іншого електроустаткування енергопідприємств, електростанцій і підстанцій; в вимірювальних системах високої напруги технологічних підприємств та дослідницьких центрів.

3.2 Дослідження впливу конструктивного виконання ізолятора на рівень електромагнітних завад

Одним із способів спроби зниження рівня електромагнітних завад високовольтних тарілчастих ізоляторів було виконання їх за пропозицією ТзОВ «Львівська ізоляторна компанія» з додатковими конструктивними змінами в зовнішній ізоляції (глибини армування і нанесення напівпровідного полімерного покриття) в області стрижня.

Попередньо було визначено питомий об'ємний опір полімерного покриття за допомогою мегометра Ф4102 та вимірювача опору ЦС4107 в стандартній

комірці з електродами. Результати вимірювання питомого об'ємного опору полімерного покриття приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Питомий об'ємний опір полімерного покриття

№ п/п	Стан полімерного покриття			
1	Рідкий		Полімеризований зразок з товщиною $d = 2,5$ мм	
2	Мегометр типу Ф4102	Вимірювач опору типу ЦС4107	Мегометр типу Ф4102	Вимірювач опору типу ЦС4107
3	1×10^4 (Ом \times м)	$1,3 \times 10^3$ (Ом \times м)	5×10^3 (Ом \times м)	960 (Ом \times м)

Як видно з табл. 3.2 полімерне покриття має характеристики напівпровідного матеріалу.

Для проведення даного дослідження було виготовлено 15 серій ізоляторів типу ПСВ 120Б, з них:

- 5 серій з глибиною армування $h = 11$ мм, нумерація серії ізоляторів 1 – 5;
- 5 серій з глибиною армування $h = 4$ мм, нумерація серії ізоляторів 6 – 10;
- 5 серій з глибиною армування $h = 8$ мм, нумерація серії ізоляторів 11 – 15.

Товщина напівпровідного полімерного покриття мала значення 0,3 мм.

Фактична глибина армування, яка вимірювалася від краю гільзи до дзеркала ЦПЗ, вказана в табл. Б.1 – Б.3 на кожен номер ізолятора.

Експериментальне визначення електромагнітних завод для ізоляторів проводилися в наступній послідовності (при 4-х модифікаціях виконання ізоляторів): I – без покриття ЦПЗ; II – полімерне покриття нанесене лише на дзеркало ЦПЗ; III – полімерне покриття нанесене на дзеркало ЦПЗ і стінки гільзи складеталі; IV – полімерне покриття нанесене на дзеркало ЦПЗ та гільзу складеталі в цілому.

При проведенні досліджень використано атестовану ДП «Укрметртестстандарт» установку для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завод, яка була розміщена у

високовольтній лабораторії ТЗОВ «Львівська ізоляторна компанія» (розділ 3.1) [101].

Базисна частота визначення рівня електромагнітних завад високовольтних ізоляторів – 1,0 МГц. Параметри установки $K + A = 22,5$ дБ.

Випробування проводились в умовах лабораторії при $t = 14 - 16$ °С та відносній вологості повітря до 70 %.

Результати визначення рівня ЕМЗ ізоляторів типу ПСВ 120Б в залежності від глибини армування стрижня h за різних модифікацій виконання полімерного покриття представлені в табл. Б.1 – Б.3 та на рис. 3.4 – 3.6 [104].

Аналіз результатів проводимо окремо для діапазону робочих напруг (10 – 15 кВ) та для діапазону випробувальних напруг ізоляторів (20 – 33 кВ).

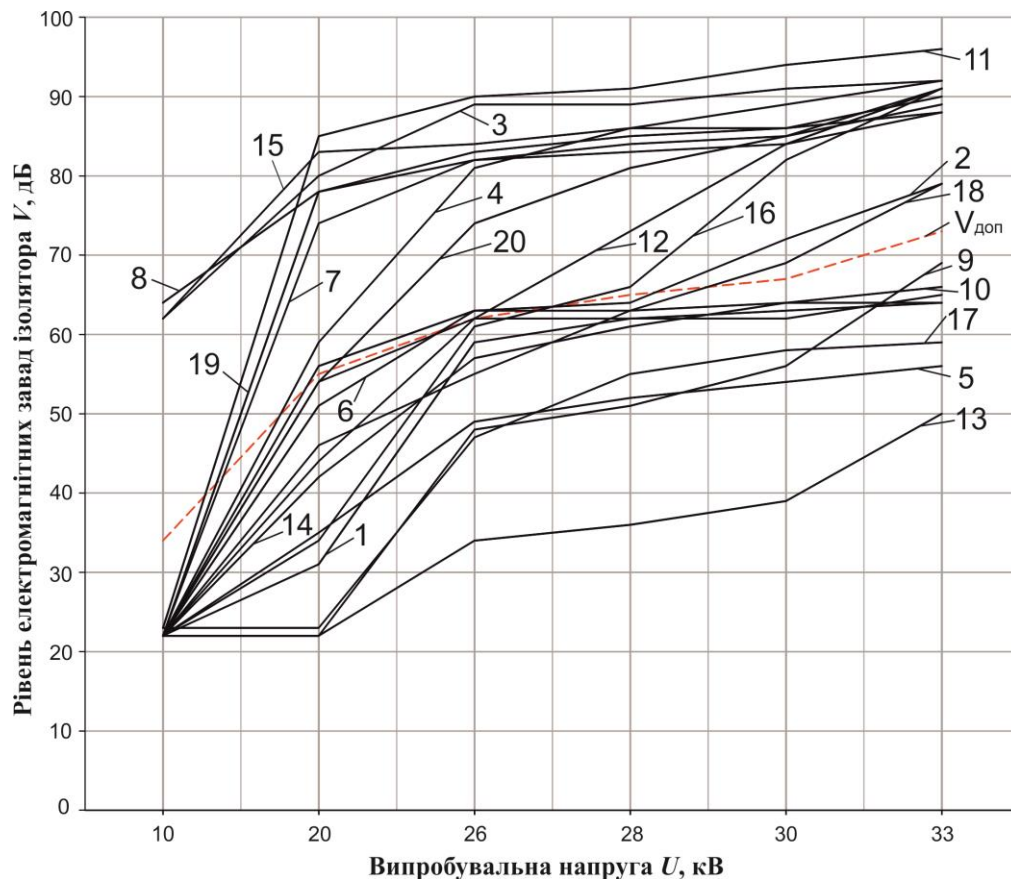


Рис. 3.4 Залежність рівня електромагнітних завад ізоляторів V (дБ) від випробувальної напруги U (кВ) при різних значеннях глибини армування стрижня та модифікаціях виконання полімерного покриття, де 1...20 – наскрізна нумерація ізоляторів згідно табл. Б.1; $V_{\text{доп}}$ – допустимий рівень електромагнітних завад

Як слідує з рис. 3.4, мінімальний рівень ЕМЗ (~ 23 дБ) в діапазоні робочих напруг мають ізолятори з номерами 9, 13, 17. На 25 % підвищений рівень ЕМЗ (по відношенню до попередньо названих ізоляторів) мають ізолятори з номерами 1, 5, 16. Ще на 23 % більший рівень ЕМЗ мають ізолятори з номерами 12, 14, 18. Врешті, максимально допустимий рівень ЕМЗ в діапазоні 37 – 41 дБ мають ізолятори з номерами 2, 4, 6, 10, 20. Інші ізолятори з 1 – 5 серій (з номерами 3, 7, 8, 11, 15, 19) перевищують допустимий рівень ЕМЗ для області робочих напруг ізоляторів. Рівень електромагнітних завад ізоляторів з номерами 1, 5, 9, 13, 17 (без покриття ЦПЗ) та з номерами 6, 10, 14 (полімерне покриття нанесене лише на дзеркало ЦПЗ) не перевищує допустимий рівень $V_{\text{доп}}$. Таким чином, за результатами випробувань відбракуванню підлягають 60 % ізоляторів.

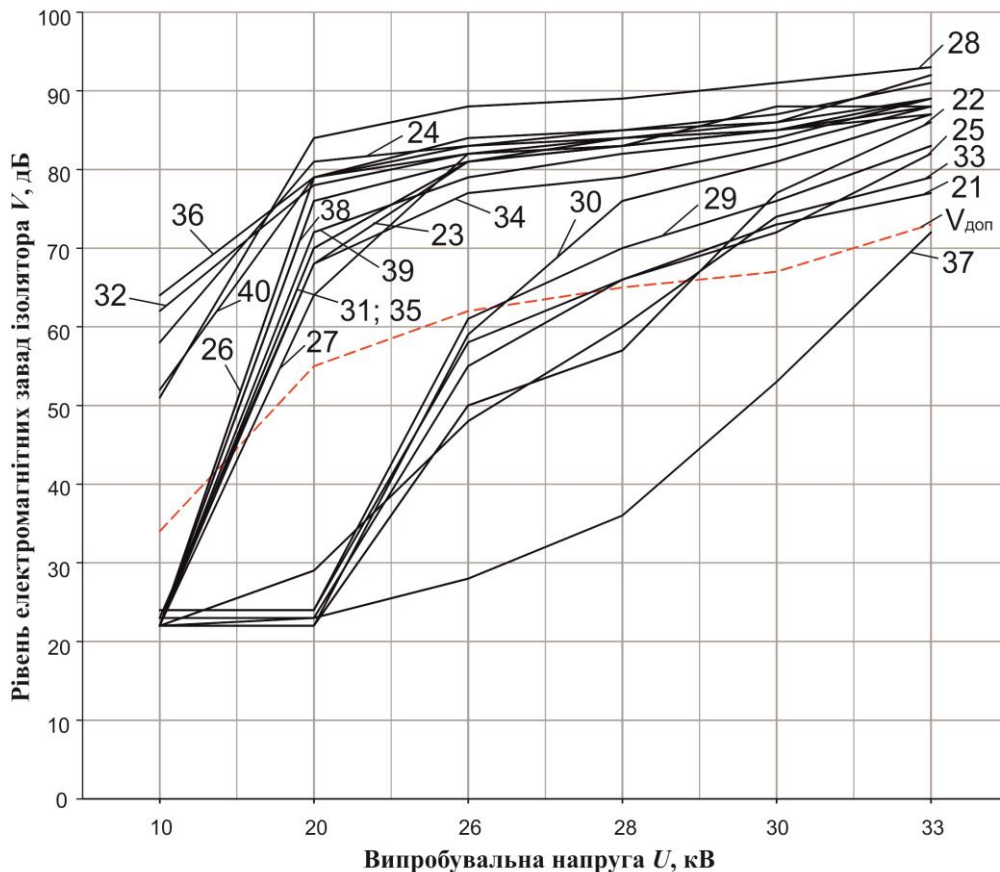


Рис. 3.5 Залежність рівня електромагнітних завад ізоляторів V (дБ) від випробувальної напруги U (кВ) при різних значеннях глибини армування стрижня та модифікаціях виконання полімерного покриття, де 21...40 – наскрізна нумерація ізоляторів згідно табл. Б.2; $V_{\text{доп}}$ – допустимий рівень електромагнітних завад

Аналіз даних табл. Б.2 та рис. 3.5 показує, що для серій ізоляторів 6 – 10 тільки невелика група ізоляторів має мінімальний рівень ЕМЗ 22 – 24 дБ (ізолятори з номерами 21, 22, 25, 29, 30, 33, 37) в діапазоні робочих напруг 10 – 15 кВ. Всі інші ізолятори (з номерами 23, 24, 26, 27, 28, 31, 32, 34, 35, 36, 38, 39, 40) фактично перевищують допустимий нормований рівень ЕМЗ. Рівень електромагнітних завад ізолятора з номером 37 (без покриття ЦПЗ) не перевищує допустимий рівень $V_{\text{доп}}$. Отже, відбракування ізоляторів досягає 95 %.

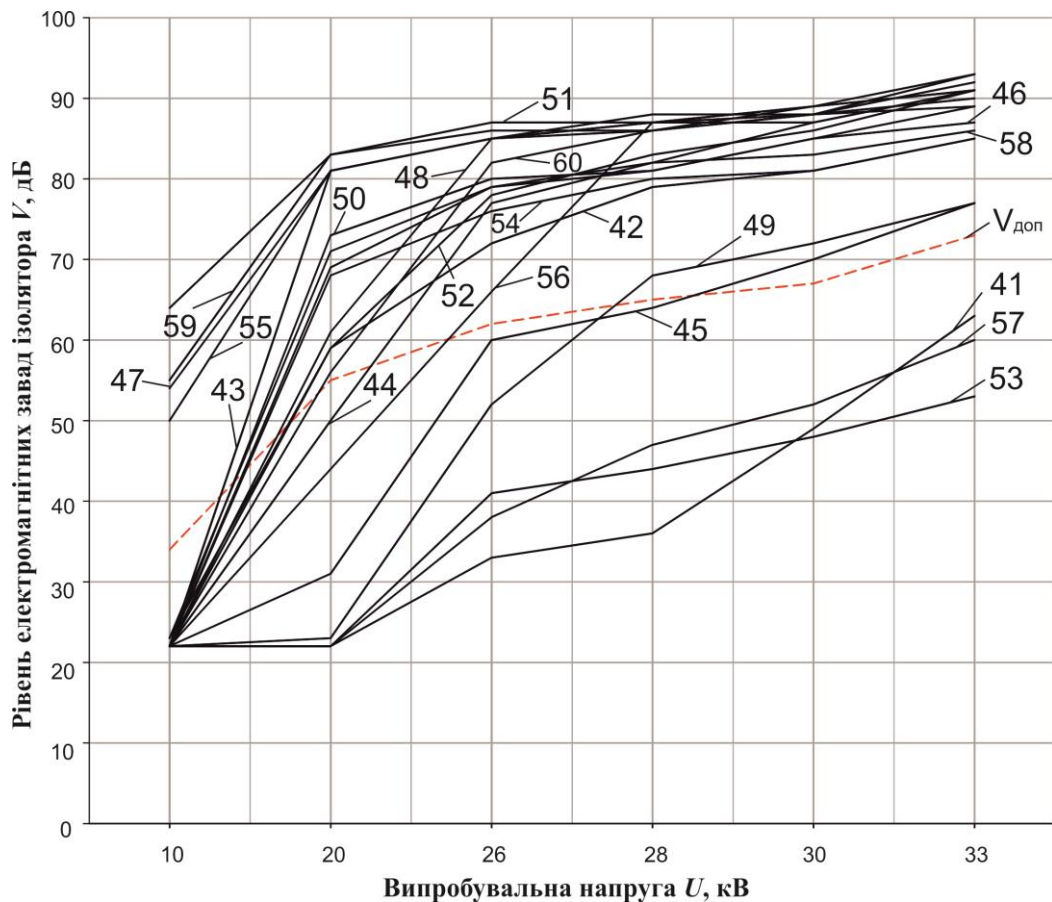


Рис. 3.6 Залежність рівня електромагнітних завад ізоляторів V (дБ) від випробувальної напруги U (кВ) при різних значеннях глибини армування стрижня та модифікаціях виконання полімерного покриття, де 41...60 – наскрізна нумерація ізоляторів згідно табл. Б.3; $V_{\text{доп}}$ – допустимий рівень електромагнітних завад

Аналіз даних табл. Б.3 та рис. 3.6 показує, що для серій ізоляторів 11 – 15 мінімальний рівень ЕМЗ (~ 23 дБ) мають ізолятори з номерами 41, 49, 53, 57. На

18 % підвищений рівень (порівняно з попереднім) має ізолятор з номером 45. Ще на 43 % більший рівень ЕМЗ мають ізолятори з номерами 44, 56. Врешті, максимально допустимий рівень ЕМЗ в діапазоні 38 – 42 дБ мають ізолятори з номерами 42, 48, 52, 60. Інші ізолятори з 11 – 15 серій (з номерами 43, 46, 47, 50, 51, 54, 56, 58, 59) перевищують допустимий рівень ЕМЗ для області робочих напруг ізоляторів. Рівень електромагнітних завад ізоляторів з номерами 41, 53 та 57 (без покриття ЦПЗ) не перевищує допустимий рівень $V_{\text{доп}}$. З рис. 4.6 видно, що ізолятори (крім ізоляторів з номерами 41, 53, 57) підлягають відбракуванню, яке досягає 85 %.

Для області випробувальних напруг 20 – 33 кВ найбільша кількість ізоляторів, що відповідають допустимому рівню ЕМЗ, відноситься до серій 1 – 5 (ізолятори з номерами 1, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 17). Для серій 6 – 10 тільки один ізолятор під номером 37 (без покриття ЦПЗ) відповідає допустимому рівню ЕМЗ. Для серій 11 – 15 допустимий рівень ЕМЗ при випробувальних напругах мають ізолятори з номерами 41, 53, 57 (без покриття ЦПЗ).

Детальний аналіз одержаних результатів показує, що мінімальні значення рівня ЕМЗ як у робочому (10 – 15 кВ), так і випробувальному (20 – 33 кВ) діапазонах напруг спостерігається в ізоляторах без застосування полімерного покриття ЦПЗ (модифікація І).

В залежності від глибини армування ізолятора (без застосування полімерного покриття ЦПЗ) значення рівня ЕМЗ, які відповідають допустимому рівню, має ізолятор під номером 13 з глибиною армування $h = 13 - 14$ мм. При застосуванні бітумного покриття ЦПЗ глибину армування звичайно приймають $h = 4 - 5$ мм.

В цілому, застосування полімерного покриття елементів ізолятора для умов сухої погоди, які моделювались в лабораторії, не забезпечує покращення характеристик ізоляторів відносно нормованих значень їх електромагнітних завад. Причиною цього є надмірна висока провідність застосованого полімерного покриття. Тобто, застосування напівпровідного полімерного покриття з високою провідністю суттєво зменшує напруженість електричного

поля на дзеркалі ЦПЗ. Але при цьому максимальна напруженість електричного поля «переноситься» на поверхню скляної деталі. Проведеним дослідженням, а також досвідом виготовлення та експлуатації високовольтних ізоляторів підтверджено, що для зменшення рівня напруженості електричного поля на дзеркалі ЦПЗ необхідно застосовувати його покриття бітумом, який має оптимальне значення провідності (див. розділ 4.1).

Отже, дії з впливу на поверхню ЦПЗ в області циліндричної частини стрижня не є тим засобом, який дозволить додатково (до існуючого) знизити рівень ЕМЗ ізоляторів. Для досягнення цього необхідно розглядати процеси у внутрішніх частинах ізоляторів.

Висновки до розділу 3

1. Вперше для Товариства з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» розроблено, виготовлено та впроваджено установку для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад у повній відповідності з вимогами міжнародних стандартів CISPR 18-2, IEC 60437, яка дозволяє проводити нормовані випробування виготовлених ізоляторів на базисних частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц для експорту високовольтних ізоляторів з України.

2. Елементи високочастотного загороджувача установки для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад були розроблені та виготовлені за розвинутою в дисертаційній роботі теорією кіл з розподіленими параметрами як самостійні малогабаритні спеціалізовані об'єкти (без використання «готових» великогабаритних L, C-елементів, запозичених від інших типових схем, що унеможлиблювало екранування подібних установок).

3. Калібрована Державним підприємством «Укрметртестстандарт» установка має мінімальні значення рівня зовнішніх електромагнітних завад (фону установки), завдяки чому дозволяє проводити випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад на частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц в діапазоні випробувальних напруг 10...40 кВ з запасом по відношенню до нормованого значення фону установки на 21 дБ при

18 кВ (20 кВ) та на 52 дБ при 30 кВ (40 кВ), що суттєво перевищує вимоги до відповідних випробувальних установок, визначених за міжнародними стандартами CISPR 18-2, IEC 60437.

4. Застосування створеної установки надає можливість проведення розробки, виготовлення та випробувань високовольтних ізоляторів в Україні з покращеними за рівнем електромагнітних завад характеристиками на 4 – 56 дБ в порівнянні з існуючими міжнародними стандартами.

5. Розроблена установка може бути рекомендована для випробувальних лабораторій на рівень електромагнітних завад в системах контролю ізоляції електроустаткування енергопідприємств, електростанцій і підстанцій; в вимірювальних системах високої напруги технологічних підприємств та дослідницьких центрів.

6. Дії з впливу на поверхню цементно-піщаного закладення в області циліндричної частини стрижня не є тим засобом, який дозволить додатково (до існуючого) знизити рівень електромагнітних завад ізоляторів. Для досягнення цього необхідно розглядати процеси у внутрішніх частинах ізоляторів.

Результати експериментальних досліджень розділу 3 наведено в таких публікаціях:

1. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розробка установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 1/1(27). С. 37–41. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

2. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Олександренко С. І. Випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22. № 3. С. 166–175. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІЗОЛЯТОРІВ

За матеріалами розділу 3 дисертації показано, що для зниження рівня електромагнітних завад досліджуваних ізоляторів необхідно розглядати процеси, обумовлені явищами у їхній внутрішній ізоляції. Гіпотетично, підвищення рівня ЕМЗ ізоляторів може бути обумовлено частковими розрядами у їх внутрішній ізоляції. Часткові розряди в ізоляції високовольтних кабелів при наявності в ній повітряних мікровключень розглядались в публікаціях [105–107], а саме в [105] досліджено імпульсні процеси розподілу густини струму в поліетиленовій ізоляції силового кабелю за наявності включення та при виникненні у ньому часткового розряду, в [106] вивчено резонансні властивості кабелю та характер розподілення високочастотного сигналу від зони часткового розряду вздовж кабелю, в [107] проведено аналіз умов для виникнення порогових електрофізичних процесів в локальних об'ємах поліетиленової ізоляції. Слід відмітити, що за ГОСТ 20074 [108] електромагнітні завади є одним з методів діагностування процесів часткових розрядів. В даній роботі часткові розряди в цементно-піщаному закладенні ізолятора розглядаються як джерела виникнення електромагнітних завад ізоляторів.

Для досягнення високих характеристик за рівнем електромагнітних завад високовольтних тарілчастих ізоляторів необхідно враховувати при їх розробці розподілення електричного поля, створюваного в конструкції, а також зміну поля внаслідок впливу різних факторів. При цьому, потрібно визначити напруженість електричного поля в області ЦПЗ як біля циліндричної, так і біля конічної частини стрижня ізолятора. Це в свою чергу потребує застосування програмних пакетів, що реалізують автоматизоване рішення вісе-симетричних задач розрахунку напруженості електричного поля методом скінченних елементів.

4.1 Розрахунок розподілення електричного поля ізолятора

Для дослідження розподілення електричного поля було використано, як приклад, типовий скляний тарілчастий ізолятор ПС 120Б [6]. Вибір даного типу ізолятора пов'язаний із широким використанням його в електричних мережах змінного струму.

Вихідні геометричні параметри ізолятора наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Геометричні параметри ізолятора типу ПС 120Б [6]

Тип ізолятора	Максимальний номінальний діаметр ізоляційної деталі D , мм	Номінальна будівельна висота H , мм	Стрижневе з'єднання діаметром d , мм [109]
ПС 120Б	255	127	16

Як зазначено в [110], причиною збільшення рівня ЕМЗ є виникнення коронного або ковзного розрядів на поверхні ЦПЗ між стрижнем та шапкою ізолятора.

Однак при підключенні до стрижня ізолятора типу ПС 120Б високої змінної напруги $U = 35$ кВ, проведені спостереження у відповідності до ГОСТ 1516.2 [111] показують, що біля стрижня та шапки нових виготовлених тарілчастих ізоляторів корони або розрядів не відбувається.

Тому, за таких обставин, за нашим припущенням, різке збільшення рівня ЕМЗ може бути пояснене інтенсивним розвитком ЧР в області цементно-піщаного закладення біля конічної частини стрижня ізолятора, які спричинені певним вмістом повітря та пористістю ЦПЗ.

Розрахунковий аналіз розподілення електричного поля в конструкції високовольтного ізолятора проведено за допомогою вирішення задачі методом скінченних елементів в програмному пакеті Comsol Multiphysics [93] в режимі AC/DC Module > Quasi-Static, Electric > Meridional Electric Currents.

Вирішення даної задачі проведено в три етапи:

1. На основі інтерактивної графіки в діалоговому режимі створювали кінцево-елементу модель ізолятора, задавали властивості матеріалів та граничні умови.
2. На другому етапі виконували кінцево-елементне вирішення даної задачі.
3. В діалоговому режимі виконували постпроцесорну обробку результатів з метою знаходження розподілення напруженості електричного поля в ізоляторі та візуалізації картини поля у вигляді ізоліній.

На рис. 4.1 представлено розрахункову модель серійного тарілчастого ізолятора типу ПС 120Б та виділено ділянки спільної границі його елементів [112].

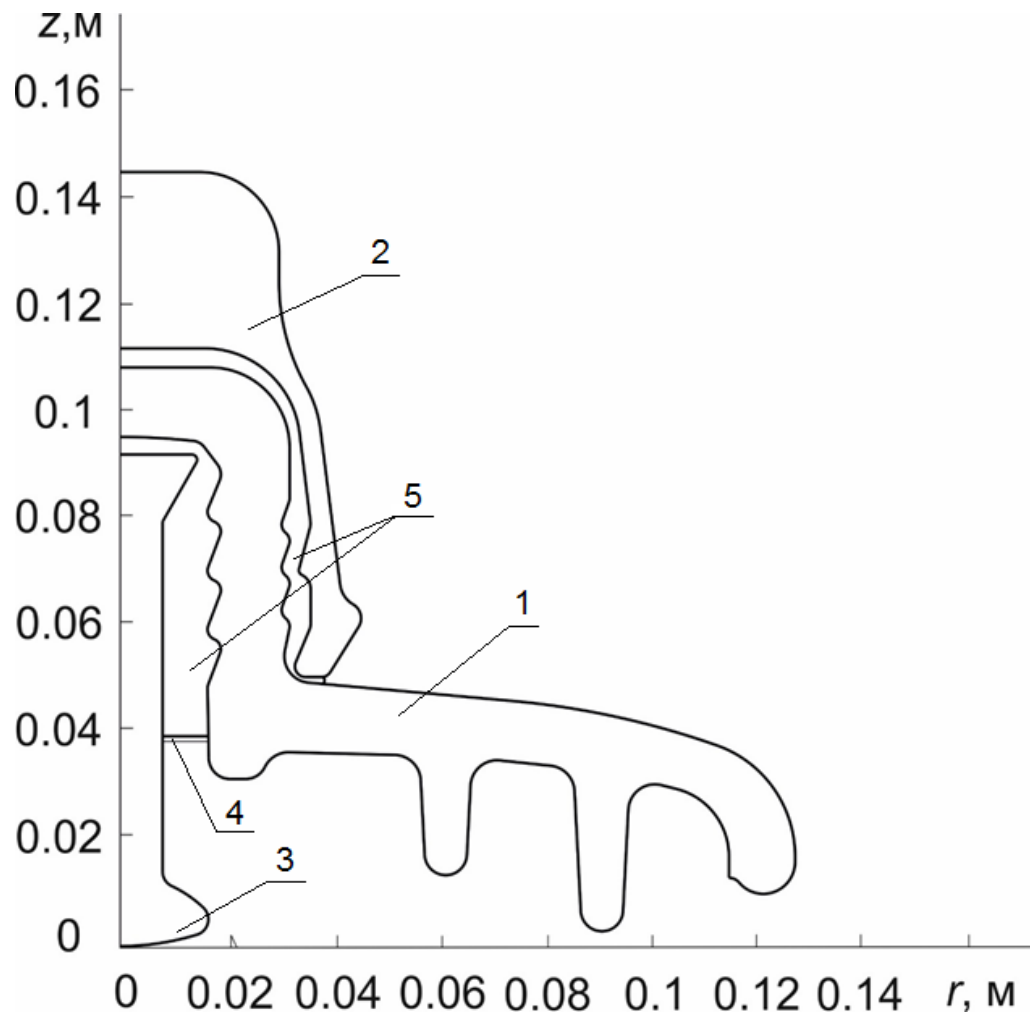


Рис. 4.1 Розрахункова модель ізолятора типу ПС 120Б [112], де
 1 – ізоляційна деталь ізолятора; 2 – шапка ізолятора; 3 – стрижень ізолятора;
 4 – бітумна промазка; 5 – цементно-піщане закладення

В основу розрахунків покладені наступні дані [94]:

- для бітумної промазки – відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 2,75$; електропровідність $\sigma = 3,16 \times 10^{-14}$ См/м;
- для цементно-піщаного закладення – відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 6$; електропровідність $\sigma = 2 \times 10^{-8}$ См/м [23];
- для скляної ізоляційної деталі – відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 5,87$; електропровідність $\sigma = 7,36 \times 10^{-15}$ См/м;
- прикладена напруга для ізолятора визначалась рівною амплітудному значенню і становила, відповідно, $U = 10\sqrt{2}$; $20\sqrt{2}$; $30\sqrt{2}$; $35\sqrt{2}$ кВ.

На рис. 4.2 зображено кінцево-елементну модель ізолятора.

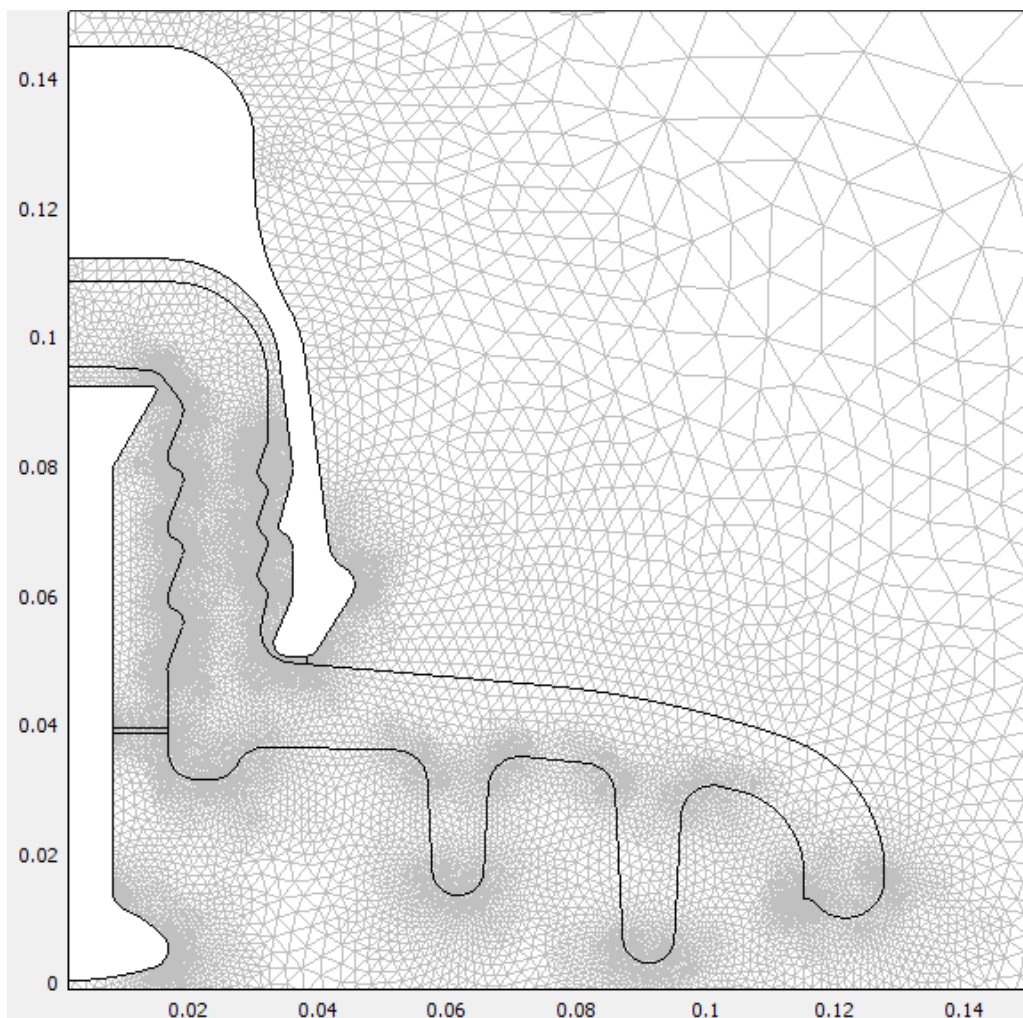


Рис. 4.2 Кінцево-елементна модель ізолятора типу ПС 120Б в
Comsol Multiphysics

Побудована сітка скінченних елементів містить 140000 граничних елементів, що покривають межі розрахункової області.

На рис. 4.3 та на рис. 4.4 показано розподілення напруженості електричного поля по всій конструкції ізолятора та в області заокруглення кінцевої частини стрижня ізолятора. Фонове забарвлення рівнів розподілення електричного потенціалу відповідає приведеній на рисунках шкалі.

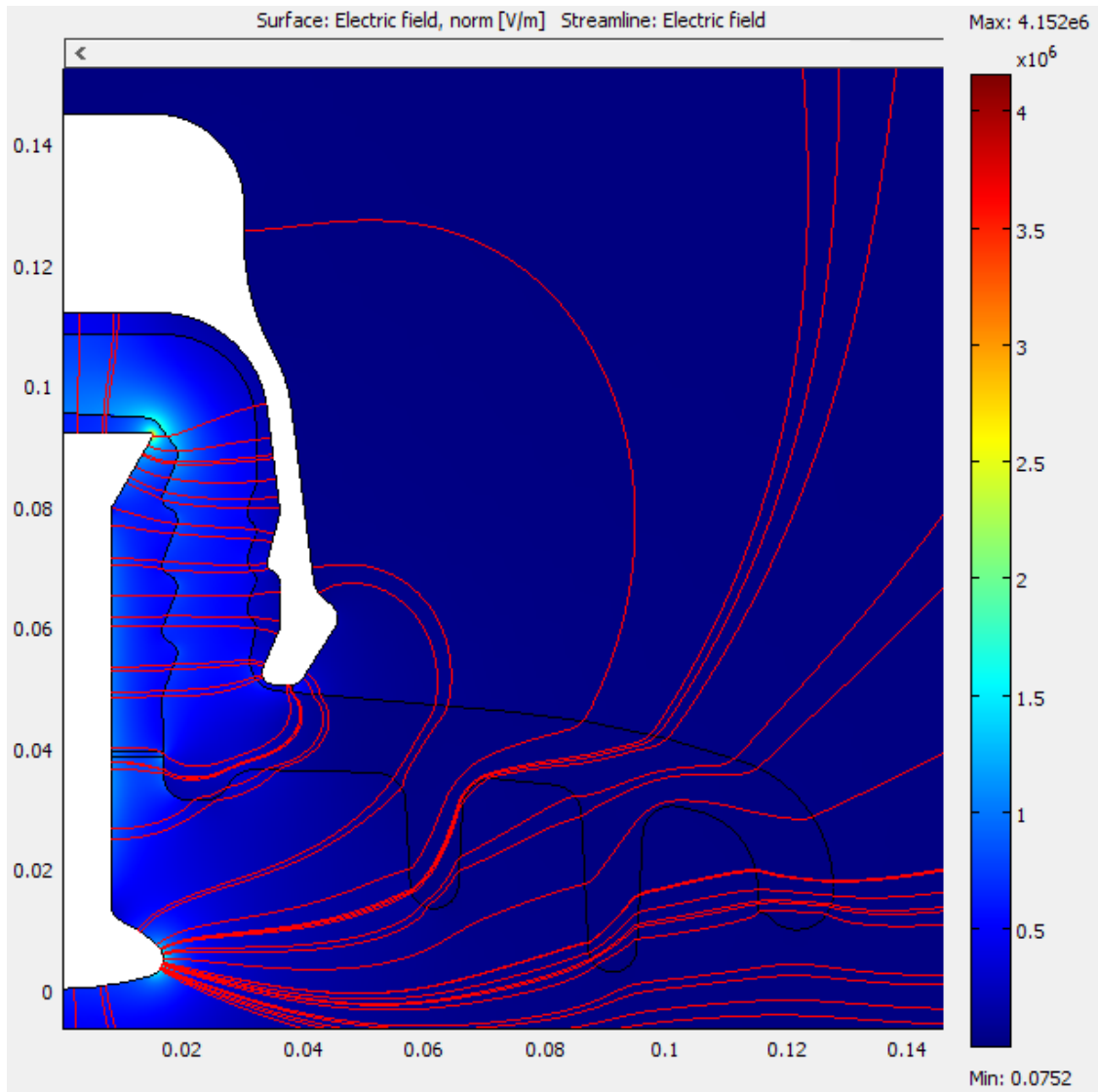


Рис. 4.3 Картина розподілення напруженості електричного поля в конструкції ізолятора типу ПС 120Б при нарузі $U=10\sqrt{2}$ кВ

Як видно, напруженість електричного поля в конструкції ізолятора розподілено нерівномірно. Концентрація силових ліній електричного поля, в основному, локалізується в силовому вузлі ізолятора. Піки напруженості

електричного поля спостерігаються в області заокруглення конічної частини стрижня ізолятора.

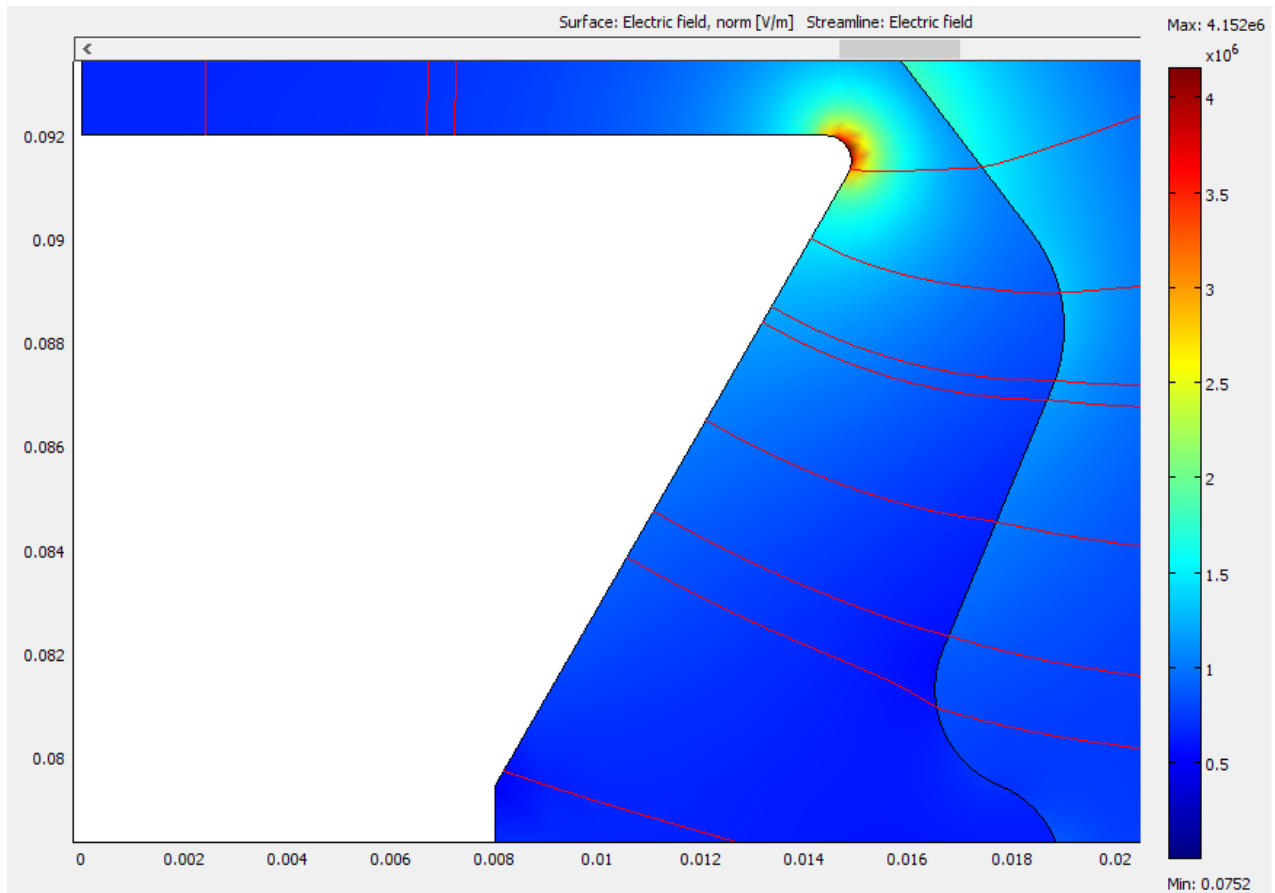


Рис. 4.4 Картина розподілення напруженості електричного поля в області заокруглення конічної частини стрижня ізолятора

Таким чином, виконаний розрахунок дозволив встановити, що найбільш напруженою в ізоляторі є область заокруглення конічної частини стрижня, де максимально проявляється дія електричного поля. Розрахункова напруженість в області заокруглення радіусом $R = 0,5$ мм конічної частини стрижня ізолятора становить $E = 42,3$ кВ/см (амплітудне значення) при напрузі на ізоляторі $U = 10\sqrt{2}$ кВ.

Одним із шляхів зниження напруженості електричного поля в області заокруглення конічної частини стрижня ізолятора є виконання стрижня ізолятора з таким профілюванням його конічної частини, що потребує забезпечення незмінності механічних напружень в цементно-піщаному закладенні, а також врахування основних співвідношень розмірів елементів ізолятора.

4.2 Зниження напруженості електричного поля за допомогою профілювання стрижня ізолятора

З метою зниження напруженості електричного поля в області ЦПЗ біля конічної частини стрижня ізолятора запропоновано удосконалення її конструкції, яке полягає у профілюванні конічної частини стрижня. Але при цьому необхідно одночасно забезпечити еквівалентність моделей ізолятора за умовою незмінності механічних напружень та інших факторів.

Розрахункову модель стрижня ізолятора при профілюванні його конічної частини представлено на рис. 4.5. Інші елементи ізолятора (склодеталь, чавунна шапка) приймалися незмінними.



Рис. 4.5 Розрахункова модель ЦПЗ та стрижня ізолятора при профілюванні його конічної частини

Одною з умов забезпечення еквівалентності моделей приймалась рівність напружень стискання ЦПЗ.

Визначення напружень стискання $\sigma_{ст}$ ЦПЗ проводилось за формулою [113]:

$$\sigma_{ст} = \frac{1,1P \sin \alpha}{S_k}, \quad (4.1)$$

де P – максимальне механічне нормоване навантаження, кН; S_k – площа поверхні конічної частини стрижня, м² та α – кут за рис. 4.5; 1,1 – нормований коефіцієнт «запасу». Площа S_k може бути знайдена за формулою (4.2), як для поверхні зрізаного конуса:

$$S_k = \pi(r_1 + r_2)l, \quad (4.2)$$

де r_1 – радіус верхньої основи зрізаного конуса, м; r_2 – радіус нижньої основи зрізаного конуса, тобто радіус циліндричної частини стрижня, м; l – твірна зрізаного конуса, м.

Виходячи з геометричної побудови рис. 4.5, радіус верхньої основи зрізаного конуса розраховується за формулою (4.3):

$$r_1 = r + R \cos \alpha, \quad (4.3)$$

де $r = \frac{d_{\max} - 2R}{2}$, м; R – радіус заокруглення конічної частини стрижня, м; d_{\max} – максимальний діаметр конічної частини стрижня ізолятора, м; α – кут нахилу конічної частини стрижня ізолятора.

Твірна зрізаного конуса розраховувалась за формулою:

$$l = \sqrt{(h - R)^2 + (r - r_2)^2 - R^2}, \quad (4.4)$$

де R – радіус заокруглення конічної частини стрижня, м; h – висота конічної частини стрижня ізолятора в метрах, яка визначалась за допомогою виразу:

$$h = R + R \sin(\alpha) + \frac{r - r_2 + R \cos(\alpha)}{\tan(\alpha)}. \quad (4.5)$$

При додатковому врахуванні напружень зрізу $\sigma_{зр}$ їх значення визначались за формулою:

$$\sigma_{зр} = \frac{1,1P}{\pi d_{\max} \cdot h_{цпз}}, \quad (4.6)$$

де $h_{цпз}$ показано на рис. 4.5.

Для забезпечення незмінності напружень стискання $\sigma_{ст}$ при різних радіусах заокруглення конічної частини стрижня R від 0,5 мм до 3,5 мм було проведено варіювання розмірів стрижня. В результаті отримано розрахункові геометричні параметри конічної частини стрижня ізолятора, які наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Розрахункові геометричні параметри конічної частини стрижня ізолятора

№ п/п	R , м	r , м	r_1 , м	r_2 , м	h , м	α , °	l , м
Модель 1	0,0005	0,0144	0,0148	0,008	0,0125	30,0	0,0136
Модель 2	0,001	0,0135	0,0144	0,008	0,0132	28,7	0,0133
Модель 3	0,0015	0,0127	0,0139	0,008	0,0137	27,4	0,0130
Модель 4	0,002	0,0118	0,0136	0,008	0,0143	26,1	0,0127
Модель 5	0,0025	0,0109	0,0132	0,008	0,0148	24,9	0,0123
Модель 6	0,003	0,0101	0,0128	0,008	0,0152	23,6	0,0120
Модель 7	0,0035	0,0092	0,0124	0,008	0,0156	22,4	0,0116

Було проведено ряд розрахунків максимального значення напруженості електричного поля в Comsol Multiphysics [93] для моделей ізоляторів з розрахунковими геометричними параметрами конічної частини стрижня ізолятора згідно табл. 4.2. Отримані результати наведені в табл. 4.3 та представлені на рис. 4.6 [112].

Таблиця 4.3

Результати розрахунків максимальної напруженості електричного поля при профілюванні конічної частини стрижня ізолятора та розрахунковому значенні прикладеної напруги U

№ П/П	U , кВ	E , кВ/см						
		Модель 1 ($R = 0,5$ мм)	Модель 2 ($R = 1,0$ мм)	Модель 3 ($R = 1,5$ мм)	Модель 4 ($R = 2,0$ мм)	Модель 5 ($R = 2,5$ мм)	Модель 6 ($R = 3,0$ мм)	Модель 7 ($R = 3,5$ мм)
1	$10\sqrt{2}$	42,3	31,7	27,4	25,2	23,5	22,3	21,4
2	$20\sqrt{2}$	84,6	63,4	54,9	50,5	47,1	44,7	42,9
3	$30\sqrt{2}$	126,9	95,2	82,3	75,7	70,6	67,0	64,3
4	$35\sqrt{2}$	148,1	111,03	96,3	88,2	82,3	78,1	75,0

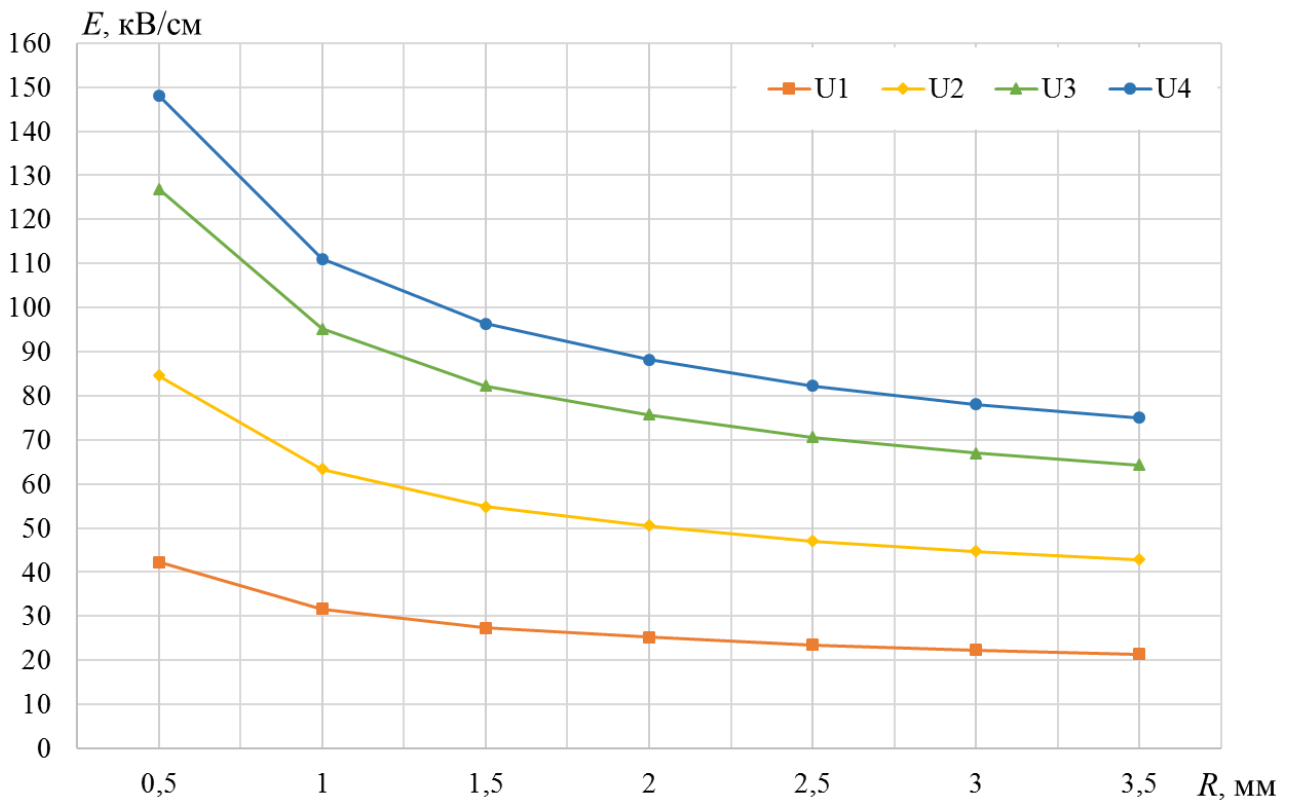


Рис. 4.6 Залежність максимальної напруженості електричного поля E від радіусу заокруглення конічної частини стрижня ізолятора R при різних значеннях напруги $U_1 \dots U_4$, кВ ($10\sqrt{2}$; $20\sqrt{2}$; $30\sqrt{2}$; $35\sqrt{2}$)

З графіків рис. 4.6 видно, що при профілюванні конічної частини стрижня ізолятора, яке полягає у збільшенні його радіусу заокруглення та одночасному забезпеченні еквівалентності моделей за умовою незмінності механічних напружень стискання ЦПЗ, максимальна напруженість електричного поля E в ізоляторі буде зменшуватися в 1,97 разів (практично у 2 рази).

Також запропоновано, як другий варіант, профілювання конічної частини стрижня ізолятора, яке додатково до вище зазначеного, полягає в забезпеченні еквівалентності моделей за рахунок незмінності як напружень стискання, так і напружень на зріз ЦПЗ [117].

Використовуючи розрахункову модель за рис. 4.5 та вирази (4.1) – (4.6), отримано геометричні параметри при профілюванні конічної частини стрижня ізолятора, які представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Розрахункові геометричні параметри конічної частини стрижня ізолятора

№ п/п	R , м	d_{\max} , м	r , м	r_1 , м	r_2 , м	h , м	$h_{\text{ЦПЗ}}$, м	l , м	α , °
Модель 1	0,0005	0,0297	0,0144	0,0148	0,008	0,0125	0,0522	0,01364	30,0
Модель 2	0,0010	0,0301	0,0140	0,0149	0,008	0,0133	0,0522	0,01369	30,2
Модель 3	0,0015	0,0304	0,0136	0,0150	0,008	0,0141	0,0522	0,01374	30,4
Модель 4	0,0020	0,0307	0,0133	0,0151	0,008	0,0148	0,0522	0,01380	30,7
Модель 5	0,0025	0,0310	0,0129	0,0151	0,008	0,0156	0,0522	0,01385	30,9
Модель 6	0,0030	0,0313	0,0126	0,0152	0,008	0,0164	0,0522	0,01390	31,2
Модель 7	0,0035	0,0316	0,0122	0,0153	0,008	0,0172	0,0522	0,01395	31,4

Для моделей ізоляторів з розрахунковими геометричними параметрами конічної частини стрижня ізолятора згідно табл. 4.4 розраховано максимальні значення напруженості електричного поля в Comsol Multiphysics [93], які зазначені в табл. 4.5 та графічно представлені на рис. 4.7.

Таблиця 4.5

Результати розрахунків максимальної напруженості електричного поля при профілюванні конічної частини стрижня ізолятора за табл. 4.4 та розрахунковому значенні прикладеної напруги U

№ п/п	U , кВ	E , кВ/см						
		Модель 1 ($R = 0,5$ мм)	Модель 2 ($R = 1,0$ мм)	Модель 3 ($R = 1,5$ мм)	Модель 4 ($R = 2,0$ мм)	Модель 5 ($R = 2,5$ мм)	Модель 6 ($R = 3,0$ мм)	Модель 7 ($R = 3,5$ мм)
1	$10\sqrt{2}$	42,3	29,9	26,1	23,7	21,9	20,7	19,7
2	$20\sqrt{2}$	84,6	59,9	52,2	47,5	43,8	41,4	39,4
3	$30\sqrt{2}$	126,9	90,0	78,3	71,2	65,7	62,2	59,1
4	$35\sqrt{2}$	148,1	105,0	91,4	83,2	76,7	72,5	68,9

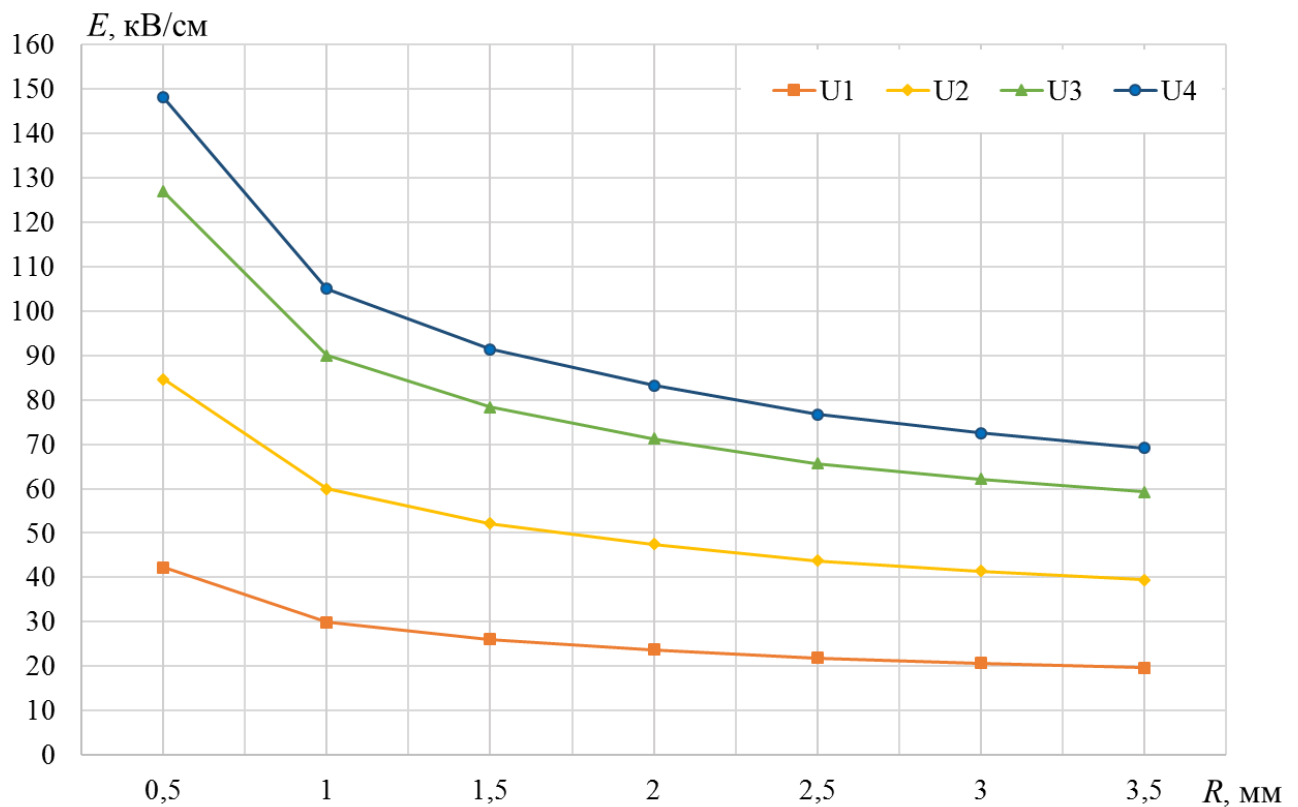


Рис. 4.7 Залежність максимальної напруженості електричного поля E від радіуса профілювання конічної частини стрижня ізолятора R при різних значеннях напруги $U_1 \dots U_4$, кВ ($10\sqrt{2}$; $20\sqrt{2}$; $30\sqrt{2}$; $35\sqrt{2}$)

З графіків рис. 4.7 видно, що при профілюванні конічної частини стрижня ізолятора та одночасному забезпеченні еквівалентності моделей за рівністю напружень стискання і напружень на зріз ЦПЗ, максимальна напруженість електричного поля E в ізоляторі буде зменшуватися більше (в 2,14 рази).

4.3 Виникнення часткових розрядів в ізоляторі

При проведенні структурних експериментальних досліджень зразків зрізів ЦПЗ високовольтних лінійних ізоляторів типу ПС 120Б виявлено, що вони містять сфероподібні повітряні мікровключення з діаметрами d_v від 0,05 мм до 0,25 мм [112].

Було розглянуто умови виникнення ЧР в сферичному мікровключенні, заповненому газом з відносною діелектричною проникністю ϵ_v , яке знаходиться в товщі діелектрика з відносною діелектричною проникністю ϵ_d [114]. Під дією зовнішнього електричного поля діелектрик поляризується і на межі сферичного мікровключення з'являються некомпенсовані заряди, які призводять до посилення електричного поля всередині мікровключення, що визначається за [115]:

$$E_v = \frac{3\epsilon_d}{\epsilon_v + 2\epsilon_d} E_d, \quad (4.7)$$

де E_d – напруженість електричного поля в ЦПЗ, що оточує газове мікровключення; ϵ_v – діелектрична проникність газу; ϵ_d – діелектрична проникність ЦПЗ.

Таким чином, електричне поле всередині сферичного мікровключення перевищує поле в ЦПЗ. Якщо напруженість електричного поля всередині мікровключення досягне критичного значення, почнеться процес ударної іонізації, достатньої для пробоя мікровключення. Критичне значення напруги, при якому виникає ЧР, визначається за [115, 116] законом, еквівалентним закону Пашена:

$$U_{\kappa} = \frac{43,6 \cdot 10^6 \cdot P \cdot d_{\text{в}}}{\ln(P \cdot d_{\text{в}}) + 12,8}, \quad (4.8)$$

де P – тиск, атм, $d_{\text{в}}$ – діаметр сферичного мікрովключення, м.

Максимальна напруженість електричного поля в ЦПЗ $E_{\text{д}}$ була обрана згідно табл. 4.3. Різниця потенціалів в мікрովключенні відповідно до (4.7) становить:

$$U_{\text{в}} = E_{\text{в}} d_{\text{в}}, \quad (4.9)$$

де $E_{\text{в}}$ розраховується за (4.7).

Виходячи з розрахункових значень за (4.8) та (4.9), було визначено граничні значення напруги на ізоляторі $U_{\text{гр.}}$, при яких виникає пробій сферичного мікрովключення. Одержані розрахункові результати наведені в табл. 4.6 та представлені графічно на рис. 4.8.

Таблиця 4.6

Граничні значення напруги на ізоляторі, при яких виникає пробій сферичного мікрովключення

№ П/П	R, мм	$U_{\text{гр.}}$, кВ				
		$d_{\text{в}} = 0,05$ мм	$d_{\text{в}} = 0,1$ мм	$d_{\text{в}} = 0,15$ мм	$d_{\text{в}} = 0,2$ мм	$d_{\text{в}} = 0,25$ мм
1	0,5	36,4	29,3	26,4	24,6	23,4
2	1,0	54,7	44,1	39,6	37,0	35,2
3	1,5	62,3	50,3	45,1	42,1	40,0
4	2,0	67,1	54,2	48,6	45,4	43,1
5	2,5	71,5	57,8	51,9	48,4	46,0
6	3,0	75,0	60,6	54,4	50,8	48,2
7	3,5	77,9	62,7	56,5	52,6	50,1

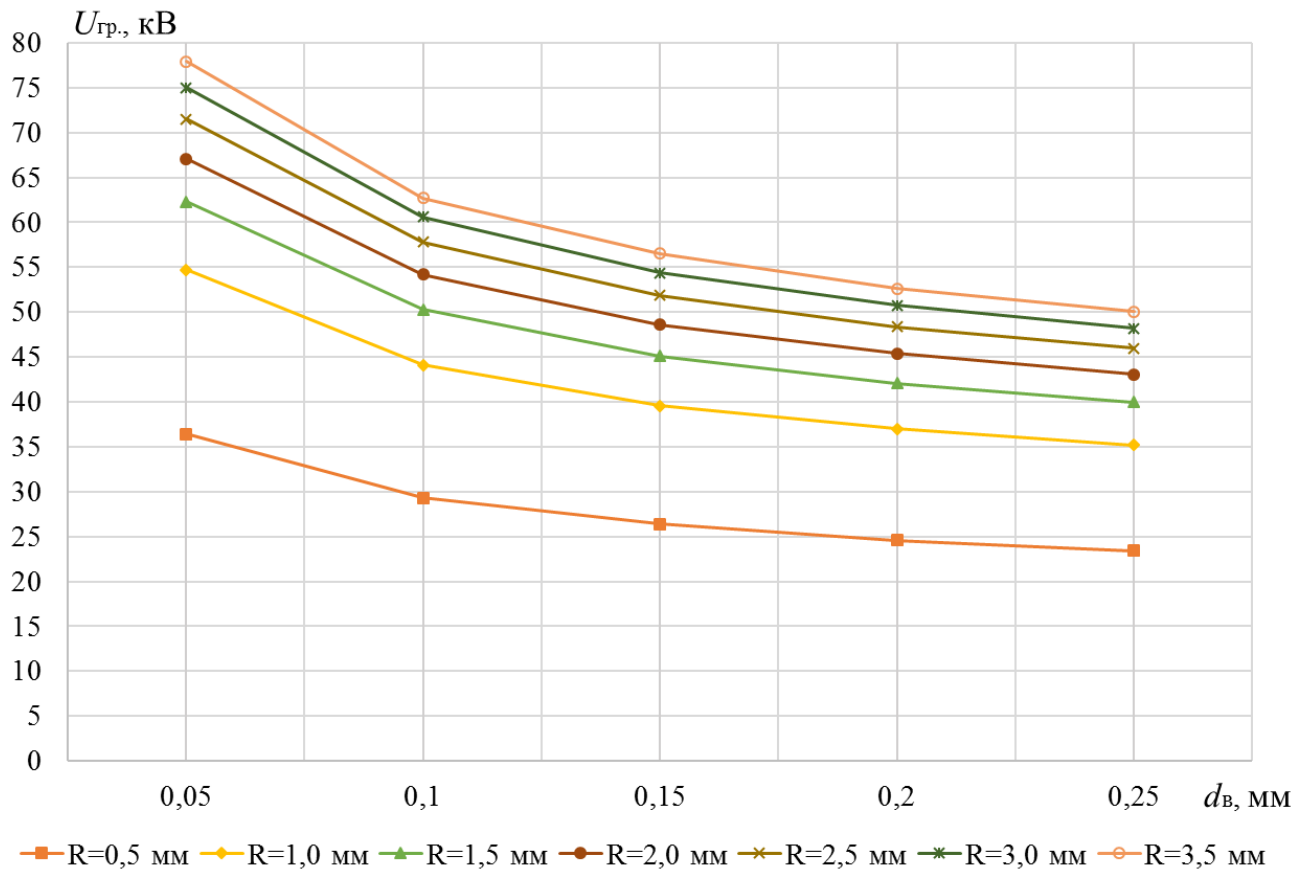


Рис. 4.8 Графік залежності граничних значень напруги $U_{гр.}$, при яких відбувається пробій мікровключення, від його діаметру d_v для різних моделей профілювання конічної частини стрижня ізолятора

Як слідує із даних рис. 4.8, при діаметрі мікровключення $d_v = 0,25$ мм відбувається пробій при граничному значенні напруги на ізоляторі $U_{гр.} = 23,4$ кВ (16,5 кВ діюче значення) для радіусу заокруглення $R = 0,5$ мм, при $U_{гр.} = 35,2$ кВ (24,9 кВ діюче значення) для $R = 1,0$ мм, при $U_{гр.} = 40$ кВ (28,3 кВ діюче значення) для $R = 1,5$ мм, при $U_{гр.} = 43,1$ кВ (30,5 кВ діюче значення) для $R = 2$ мм, при $U_{гр.} = 46,0$ кВ (32,5 кВ діюче значення) для $R = 2,5$ мм, при $U_{гр.} = 48,2$ кВ (34,1 кВ діюче значення) для $R = 3,0$ мм, при $U_{гр.} = 50,1$ кВ (35,4 кВ діюче значення) для $R = 3,5$ мм.

Максимальні значення напруги на ізоляторі $U_{гр.}$, при яких відбувається пробій, відповідають діаметру мікровключення $d = 0,05$ мм і дорівнюють для $R = 0,5$ мм $U_{гр.} = 36,4$ кВ (25,7 кВ діюче значення); для $R = 1,0$ мм $U_{гр.} = 54,7$ кВ (38,7 кВ діюче значення); $R = 1,5$ мм $U_{гр.} = 62,3$ кВ (44,1 кВ діюче

значення); для $R = 2,0$ мм $U_{гр.} = 67,1$ кВ (47,4 кВ діюче значення); для $R = 2,5$ мм $U_{гр.} = 71,5$ кВ (50,5 кВ діюче значення), для $R = 3,0$ мм $U_{гр.} = 75,0$ кВ (53,0 кВ діюче значення), для $R = 3,5$ мм $U_{гр.} = 77,9$ кВ (55,1 кВ діюче значення).

Таким чином, виходячи з даних рис. 4.8, профілювання конічної частини стрижня ізолятора, яке полягає в одночасному забезпеченні еквівалентності моделей за умовою незмінності механічних напружень стискання та зрізу в ЦПЗ, забезпечить зниження максимальної напруженості електричного поля та підвищення порогового значення напруги виникнення часткових розрядів в цементно-піщаному закладенні в 2,14 рази. Це надає можливість створення перспективних конструкцій високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів зі зменшеним рівнем електромагнітних завад.

4.4 Експериментальні дослідження рівня електромагнітних завад удосконалених високовольтних скляних ізоляторів

Для експериментального дослідження впливу зменшення напруженості електричного поля в області конічної частини стрижня ізолятора на рівень електромагнітних завад ТзОВ «Львівська ізоляторна компанія» було виготовлено експериментальні зразки високовольтних ізоляторів за типом ПС 120Б з радіусом заокруглення конічної частини стрижня $R = 3,5$ мм в кількості 10 шт. Дані зразки були заармовані згідно прийнятої в ТзОВ «Львівська ізоляторна компанія» технологією.

За допомогою створеної установки для випробувань ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад (розділ 3.1) були проведені за [26] випробування вищезазначених експериментальних зразків високовольтних ізоляторів з радіусом заокруглення конічної частини стрижня $R = 3,5$ мм, а також контрольних зразків (в кількості 10 шт.) високовольтних ізоляторів типу ПС 120Б, виготовлених за традиційною технологією.

Випробування високовольтних ізоляторів на рівень електромагнітних завад проводили на частоті 1,0 МГц в лабораторії при умовах: $t = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$; атмосферний тиск $P \sim 100\text{ кПа}$; відносна вологість повітря становила 76 – 80 %.

Результати випробувань експериментальних та контрольних зразків високовольтних ізоляторів на рівень електромагнітних завад зведені до табл. 4.7, табл. 4.8 та представлені на рис. 4.9 [117].

Таблиця 4.7

Рівень електромагнітних завад експериментальних зразків
високовольтних ізоляторів за типом ПС 120Б

Випробувальна напруга U , кВ	Рівень електромагнітних завад експериментальних зразків високовольтних ізоляторів, дБ									
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}
10	9	11	7	8	8	7	6	11	4	6
20	11	51	31	8	8	41	15	16	41	41
30	56	68	38	67	46	66	81	60	71	63

Таблиця 4.8

Рівень електромагнітних завад контрольних зразків
високовольтних ізоляторів типу ПС 120Б

Випробувальна напруга U , кВ	Рівень електромагнітних завад контрольних зразків високовольтних ізоляторів, дБ									
	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}	V_{17}	V_{18}	V_{19}	V_{20}
10	46	11	11	11	11	26	26	26	27	43
20	56	31	51	16	72	59	71	59	71	72
30	85	71	66	55	81	86	84	81	86	86

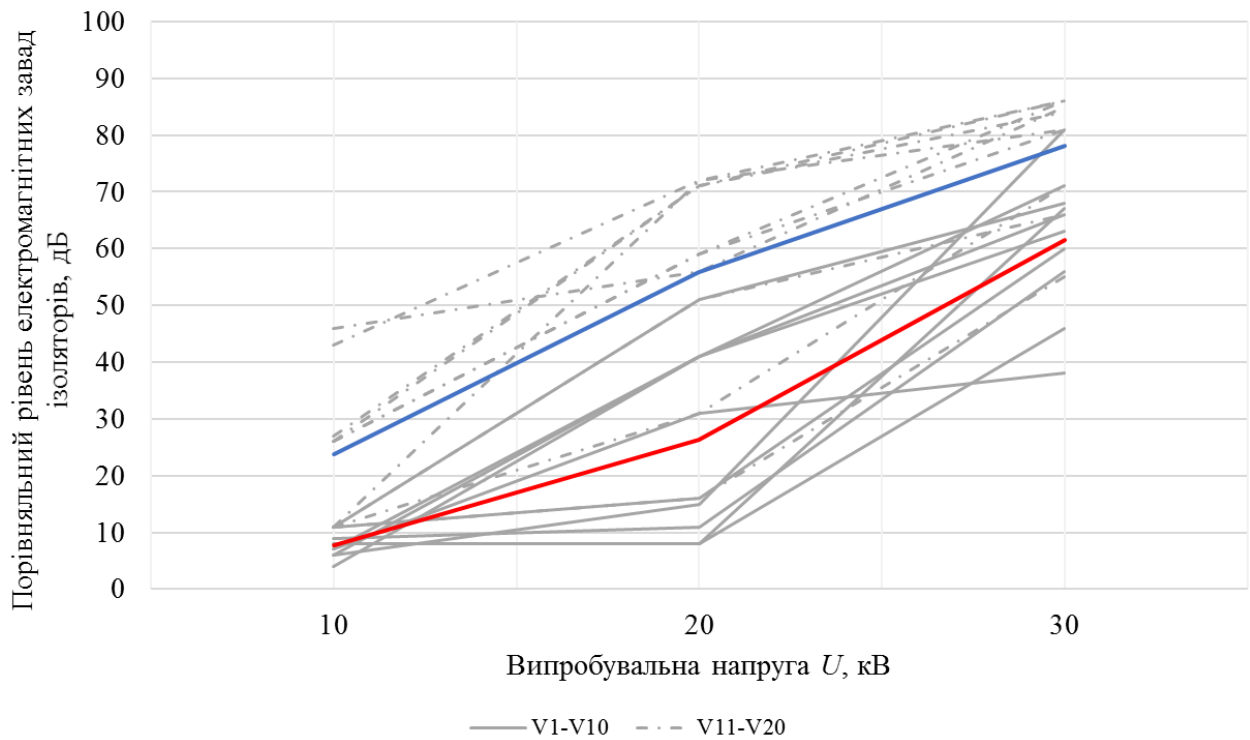


Рис. 4.9 Порівняльний рівень електромагнітних завад експериментальних ($V_1 \dots V_{10}$) та контрольних ($V_{11} \dots V_{20}$) зразків високовольтних ізоляторів, а також їх усереднений рівень, відповідно червоною та синьою лініями

Як видно рис. 4.9, усереднений рівень електромагнітних завад експериментальних зразків високовольтних ізоляторів в порівнянні з контрольними зразками ізоляторів типу ПС 120Б зменшений на 16...29 дБ при випробувальних напругах 10...30 кВ.

Отже, експериментально показано, що на рівень електромагнітних завад підвісних тарілчастих скляних ізоляторів впливає область конічної частини стрижня, а запропоновані рекомендації щодо її профілювання дозволяють суттєво знизити рівень ЕМЗ ізоляторів.

Висновки до розділу 4

1. Проаналізовано умови виникнення часткових розрядів у повітряних мікрովключеннях цементно-піщаного закладення (на прикладі ізолятора ПС 120Б) та визначені граничні значення напруги на ізоляторі, при яких виникає пробій включень. Показано, що в області конічної частини стрижня ізоляторів

виникають часткові розряди, які призводять до збільшення рівня електромагнітних завад.

2. Запропоновано удосконалення високовольтного тарілчастого ізолятора, яка полягає у профілюванні його конічної частини стрижня при забезпеченні незмінності максимальних механічних напружень стискання та зрізу в цементно-піщаному закладенні.

3. При профілюванні конічної частини стрижня (на прикладі ізолятора ПС 120Б) відбувається зменшення максимальної напруженості електричного поля та підвищення в 2,14 рази порогового значення напруги виникнення часткових розрядів в цементно-піщаному закладенні ізолятора.

4. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що усереднений рівень електромагнітних завад експериментальних зразків високовольтних ізоляторів в порівнянні з контрольними зразками ізоляторів типу ПС 120Б був зменшений на 16...29 дБ при випробувальних напругах 10...30 кВ.

Результати експериментальних досліджень розділу 4 наведено в таких публікаціях:

1. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Вплив профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Т. 25. № 6. С. 85–92. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання підвищення ефективності електрообладнання для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад шляхом розроблення нових математичних моделей, розвитку методів регулювання розподілення електромагнітного поля для елементів відповідного випробувального електрообладнання та проведення спеціалізованих експериментальних досліджень їх режимів. Отримані наукові результати мають істотне значення для розвитку техніки сильних електричних та магнітних полів, а також практики випробувань електроустаткування на допустимий рівень електромагнітних завад.

1. Аналіз стану досліджень і розробок в області випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад показав, що еволюційний розвиток відповідних випробувальних установок протягом тривалого часу базується на використанні теорії кіл з зосередженими параметрами, аперіодичних L , R та C , R частотних фільтрів, яке вимагає застосування неспеціалізованих великогабаритних L , C – елементів, запозичених із низькочастотних схем, що не дозволяє виконувати екранування активних частин випробувальних установок від зовнішніх електромагнітних завад.

2. Розроблено математичну модель реактора високочастотного загороджувача, що заснована на використанні теорії кіл з розподіленими параметрами та можливостей сучасної обчислювальної техніки, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує вплив індуктивності та взаємоіндуктивності окремих витків та частин провідників, а також їхньої ємності, що дозволяє поширити її застосування для частот як до, так і вище 1 МГц.

3. На основі розробленої математичної моделі реактора та її застосуванні до умов високочастотних загороджувачів випробувальних установок на електромагнітні завади сформульовані теоретичні положення режиму компенсуючого реактора, які на відміну від існуючих виконань загороджувачів, орієнтованих на використання частотного діапазону до 1 МГц та максимальних значень прохідного опору до 1 кОм, дозволяють забезпечити гостре резонансне

настроювання загороджувачів на задані високі частоти, а також збільшення їх прохідного опору до 20 кОм і вище.

4. Розвинуто метод регулювання електричного поля в котушці індуктивності високочастотного загороджувача шляхом формування її ізоляційного остову, який дозволяє узгодити розподілення електричного потенціалу з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу до співпадіння $\leq 1\%$, що надає можливість досягнення її стабільних характеристик в установках для випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, без впливу неконтрольованих ємнісних струмів витoku (пріоритет підтверджений патентом України «Високочастотний загороджувач» № 115475 від 10.11.2017 р.).

5. Визначено граничні значення напруги виникнення часткових розрядів (та пов'язаних з ними електромагнітних завад) у повітряних мікровключеннях цементно-піщаного закладення високовольтного ізолятора на основі розрахунку методом скінченних елементів локальних значень напруженості електричного поля та врахування електричного пробую цих мікровключень, що дозволяє отримати залежності граничних значень напруг виникнення часткових розрядів від розмірів повітряних мікровключень у цементно-піщаному закладенні високовольтного ізолятора та прогнозувати відповідні порогові значення напруги появи електромагнітних завад ізолятора.

6. Запропоновано зниження рівня електромагнітних завад високовольтного лінійного тарілчастого ізолятора, обумовлених пробоем повітряних мікровключень в цементно-піщаному закладенні, шляхом уведення взаємозалежності лінійних розмірів профілювання конічної частини сталевого стрижня ізолятора, які виходять із забезпечення незмінності механічних напружень в його цементно-піщаному закладенні, що дозволяє досягти зниження локальних максимальних усереднених значень напруженості електричного поля в ньому в 2,14 рази. Обґрунтовано удосконалення високовольтного лінійного тарілчастого ізолятора (на прикладі ізолятора ПС 120Б), яке полягає у профілюванні конічної частини стрижня при одночасному забезпеченні незмінності максимальних механічних напружень

стискання та зрізу у цементно-піщаному закладенні, що забезпечить можливість створення перспективних типів високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів зі зменшеним рівнем електромагнітних завад.

7. Для Товариства з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» на основі матеріалів даної дисертаційної роботи Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» разом з Науковим парком «Київська політехніка» за безпосередньої участі здобувача розроблено та виготовлено установку для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад у відповідності до вимог міжнародних стандартів CISPR 18-2, IEC 60437, яка дозволяє проводити нормовані випробування виготовлених високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад за умовами експорту високовольтних ізоляторів з України.

8. Державним підприємством «Укрметртестстандарт» проведено калібрування установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, за результатами якого видано свідоцтво про калібрування № UA/29/291113/000951 від 30.09.2019 р. та підтверджено мінімальні значення рівня зовнішніх електромагнітних завад (фону установки), що дозволяє проводити випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад на частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц в діапазоні випробувальних напруг 10...40 кВ з запасом по відношенню до нормованого значення фону установки на 21 дБ при 18 кВ (20 кВ) та на 52 дБ при 30 кВ (40 кВ), що суттєво перевищує вимоги до відповідних випробувальних установок, визначених за міжнародними стандартами CISPR 18-2, IEC 60437.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» в установці для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад, а також в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», що підтверджено актами впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михайлов Д. И. Изоляторы высокого напряжения : учеб. пособие. Новочеркасск : НПИ, 1977. 85 с.
2. Радченко В. Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. М. : Транспорт, 1975. 360 с.
3. Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения : Учебник для вузов / под. ред. Г. С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
4. Цимберов А. И., Штерн А. В. Стекланные изоляторы. М. : Энергия, 1973. 200 с.
5. Кім Є. Д. Методика оцнки качества закалки стеклодеталей высоковольтных линейных изоляторов. *Електрифікація транспорту*. 2014. № 8. С. 34–39.
6. ГОСТ 27661. Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Типы, параметры и размеры [Действующий от 2018-03-01]. М. : Стандартинформ, 2017. 16 с.
7. Колечицкий Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1983. 168 с.
8. Padma Lalitha M., Venkata Pavan Kumar K., Venkatesu S. Design and simulation of voltage and electric field distribution on disc insulators using finite element method in Opera software. *IEEE International Conference on Smart Electric Grid (ICSEG)*, 2014. P. 1–6.
9. Злаказов А. Б. Разработка методики проектирования силовых узлов подвесных изоляторов: дис... к-та техн. наук: 05.09.02, 01.02.08/ВНИИЭ. М., 1991. 209 с.
10. ГОСТ 9.307. Единая система защиты от коррозии и старения. Покртия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля. [Действующий от 1990-06-30]. М. : ИПК из-во стандартов, 1989. 7 с.

11. Кім Є. Д. Методологічні основи удосконалення високовольтних лінійних ізоляторів та методів їх випробувань: дис. ... д-ра наук: 05.09.13 / НТУ «ХП». Х., 2003. 410 с.
12. Кулик Н. М. Влияние цементных связей на прочностные характеристики и долговечность подвесных высоковольтных изоляторов: дис. ... к-та техн. наук: 05.17.11 / РХТУ им. Д. И. Менделеева. М., 1997. 283 с.
13. Аксенов В. А., Тюрин Э. А., Кравченко В. А., Маневич В. А. Аналитический расчет прочности подвесных тарельчатых изоляторов. *Электрические станции*. 1990. № 5. С. 55–57.
14. Злаказов А. Б., Немцев Я. Б., Федоров В. И., Есиков Ю. Г. Расчет механической прочности подвесных изоляторов. *Энергетическое строительство*. 1988. № 6. С. 76–77.
15. Тюрин Э. А. Расчет механических напряжений в подвесном изоляторе Труды СибНИИЭ. 1974. № 25. С. 46–51.
16. IEC 60305. Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V – Ceramic or glass insulator units for a.c. systems – Characteristics of insulator units of the cap and pin type. International Standard, 1995. 11 p.
17. Glushkov D. A. Polymeric Insulation: Advantages and Disadvantages, *Advanced Materials Research*. 2014. Vols. 1008-1009. P. 615–619.
18. Гутман И. Ю., Соломоник Е. А., Тиходеев Н. Н. Полимерные изоляторы для воздушных линий электропередачи. *Энергохозяйство за рубежом*. 1982. № 4. С. 21–25.
19. Гутман И. Ю., Соломоник Е. А. Усовершенствование конструкции и опыт эксплуатации полимерных изоляторов. *Энергохозяйство за рубежом*. 1987. № 4. С. 15–20.
20. Гутман И. Ю. Опыт эксплуатации за рубежом полимерных изоляторов для воздушных линий электропередачи. *Энергохозяйство за рубежом*. 1991. № 5. С. 21–23.

21. Glass insulators for 10-1150 kV overhead lines and substations. Product catalogue (2014). URL: https://www.nzinsulators.co.nz/sites/default/files/GIG_Catalogue_2014.pdf (дата звернення 16.04.2018). Назва з екрану.
22. Шевченко С. Ю., Окунь А. А. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора в ВЛ 110 кВ. Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Энергетика: надёжность и энергоэффективность. Х., НТУ «ХПИ». 2011. № 3. С. 136–143.
23. Бржезицький В. О., Щерба А. А., Подольцев О. Д., Троценко Є. О., Шевченко С. Ю., Гаран Я. О., Атарод С. Дослідження причин електричного перекриття підтримуючих ізолюючих підвісок середньої фази повітряної лінії електропередачі. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2011. № 6. С. 36–41.
24. Kontargyri V. T., Plati L. N., Gonos I. F., Stathopoulos I. A. Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string. *Measurement*. 2008. Vol. 41. № 5. P. 471–480.
25. Ким Е. Д. Исследование электрического поля высоковольтных тарельчатых изоляторов. *Електрифікація транспорту*. 2016. № 11. С. 22–27.
26. IEC 60437. Radio interference test on high-voltage insulators. 1998. 36 p.
27. ГОСТ 16842. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний источников промышленных радиопомех. М. : Изд-во стандартов, 1982.
28. ДСТУ ІЕС 60437. Ізолятори високовольтні. Випробування на радіозавади. [Чинний від 2016-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2015. 29 с.
29. Пелисье Рене. Энергетические системы: Пер. с фр. / Рене Пелисье; [Предисл. В. А. Веникова, с. 5 – 24]. М.: Высш. школа, 1982. 568 с.
30. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці. Вид. 2-е, стереотип. Л.: Афіша, 2000. 348 с.
31. ДСТУ 2203-93. Ізолятори лінійні підвісні тарілчасті. Загальні технічні умови. [Чинний від 1994-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1993. 29 с.

32. IEC 60383-1. Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V. Ceramic or glass insulator units for a. c. systems. Definitions, test methods and acceptance criteria. – The British Standards Institution, 1998. 111 p.

33. Оцінка стану зарубіжного та вітчизняного нормативно-правового забезпечення щодо обмеження впливу електромагнітного випромінювання та акустичних шумів об'єктів електроенергетики на здоров'я людини та навколишнє середовище. Науково-технічний центр електроенергетики. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/2.-EMP.pdf> (дата звернення 19.05.2019). Назва з екрану.

34. Кизеветтер В. Е., Костенко М. В., Перельман Л. С. Помехи от линий высокого напряжения. (Обзор докладов СИГРЭ-72). Л.: Энергия, 1976. 85 с.

35. ANSI C 29-1. Test Methods for Electrical Power Insulators. – The American Standards Institution, 2012. 17 p.

36. Pigini A., Ramkumar N. V. Aspects related to design and testing of UHV insulator strings with cap and pin insulators. *Second International Symposium on Standards for Ultra High Voltage Transmission*. 2009. P. 188–200.

37. CISPR/TR 18-2: 2010. Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment – Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits. IEC TC/SC CIS/C, 2010. 76 p.

38. Pakala W. E., Showers R. M. Principles application of radio interference measurements. *IEE Transaction on Instrumentation*. 1958. № 3-4. Vol. 1-7. P. 297–303.

39. High voltage transmission systems of the CISPR measuring set specification for the frequency range 0,15 MHz (Mc/s). *CISPR Publication № 308. Draft Section 4.5*. October 1960.

40. CEGB Standard 9931/5.

41. Журавлев Э. Н. Исследование радиопомех от линейной арматуры линий электропередачи 330 кВ с одиночными проводами. Труды ВНИИЭ, вып. XXXII, изд-во «Энергия», 1968.

42. Осипов К. Д., Пасынков В. В. Справочник по радиоизмерительным приборам : в 5-и томах. М. : Советское Радио, 1964. Том 5. 416 с.
43. Allan R. N., Kuffel E. Methods of measuring radio interference from high voltage insulators. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1965. Vol. 112. P. 919.
44. McMillan F. O. Radio interference from insulator corona. *Electrical Engineering*. 1932. Vol. 51. № 1. P. 3–9.
45. Kakoti G. C., Salvage B., Turner R. B. Radio interference from high-voltage insulators under direct-voltage conditions. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1969. Vol. 116. № 3. P. 415–421.
46. Reddy B. S., Kumar U. Radio interference measurements on a ceramic disc insulator string with field reduction electrode. *Journal of Instrumentation*. 2010. Vol. 5, № 07. P. T07001–T07001.
47. Руководство по эксплуатации установки для измерения уровня промышленных радиопомех. Методика проведения испытаний изоляторов. НПП «Диатранс», 2006. 9 с.
48. ГОСТ 51097. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от гирлянд изоляторов и линейной арматуры. Нормы и методы измерений, 1997. 8 с.
49. Селективный микровольтметр и прибор для измерения радиопомех. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Veb Messelektronik Berlin. 56 с.
50. Немцов М. В., Шамаев Ю. М. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. М. : Энергоиздат, 1981. 136 с.
51. Radio-influence voltage test. Test Report No: 10319/C/15. – EGU – HV Laboratory a. s. (Praha), 2015. 9 p.
52. Рыжавский Г. Я. Присоединение высокочастотных каналов к линиям высокого напряжения. М. : Энергия, 1978. 88 с.
53. БТЛИ.670210.001. Заградители высокочастотные серии ВЗ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1981. 21 с.

54. Микуцкий Г. В. Устройства обработки и присоединения высокочастотных каналов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Энергия, 1974. 200 с.

55. РД 34.48.301. Временные руководящие указания по расчету, проверке и настройке высокочастотных заградителей ВЗ-600-0,25, ВЗ-1000-0,6 и ВЗ-2000-1,2. М. : Энергия, 1967. 81 с.

56. Теоретичні основи електротехніки : в 3-х томах. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами : підручник / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб та ін.; за ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойка. К. : ІШЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. Том 1. 272 с

57. IEC 60353 Line traps for a.c. power systems, 1989. 82 p.

58. ГОСТ 15150 Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатического фактора внешней среды. [Действующий от 1971-01-01], 1969. 59 с.

59. Измерения в ВЧ связи. Устройства обработки и присоединения / под ред. Ю. П. Шкарина. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Ancom, 2014. 123 с.

60. Line Traps. Instruction manual. URL: <https://library.e.abb.com/public/010d7426b0698d59c12575a2003f0e33/Manual%20DLTC%20HNF91021%20D.pdf> (дата звернення 13.12.2017). Назва з екрану.

61. Line Traps. Air core, dry type up to 800 kV. URL: https://www.gegridsolutions.com/AlstomEnergy/grid/global/Resources/Documents/AIS/AIS/07_Line%20Traps_ok/Grid-AIS-Line_Traps-0247-2015_10-EN.pdf (дата звернення 21.01.2018). Назва з екрану.

62. Высокочастотные заградители. URL: http://www.energy.siemens.com/iemens.com/ru/pool/ru/Power-Transmission/Downloads/Line_trap_ru.pdf (дата звернення 13.02.2018). Назва з екрану.

63. 3414-005-46569277-2000 ТО. Заградитель высокочастотный серии ВЗ. Руководство по эксплуатации. М.: ООО «Росэнергосервис», 2000.

64. ЛЭУТ.670136.001 РЭ. Заградители высокочастотные. Руководство по эксплуатации М. : ООО «Уральский завод новых технологий», 2016.

65. Бржезицкий В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Високочастотний загороджувач: пат. 115475 України: МПК Н04В 3/56. № а 201510741 ; заявл. 04.11.15 ; опубл. 10.11.17, Бюл. № 21.

66. Иерусалимов М. Е., Бржезицкий В. А., Проценко А. Р., Захарченко В. В. Профилирование изоляционного остова высоковольтных делителей напряжения. *Изоляция высоковольтных электрофизических установок*. 1988. С. 97–103.

67. Бржезицкий В. А., Ильенко О. С., Кузьмина Е. Г., Проценко А. Р. и др. Выравнивание распределения напряженности электрического поля в элементах средств измерений высоких напряжений. *Электрофизические и прикладные вопросы высоковольтных измерений*: тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., м. Запорожье, 1990 р. 3., 1990 р. С. 24–25.

68. Бржезицкий В. А., Захарченко В. В., Иерусалимов М. Е., Проценко А. Р. и др. Высоковольтный широкополосный делитель напряжения с регулируемым распределением напряженности электрического поля. *Электрофизические и прикладные вопросы высоковольтных измерений*: тезисы докл. респ. науч.-техн. конф., м. Запорожье, 18-20 сент. 1990. 3., 1990. С. 25–26.

69. Park B., Neuberger T., Webb A. G., Bigler D. C., Collins C. M. Faraday shields within a solenoidal coil to reduce sample heating: Numerical comparison of designs and experimental verification. *Journal of Magnetic Resonance*. 2010. Vol. 202. № 1. P. 72–77.

70. Rainey J. M., DeVries S. J., Sykes B. D Estimation and measurement of flat or solenoidal coil inductance for radiofrequency NMR coil design. *Journal of Magnetic Resonance*. 2007. Vol. 187. № 1. P. 27–37.

71. Harpen M. D. Analysis of capacitive coupling and associated loss for a solenoidal magnetic resonance imaging radio-frequency coil. *Journal of Medical Physics*. 1989. Vol. 16. № 2. P. 234.

72. Ващук С. В., Лапоша М. Ю. Розробка котушок індуктивності з рівномірним розподіленням індукованого потенціалу. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: доповіді за матеріалами Міжнародної

науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2014 р. Київ, «Політехніка», 2014. С. 331–332.

73. Бабічева А. А., Лапоша М. Ю. Визначення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2015 р. Київ, «ФЕА НТУУ «КПІ», 2015. С. 395–397.

74. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Компенсований високовольтний високочастотний реактор. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23. № 4. С. 112–119.

75. Геллер Б., Веверка А. Импульсные процессы в электрических машинах / пер. с англ. М.: Энергия, 1973. 439 с.

76. Brzhezytskyi V. O., Laposha M. Y., Mykhailenko V. V., Peretyatko Y. V. Mathematical Model of the Compensating High Frequency Line Reactor. Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль (DIPED-2017): мат. XXII-го Міжнародного Семінару, м. Дніпро, 25-28 вересня 2017 р. Дніпро, «Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара», 2017. С. 152–156.

77. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 488 с.

78. Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники: Учебник для электротехн. и энергет. вузов и фак. М; Л. : Госэнергоиздат. 1951. Изд. 3-е. 464 с.

79. Иоссель Ю. Я., Качанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. Л. : Энергия, 1981. 288 с.

80. Абрамов В. Б., Бржезицький В. О., Проценко О. Р. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування: навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ», 2015. 218 с.

81. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М. : Наука, 1964. 780 с.

82. Mathcad Inc. Офіційна веб-сторінка. – 2017. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <http://mathcad.com.ua/>.

83. Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции. М. : Энергоатомиздат, 1981. 392 с.
84. Колечицкий Е. С. Анализ и расчет электрических полей. Ч. 1 и Ч. 2. М.: Моск. энергет. ин-т, 1977. 160 с.
85. Александров Г. Н., Иванов В. Л. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. Л. : Энергоатомиздат, 1984. 208 с.
86. Проценко А. Р. Высоковольтные делители напряжения для автоматизированных систем электропитания вычислительных рентгеновских томографов: дис. ... к-та техн. наук: 05.14.12 / НТУУ «КПИ». К., 1988. 289 с.
87. Шваб А. Измерения на высом напряжении: измерительные приборы и способы измерения: Пер. с нем. А. Шваб. М. : Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
88. Malevski R., Maruvada P. Computer assisted design of impulse voltage dividers. *IEEE Trans. Power and Appar and Syst.* 1976, Vol. 95, № 4 P. 1267–1273.
89. Napoli A. Di., Mazzetti C. Electrostatic and electromagnetic field computation for the H.V. resistive divider design. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.* 1979. Vol. 98. №1. P. 197–204.
90. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. *Технологічний аудит та резерви виробництва.* 2015. № 6/1 (26). С. 50–54.
91. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. М. : Наука, 1985. 336 с.
92. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М. : Наука, 1963. 660 с.
93. COMSOL Inc. Офіційна веб-сторінка. – 2017. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <https://www.comsol.com/>.
94. Справочник по электротехническим материалам: в 3-х т. / под. ред. Ю.В. Корицкого и др., 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. 464 с.
95. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Проценко О. Р. Регулювання електричного поля високовольтної котушки за допомогою профілювання діелектрика. *Наукові праці НУХТ.* 2016. Т. 22, № 2. С. 173–180.
96. Дамбраускас А. П. Симплексный поиск. М.: Энергия, 1979. 176 с.

97. Ермуратский П. В. Симлексный метод оптимизации // В кн.: *Математическое описание и оптимизация многофакторных процессов*. Труды МЭИ. М. : Моск. энерг. ин-т, 1966. Вып. 67. С. 29–68.
98. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 264 с.
99. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике; ред. Б. П. Креденцер. К. : Техника, 1984. 200 с.
100. CISPR 16-1-1 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus, 2015. 205 p.
101. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розробка установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 1/1(27). С. 37–41.
102. IEC 60060-2. High-voltage test techniques. Part 2: Measuring systems, 2010. 149 p.
103. ГОСТ 982. Масла трансформаторные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1980. 8 с.
104. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Олександренко С. І. Випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22, № 3. С. 166–175.
105. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Золотарев В. М. Импульсный ток в полиэтиленовой изоляции с воздушным включением при возникновении частичного разряда. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 2. С. 7–12.
106. Золотарев В. М., Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Анализ высокочастотных процессов в кабеле на напряжение 330 кВ с сегментированной жилой при возникновении частичных разрядов в его изоляции. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 2. С. 3–10.
107. Шидловский А. К., Щерба А. А., Золотарев В. М., Перетятко Ю. В. Анализ микронеоднородности электрического поля как фактора повышения интенсивности пороговых электрофизических процессов в полимерной изоляции

высоковольтных кабелей и самонесущих изолированных проводов. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 4. С. 3–14.

108. ГОСТ 20074. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. 1983. 24 с.

109. ГОСТ 27396. Арматура линейная. Сферические шарнирные соединения изоляторов. Размеры, 1993. 21 с.

110. Техника высоких напряжений: учебник для вузов / И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова, Г. М. Иманов и др.; под ред. Г.С. Кучинского; СПб. : Энергоатомиздат, 2003. 608 с.

111. ГОСТ 1516.2 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции, 1997. 32 с.

112. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Хомініч В. І. Удосконалення високовольтних лінійних скляних ізоляторів. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 6. С. 101–111.

113. Электрические изоляторы / Костюков Н. С. и др. ; под ред. Н. С. Костюкова. М. : Энергоатомиздат, 1984. 296 с.

114. Изоляция установок высокого напряжения: учебник для вузов / Г. С. Кучинский и др.; под общ. ред.: Г. С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.

115. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика. *Вестник УГАТУ*. 2011. Т.15, № 3 (43). С. 98–100.

116. Дмитриевский В. С. О минимуме напряжения начала ионизации в газовом включении. *Известия Томского политехнического института*. 1971. Т. 204. С. 9–13.

117. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Вплив профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Т. 25. № 6. С. 85–92.

ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 6/1 (26). С. 50–54. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).
2. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Розробка установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 1/1(27). С. 37–41. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).
3. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Проценко О. Р. Регулювання електричного поля високовольтної котушки за допомогою профілювання діелектрика. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22. № 2. С. 173–180. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).
4. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Олександренко С. І. Випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22. № 3. С. 166–175. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).
5. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Компенсований високовольтний високочастотний реактор. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23. № 4. С. 112–119. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).
6. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М., Хомініч В. І. Удосконалення високовольтних лінійних скляних ізоляторів. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23. № 6. С. 101–111. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).
7. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю., Маслюченко І. М. Вплив профілювання конічної частини стрижня ізолятора на максимальну напруженість електричного поля в його цементно-піщаному закладенні. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Т. 25. № 6. С. 85–92. (Міжнародна індексація: Index Copernicus).

8. Бржезицький В. О., Гаран Я. О., Лапоша М. Ю. Високочастотний загороджувач: пат. 115475 України: МПК H04B 3/56. № а 201510741 ; заявл. 04.11.15 ; опубл. 10.11.17, Бюл. № 21.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Brzhezytskyi V. O., Laposha M. Y., Mykhailenko V. V., Peretyatko Y. V. Mathematical Model of the Compensating High Frequency Line Reactor. *Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль (DIPED-2017)*: мат. XXII-го Міжнародного Семінару, м. Дніпро, 25-28 вересня 2017 р. Дніпро, «Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара», 2017. С. 152–156. (Міжнародна індексація: SCOPUS).

10. Ващук С. В., Лапоша М. Ю. Розробка котушок індуктивності з рівномірним розподіленням індукованого потенціалу. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2014 р. Київ, «Політехніка», 2014. С. 331–332.

11. Бабічева А. А., Лапоша М. Ю. Визначення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2015 р. Київ, «ФЕА НТУУ «КПІ», 2015. С. 395–397.

12. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Ярмоцик Є. С. Зниження рівня радіозавад високовольтних лінійних ізоляторів. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2016 р. Київ, «ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. С. 347–350.

13. Бржезицький В. О., Лапоша М. Ю., Євдокимов О. І. Дослідження механічних напружень у високовольтному лінійному ізоляторі. *Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики*: статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, м. Київ, 2016 р. Київ, «ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. С. 351–353.

Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено та обговорено на:

1. Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», (Україна, м. Київ, 2014, 2015, 2016 рр., форма участі – усні доповіді та публікації тез);

2. XIX Міжнародному симпозіумі SIEMA'2016 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (Україна, м. Харків, 2016 р., форма участі – усна доповідь);

3. XXII Міжнародному семінарі «Прямі та обернені задачі теорії електромагнітних та акустичних хвиль (DIPED–2017)» (Україна, м. Дніпро, 2017 р., форма участі – усна доповідь та публікація тез).

ДОДАТОК Б. Результати вимірювань рівня електромагнітних завад ізоляторів типу ПСВ 120Б в залежності від глибини армування стрижня за різних модифікацій виконання полімерного покриття

Таблиця Б.1

Нумерація серії ізоляторів		1				2				3				4				5			
Фактична глибина армування h , мм		11,0 – 12,0 мм				12,0 – 12,5 мм				12,8 мм				13,0 – 14,0 мм				11,5 – 12,5 мм			
Модифікація виконання полімерного покриття		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Наскрізна нумерація ізоляторів		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U , кВ	$V_{\text{доп.}}$, дБ	Рівень електромагнітних завад ізолятора V , дБ																			
33	73	65	79	92	92	56	64	88	89	69	66	96	91	50	64	90	91	59	79	88	91
30	67	62	72	91	89	54	63	84	85	56	64	94	84	39	64	86	82	58	69	86	85
28	65	62	64	89	86	52	62	83	84	51	63	91	73	36	61	86	66	55	63	85	81
26	62	59	63	89	81	49	62	82	82	48	63	90	62	34	57	84	61	47	55	83	74
20	55	31	56	80	59	35	54	74	78	22	51	85	44	22	42	83	34	23	46	78	54
10	34	22	22	62	22	22	22	22	64	22	22	23	22	22	22	62	22	23	22	22	22

Таблиця Б.2

Нумерація серії ізоляторів	6				7				8				9				10				
Фактична глибина армування h , мм	5,0 – 6,0 мм				3,5 – 4,0 мм				4,0 – 5,0 мм				3,0 – 5,0 мм				5,5 – 6,5 мм				
Модифікація виконання полімерного покриття	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Наскрізна нумерація ізоляторів	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
U , кВ	$V_{\text{доп.}}$, дБ	Рівень електромагнітних завад ізолятора V , дБ																			
33	73	77	86	87	92	82	91	88	93	83	87	88	88	79	88	88	88	72	89	89	89
30	67	73	77	85	86	72	87	85	91	76	81	85	88	74	83	85	85	53	85	84	86
28	65	66	57	83	84	66	85	83	89	70	76	83	83	60	79	83	84	36	84	82	85
26	62	55	50	81	83	58	84	82	88	61	59	81	82	48	77	81	82	28	81	79	83
20	55	23	22	68	81	24	79	64	84	24	22	70	78	29	68	70	79	23	76	72	79
10	34	23	22	23	58	24	22	22	51	24	22	22	62	22	22	22	64	22	22	22	52

Таблиця Б.3

Нумерація серії ізоляторів		11				12				13				14				15			
Фактична глибина армування h , мм		6,5 – 7,5 мм				7,8 – 8,0 мм				6,0 – 7,0 мм				8,0 – 8,5 мм				6,5 – 7,5 мм			
Модифікація виконання полімерного покриття		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Наскрізна нумерація ізоляторів		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
U , кВ	$V_{\text{доп.}}$, дБ	Рівень електромагнітних завад ізолятора V , дБ																			
33	73	63	85	92	91	77	87	90	91	77	89	93	91	53	85	93	91	60	86	89	91
30	67	49	81	88	87	70	85	88	89	72	85	89	86	48	81	88	87	52	83	88	89
28	65	36	79	87	82	64	81	88	87	68	81	87	83	44	80	86	87	47	82	86	86
26	62	33	72	85	77	60	79	85	85	52	80	87	78	41	76	85	66	38	79	86	82
20	55	22	59	81	50	31	69	81	61	23	73	83	59	22	68	81	44	22	71	83	56
10	34	22	23	22	22	22	22	54	22	22	22	64	22	22	22	50	22	22	23	55	22

ДОДАТОК В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво

«УЗГОДЖЕНО»

Декан факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор, д.т.н.

Яндульський О. С.

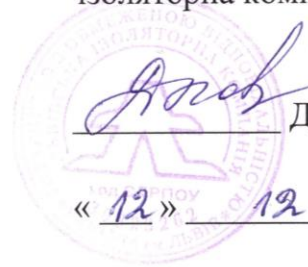


20 19 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор Товариства з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія»

Динік О. В.



« 12 » 12 20 19 р.

АКТ

*впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи
Лапоши Миколи Юрійовича «Підвищення ефективності електрообладнання для
випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних
завад», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів*

Ми, які підписались нижче, професор кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н. Бржезицький Володимир Олександрович та начальник випробувальної лабораторії Товариства з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» Олександренко Сергій Ілліч склали даний акт про те, що основні положення та результати наукових досліджень дисертаційної роботи Лапоши Миколи Юрійовича, які стосуються регулювання електричного поля в котушці індуктивності високочастотного загороджувача, що забезпечує узгодження розподілення електричного потенціалу в котушці з розподіленням індукованого магнітним полем котушки потенціалу за рахунок виконання профілювання її внутрішньої поверхні ізоляційного остову, впроваджені у виробництво в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Львівська ізоляторна компанія» в установці для випробування ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних

завад, яка відповідає вимогам міжнародних стандартів CISPR 18-2, IEC 60437 та дозволяє проводити нормовані випробування виготовлюваних високовольтних скляних тарілчастих підвісних ізоляторів повітряних ліній за умовами експорту високовольтних ізоляторів з України.

Дана установка калібрована Державним підприємством «Укрметртестстандарт», за результатами якого видано свідоцтво про калібрування № UA/29/291113/000951 від 30.09.2019 р. та підтверджено мінімальні значення рівня зовнішніх електромагнітних завад (фону установки), що дозволяє проводити випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завад на частотах 0,5 МГц та 1,0 МГц в діапазоні випробувальних напруг 10...40 кВ з запасом по відношенню до нормованого значення фону установки на 21 дБ при 18 кВ (20 кВ) та на 52 дБ при 30 кВ (40 кВ), що суттєво перевищує вимоги до відповідних випробувальних установок, визначених за міжнародними стандартами CISPR 18-2, IEC 60437.

ВІД КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
Науковий керівник, професор кафедри
теоретичної електротехніки, д.т.н.


Бржезицький В. О.

« 06 » 12 2019 р.

**ВІД ТЗОВ «ЛЬВІВСЬКА
ІЗОЛЯТОРНА КОМПАНІЯ»**
Начальник випробувальної
лабораторії


Олександренко С. І.

« 12 » 12 2019 р.



**ДОДАТОК Г. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в
навчальний процес**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан факультету
електроенерготехніки та автоматики
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
професор, д.т.н.


Яндутьський О. С.
« 26 » 06 20 19 р.

АКТ


*впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Лапоши Миколи Юрійовича «Підвищення ефективності електрообладнання для
випробувань високовольтних ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних
завад», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів*

Ми, які підписалися нижче, завідувач кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського професор, д.т.н. Островерхов М. Я. та доцент кафедри теоретичної електротехніки, к.т.н. Проценко О. Р. склали даний акт про те, що результати Розділу 2 «Регулювання розподілення електричного поля в котушці індуктивності (реакторі) високочастотного загороджувача» дисертаційної роботи Лапоши М. Ю. впроваджено в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки в практичних заняттях за Розділом 1 «Статистичні методи планування експерименту» (Тема 1.2. Метод послідовного симплекс-планування експерименту) кредитного модуля «Наукова робота за темою магістерської дисертації-2. Основи наукових досліджень», що проводяться в 2-му семестрі зі студентами, які здобувають освітній ступінь магістра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»).

Завідувач кафедри
теоретичної електротехніки,
професор, д.т.н.

 Островерхов М. Я.

Доцент кафедри
теоретичної електротехніки,
к.т.н.

 Проценко О. Р.

ДОДАТОК Д. Керівництво з експлуатації установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад (електромагнітних завад)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор Корпорації
«Науковий парк «Київська політехніка»

Кологривов Я.І.



2015 р.

**УСТАНОВКА ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ІЗОЛЯТОРІВ НА
ДОПУСТИМИЙ РІВЕНЬ РАДІОЗАВАД**

—
КЕРІВНИЦТВО З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2015 р.

Даний документ об'єднує керівництво з експлуатації та паспорт установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад (надалі – установка), виробничий номер № 1, виготовлення 2015 р.

У в а г а ! Установка для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад є об'єктом інтелектуальної власності і не підлягає тиражуванню або передачі юридичним або фізичним особам без узгодження з її розробником – Корпорацією «Науковий парк «Київська політехніка» (м. Київ).

1 Призначення та область застосування

1.1 Установка призначена для проведення випробувань тарілчастих підвісних ізоляторів повітряних ліній в лабораторних умовах.

1.2 Галузь застосування – лабораторії територіальних органів, системи контролю електроустаткування енергопідприємств, електростанцій і підстанцій; вимірювальні системи високої напруги технологічних підприємств, випробувальних та дослідницьких центрів.

2 Основні технічні та метрологічні характеристики

2.1 Високовольтний трансформатор живлення установки забезпечує напругу, форма якої на об'єкті випробування є практично синусоїдальною за ГОСТ 1516.2, при цьому відношення амплітудного значення напруги до діючого знаходиться в межах $\sqrt{2} \pm 0,07$.

2.2 Частота вимірювань радіозавад знаходиться в діапазоні $0,5 \pm 0,05$ МГц та $1,0 \pm 0,1$ МГц.

2.3 Установка забезпечує проведення випробувань сухих та чистих ізоляторів за рівнем допустимих радіозавад (відносно 1 мкВ на номінальному активному опорі 300 Ом), в робочому діапазоні випробувальної напруги від 10 кВ до 45 кВ.

2.4 При нормованій напрузі випробувань рівень фону установки є не менш ніж на 10 дБ меншим допустимого рівня радіозавад випробуваних ізоляторів. При фіксації показників вимірів завади фіксуються як завади від об'єкту, якщо вимірний рівень перевищує рівень фону не менше ніж на 6 дБ.

2.5 Опір високовольтної частини фільтру на частотах 0,5 МГц; 1,0 МГц, не менш, кОм 20

2.6 Індуктивність котушки низьковольтної частини фільтру складає, мГн 1,2

2.7 Ємність високовольтного конденсатора зв'язку не менш ніж в 5 разів більше ємності випробуваного ізолятора та складає, пФ 448

2.8 Приєднання вимірювача радіозавад (селективного мікровольтметра) до схеми вимірювання радіозавад виконується через омичний подільник напруги $R_1/R_2 = 271/50$ (Ом).

2.9 Низьковольтна частина схеми вимірювання радіозавад захищена розрядником з пробивною напругою не більше, В 400

2.11 Вимоги до з'єднувального коаксіального кабелю

2.10.1 Хвильовий опір, Ом 50

2.10.2 Довжина з'єднувального кабелю, м 10

3 Умови експлуатації

3.1 Експлуатація установки повинна забезпечуватись в наступних умовах:

- температура оточуючого повітря, °С від 15 до 35;
- відносна вологість повітря, % від 45 до 75;
- атмосферний тиск, кПа від 95 до 104.

3.2 Установка необхідно зберігати в закритому приміщенні при температурі повітря від 5 до 35 °С та вологості не більше 85%. Не припустима наявність в повітрі агресивних або струмопровідних забруднень.

3.3 Параметри оточуючого середовища при транспортуванні установки: температура від 5 до 40 °С, вологість до 90%.

4 Комплектність

До складу установки входить обладнання:

- 4.1 Високовольтна частина фільтру – 2 комплекти.
- 4.2 Високовольтний конденсатор зв'язку – 1 шт.
- 4.3 Низьковольтний блок установки – 1 шт.
- 4.4 Вимірювач радіозавад (селективний мікровольтметр SMV-11) – 1 шт.
- 4.5 Кабелі, провідники з'єднань та заземлення – 1 комплект.
- 4.6 Комірка огороження установки – 1 шт.
- 4.7 Діелектричні рукавички – 2 пари (забезпечується Замовником).
- 4.8 Розрядник Р-350 – 1 шт.
- 4.9 Високовольтний запобіжник типу П(н) 011-35 У3 – 1 шт.

5 Опис та робота

Схема установки представлена на рис. 1, де РН – регулятор напруги; ТР – високовольтний трансформатор; НВО – низьковольтна обмотка ТР; ВВО – високовольтна обмотка ТР; F – високовольтний запобіжник; ВО – вимірювальна обмотка ТР; рV – вольтметр вимірювальної обмотки; L_в – котушка високовольтної частини фільтру; E₁, E₂ – електростатичні екрани високовольтної частини фільтру; S – монтажний стрижень; I – випробуваний ізолятор; С – високовольтний конденсатор зв'язку; FV – низьковольтний розрядник; ХТ1 – з'єднувальний провід; Р₁ – вхідний роз'єм низьковольтного блока установки; Е – внутрішній екран низьковольтного блока установки; L₁ – компенсуюча котушка; L₂ – котушка низьковольтної частини фільтру; SA1 – перемикач компенсуючої котушки; SA2 – перемикач; SA3 – перемикач; SA4 – перемикач; SA5 – перемикач; R₁, R₂ – подільник напруги; Р₂ – вихідний роз'єм низьковольтного блока установки; Р₃ – допоміжний роз'єм; ХТ2 – з'єднувальний коаксіальний кабель; SMV-11 – селективний мікровольтметр, 9 кГц – 30 МГц; R_м – вхідний опір SMV-11 (R_м = 50 Ом).

Живлення установки відбувається за допомогою високовольтного трансформатора типу РЕОІ 100/200 А, який має низьковольтну, високовольтну та вимірювальну обмотку, коефіцієнт трансформації за напругою якої становить 0,4 кВ / 1 В. Струмопровід, який під'єднаний до високовольтної обмотки трансформатора, проходить скрізь верхній отвір комірки огороження установки та приєднується до високовольтної частини фільтру.

5.1 **Високовольтна частина фільтру** складається з котушки, індуктивність якої розраховується з умови резонансу ($\omega L_b = \frac{1}{\omega C_E}$, $\omega = 2\pi f$, де f – розрахункова частота, яка дорівнює 0,5 та 1 МГц), та електростатичних екранів, ємність між якими вираховується за допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics і становить $C_E = 11,17$ пФ. Для режиму установки 0,5 МГц індуктивність котушки високовольтної частини фільтру складає $L_b = 9,1$ мГн. Для режиму установки 1 МГц індуктивність котушки високовольтної частини фільтру складає $L_b = 2,3$ мГн.

До виходу котушки приєднано високовольтний струмопровід, яким забезпечується подання напруги на вхід високовольтного конденсатора зв'язку, а з нього на об'єкт випробування – ізолятор.

5.2 **Високовольтний конденсатор зв'язку** виконаний у вигляді двохелектродної конструкції з високовольтною ізоляцією між електродами, що забезпечується відповідним шаром трансформаторного масла Т-1500. Максимальна робоча напруга конденсатора – 45 кВ.

З'єднання високовольтного конденсатора зв'язку з вхідним роз'ємом Р₁ блока низьковольтної частини установки здійснюється за допомогою з'єднувального проводу ХТ1.

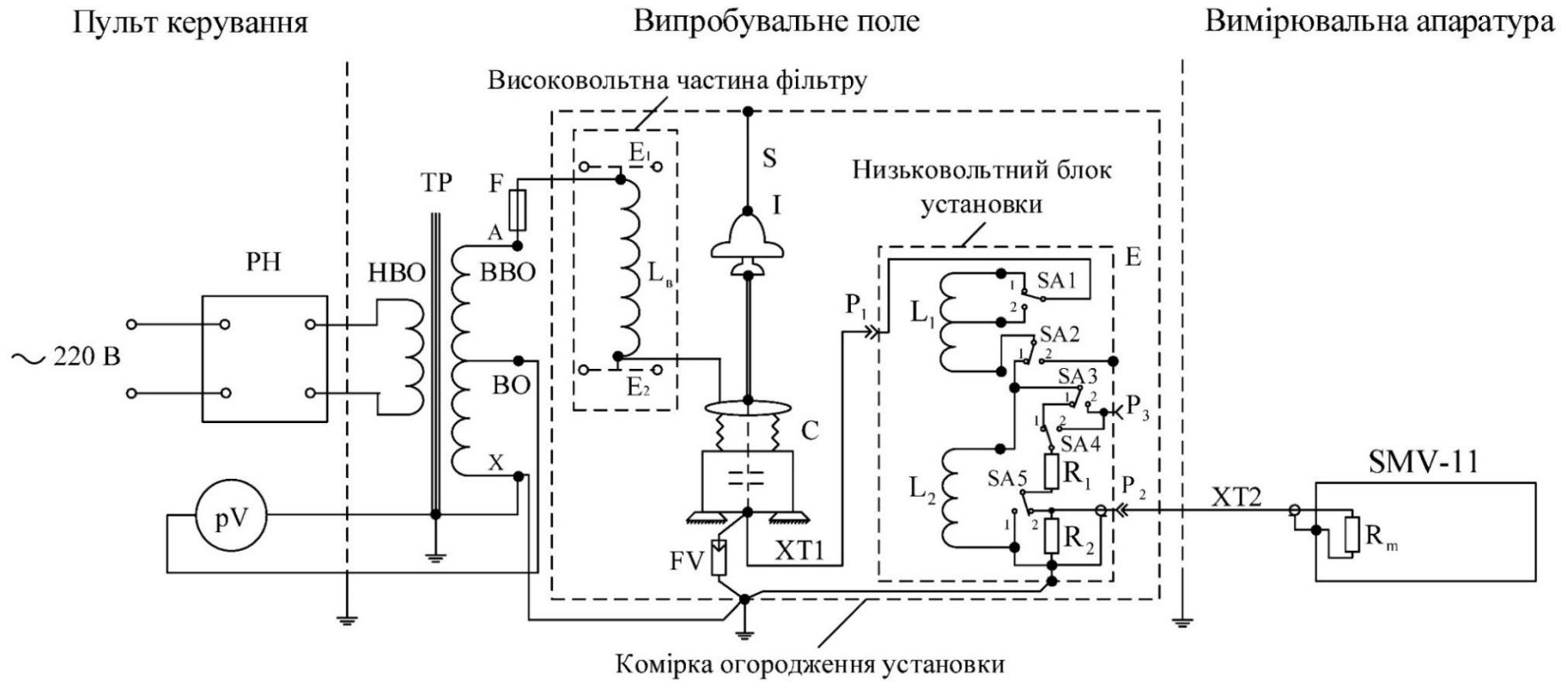


Рис. 1 Схема установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад

5.3 Низьковольтний блок установки, який вмонтовано в екран Е, містить:

1. Компенсуючу котушку з відводами для вибору вимірювальних частот (0,5 та 1,0 МГц), що забезпечується за допомогою перемикача SA1. Індуктивність компенсуючої котушки L_1 обирається за умови резонансу для зазначених частот та ємності високовольтного конденсатора зв'язку С і становить $L_1=0,25$ мГн (для режиму 0,5 МГц) та $L_1=0,08$ мГн (для режиму 1 МГц).

2. Котушку низьковольтної частини фільтру, яка під'єднана паралельно подільнику напруги R_1/R_2 , з номінальним значенням індуктивності 1,2 мГн.

3. Подільник напруги R_1/R_2 , значення опорів якого становить 271/50 Ом, а з урахуванням вхідного опору SMV-11 50 Ом – складає 271/25 Ом.

5.4 Вимірювання напруги радіо завод (в децибелах по відношенню до 1 мкВ – V_m) здійснюються за допомогою селективного мікровольметра SMV-11, який приєднано до вихідного роз'єму низьковольтного блока установки P_2 за допомогою з'єднувального коаксіального кабелю ХТ2 з хвильовим опором 50 Ом (довжиною 10 м).

6 Вимоги безпеки

6.1 При проведенні випробувань з використанням установки необхідно виконувати вимоги ГОСТ 26196 «Изоляторы. Метод измерения промышленных радиопомех», МЭК 60437 «Radio interference test on high-voltage insulators», СИСРР 18-2 «Методические указания. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от воздушных линий электропередачи и высоковольтного оборудования. Методы измерения и процедура установления норм», вимоги діючих нормативних документів «Правила улаштування електроустановок», «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

6.2 Під час виконання робіт повинні виконуватись вимоги інструкцій по роботі з електровимірювальними приладами та апаратами.

6.3 Під час виконання робіт з подачею високої напруги забороняється вхід на випробувальне поле до установки, доторкання до комірочки огороження установки. При виконанні підготовчих робіт дозволяється робота з установкою при відключенні високовольтного джерела живлення та закороченні його виходу переносним заземлювачем.

6.4 Персонал, який виконує вимірювання на установці, повинен бути затверджений наказом керівника, в підпорядкуванні якого знаходиться дана установка.

6.5 Забороняється використання установки по схемам, не передбаченим керівництвом з експлуатації.

6.6 Крім виконання вказаних вище умов безпеки та правил, при випробуванні необхідно дотримуватись додаткових заходів безпеки: виконання робіт повинно проводитись бригадою у складі 2-х чоловік – керівник робіт із групою ІV, член бригади із групою ІІІ.

6.7 Всі дії обслуговуючого персоналу установки повинні доповнюватись заходами безпеки відповідно до діючих нормативних документів за п. 6.1 та кваліфікації персоналу.

6.8 Відповідальність за порушення вимог безпеки при експлуатації установки згідно з даним керівництвом з експлуатації та діючих нормативних документів за п. 6.1 несе керівник установки.

7 Підготовка до роботи

7.1 УВАГА! Вихідне (початкове) положення:

7.1.1 Виводи А; Х високовольтної обмотки високовольтного трансформатора живлення установки повинні бути закорочені провідником, який постійно зберігає своє положення, в тому числі при збиранні схем атестації. Від'єднання цього провідника з виводу А виконують лише після накладення переносного заземлювача на нього.

7.1.2 Початкове положення пульта керування та засобів установки:

7.1.2.1 Регулятор напруги високовольтного трансформатора поставити в нульове положення.

7.1.2.2 Випробувальне поле установки повинно бути очищеним від пилу (наприклад, за допомогою пилососу), ізолюючі поверхні обладнання – очищені серветкою з безворсової тканини, змоченою у технічному спирті.

7.1.2.3 Розташування обладнання на випробувальному полі повинно відповідати рис. 1.

7.2 Встановити випробуваний ізолятор, приєднавши його до монтажного стрижня S.

7.3 Перед початком роботи керівник роботи контролює обладнання установки, визначає схему з'єднань, порядок розміщення обладнання, яке буде використовуватись при проведенні випробування, визначає межі робочого місця, перевіряє наявність знаків безпеки, їх розташування та підготовленість високовольтного трансформатора живлення до приєднання до установки.

7.4 Підключити заземлення випробувального поля до заземлюючого пристрою установки.

7.5 Підготувати з'єднувальні кабелі та підключити їх до відповідних роз'ємів установки.

8 Порядок роботи

8.1 Виконати операції за п.п. 7.1...7.5.

8.2 Зібрати електричну схему за рис. 1.

8.3 Перевірити цілісність комірки випробувального поля, вивісити на її огороженні плакат „Стой! Висока напруга”, доручити спостереження за нею члену бригади з групою III.

8.4 Встановити необхідне положення перемикача SA1 для вибору необхідної частоти «0,5 МГц» або «1,0 МГц».

8.5 Встановити перемикач SA2 в положення 1, SA3 в положення 1, SA4 в положення 1, SA5 в положення 2.

8.6 Встановити на селективному мікровольтметрі SMV-11 необхідні діапазони вимірювання по напрузі та частоті.

8.7 Встановити регулятор напруги пульта керування в нульове положення.

8.8 Увімкнути тумблер пульта керування у положення „ввімкнено”.

8.9 Натиснути кнопку „Пуск” пульта керування, при цьому спрацьовує магнітний пускач і висока напруга з високовольтної обмотки трансформатора живлення поступає в схему на випробувальний об'єкт – ізолятор.

8.10 Плавна повертаючи регулятор напруги пульта керування та контролюючи високу напругу за показом вольтметра рV встановити випробувальну напругу на 10% більше максимального нормованого значення напруги ізолятора і витримувати її не менш 5 хв.

8.11 Далі дискретними ступенями напруга повинна бути зменшена до значення, рівного 30% максимального нормованого значення напруги ізолятора.

8.12 Потім напруга повинна бути збільшена до початкового значення за п. 8.10 (також ступенями), та витримана протягом 1 хв і остаточно зменшена (ступенями) до значення, рівного 30% максимального нормованого значення напруги ізолятора.

8.13 Кожна ступінь зміни напруги повинна приблизно становити 10% від максимального нормованого значення напруги ізолятора.

8.14 На кожній ступені необхідно фіксувати рівень радіозавад V_m за допомогою селективного мікровольтметра SMV-11 та результати, отримані під час цього циклу зниження напруги, повинні бути представлені графічно функцією від прикладеної напруги. Відповідність результатів вимірювання нормам визначають статистичним методом, наведеним у ГОСТ 16842 (за п. 6.2.1).

Рівень радіозавад V в дБ/мкВ/300 Ом ізолятора обчислюють за формулою:

$$V = V_m + K + A,$$

де V_m – напруга, що фіксується вимірювальним приладом SMV-11 при подачі на ізолятор випробувальної напруги (за схемою рис. 1 керівництва з експлуатації установки), K та A – параметри установки, які визначені Державним підприємством «Укрметртестстандарт» при її атестації.

8.15 Після виконання вимірювань необхідно максимально знизити вихідну напругу трансформатора живлення регулятором пульта керування та натиснути кнопку „Стоп”.

8.16 Керівник робіт з групою IV повинен перевірити за допомогою покажчика напруги відсутність високої напруги на схемі та приєднати за допомогою ізолюючої штанги та діелектричних рукавичок переносний заземлювач до виводу А високовольтного трансформатора, після чого приєднати закоротку X→А до виводу А трансформатора живлення і розібрати схему.

9 Технічне обслуговування

9.1 При технічному обслуговуванні комірка огороження установки повинна бути очищеною від пилу (наприклад, за допомогою пилососу), ізолюючі поверхні обладнання – очищені серветкою з безворсової тканини, змоченою у технічному спирті.

9.2 Перед кожним випробуванням проводиться огляд з'єднувальних провідників, при якому увага звертається на наявність маркування, цілість ізолювального покриття, надійність з'єднання провідників зі з'єднувальними пристроями, клемми, затискачами і т.п., відсутність слідів мастила, пилу, бруду на всіх поверхнях приладів, обладнання, з'єднувальних провідників. При необхідності ці поверхні знежирюються технічним спиртом.

9.3 Засоби вимірювальної техніки, що входять до складу установки, вольтметр рV та селективний мікровольтметр SMV-11 повинні проходити перевірку у відповідності до діючих нормативних документів.

9.4 Особливу увагу слід звертати на чистоту ізоляторів, в разі виявлення бруду чи пилу його необхідно видалити шляхом протирання серветкою за п. 9.1.

9.5 При появі на контактах високовольтного конденсатора зв'язку окислу чи бруду – зачистити їх наждачною бумагою з зерном не більше 100 мікрон до появи металевого блиску та очистити серветкою за п. 9.1.

10 Вказівки з атестації установки

Атестація установки проводиться у відповідності до Програми та методики атестації «Установка для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад. Програма і методика атестації» Державного підприємства «Укрметртестстандарт».

11 Характерні несправності та методи їх усунення

11.1 При відмові установки в роботі (в тому числі під час дії гарантійних зобов'язань) споживач протягом 3 днів повинен повідомити виробнику установки такі відомості:

- дату введення установки в експлуатацію;
- дату і обставини виявлення несправності;
- сутність виявленої несправності.

11.2 Всі рекламації, їх стислий зміст, заходи по усуненню несправностей, реєструвати в робочому журналі установки.

11.3 Ремонт установки виконується лише виробником.

11.4 Характерні несправності та методи їх усунення наведені в таблиці.

Найменування несправностей	Зовнішні ознаки та додаткові ознаки	Можлива причина	Метод усунення
При підключенні до мережі відсутня напруга	Відсутні показання щитових вольтметрів на пульті керування	Відсутня напруга мережі	Перевірити наявність напруги
Не працює селективний мікровольтметр SMV-11	Не балансується показання SMV-11	Перегорання запобіжника SMV-11	Замінити запобіжник приладу SMV-11

12 Гарантії виробника

12.1 Гарантійний термін експлуатації – 2 роки з дня введення установки в експлуатацію (окрім гарантії на прилад SMV-11 – 12 місяців).

12.2 Виробник на протязі гарантійного терміну безкоштовно усуває дефекти пристроїв власного виробництва при умові дотримання користувачем Керівництва з експлуатації та доставки виробнику дефектних пристроїв (або установки).

12.3 Гарантії на придбані комплектуючі пристрої та прилади – згідно паспортів на ці вироби при умові збереження на них пломб і дотримання вимог з правил їх експлуатації.

ДОДАТОК Е. Свідоцтво про калібрування установки для випробування ізоляторів на допустимий рівень електромагнітних завод



Державне підприємство
**“Всеукраїнський державний науково-виробничий
 центр стандартизації, метрології, сертифікації
 та захисту прав споживачів”
 (ДП “УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ”)**

State Enterprise
**“All-Ukrainian State Research and Production Center for Standardization,
 Metrology, Certification and Consumer's Rights Protection”
 (SE “UKRMETRTESTSTANDART”)**

СВІДОЦТВО ПРО КАЛІБРУВАННЯ Calibration Certificate

Рестраційний №: UA/29/29-1113/000951 **Дата калібрування:** 30.09.2019
Reference number: Date of calibration:

Об'єкт калібрування: Установка для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавод (електромагнітних завод)
Object:

Виробник: Корпорація "Науковий парк "Київська політехніка"
Manufacturer:

Тип:
Type:

Заводський/серійний номер: 1
Serial number:

Назва та адреса замовника: ТЗОВ "ЛЬВІВСЬКА ІЗОЛЯТОРНА КОМПАНІЯ", 79066, м. Львів, Львівська обл., вул. Зелена, 301
The name and address of the customer:

Місце калібрування: ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ", відділ № 29, вул. Метрологічна, 4, м. Київ, 03143
Place of calibration:

Кількість сторінок свідоцтва: 5
Number of pages of the certificate:

Рекомендований міжкалібрувальний інтервал: 36 місяців
Recommended calibration interval:

Директор інституту № 3
Director of institute



Начальник відділу № 29
Head of department

підпис/signature

О.М. Величко
 Ініціали, прізвище/name

підпис/signature

Ю.Л. Анохін
 Ініціали, прізвище/name

B05-3.5ПР-III-UR-3.0

Всі вимірювання мають простежуваність до одиниць Міжнародної системи SI, які відтворюються національними еталонами НМІ.
 Дане свідоцтво про калібрування може бути відтворене тільки повністю. Будь-яка публікація або часткове відтворення змісту свідоцтва можливе лише з письмової згоди НМІ, що видав свідоцтво. Свідоцтво про калібрування без підписів і печатки не дійсне.

All measurements are traceable to the SI units which are realized by national measurement standards of NMI.
 This certificate shall not be reproduced, except in full. Any publication extracts from the calibration certificate requires written approval of the issuing NMI.
 Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Адреса ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ": 4, ул. Метрологічна, Київ, 03143, Україна
 Address SE "UKRMETRTESTSTANDART": 4, Metrologichna st., Kyiv, 03143, Ukraine
 Телефон/Phone: +38 (044) 526-52-29, факс/fax: +38 (044) 526-42-60, е-пошта/e-mail: ukrscm@ukrcsm.kiev.ua, веб-сайт/website: www.ukrcsm.kiev.ua

ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"

SE "UKRMETRTESTSTANDART"

Свідоцтво про калібрування

Calibration Certificate

Реєстраційний №

Reference number

UA/29/291113/000951

Сторінка

Page

2

Свідоцтво про уповноваження ПК 001-2014 від 24.02.2014 р.
Accreditation certificate ПК 001-2014 from 24.02.2014**1 Метод калібрування**

Calibration method

Метод безпосереднього вимірювання згідно МК 081/29.138-2019 " Установа для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад (електромагнітних завад). Методика калібрування".

2 Короткий опис об'єкту, що калібрується

Description of object

Вихідна випробувальна напруга/

від 10 кВ до 45 кВ

Output test voltage

Частота вимірювання/

(0,5 ± 0,05) МГц, (1 ± 0,1) МГц

Measurement frequency

Повний опір високовольтної частини фільтру/

> 100 кОм

Impedance of the high voltage part of the filter

3 Умови проведення калібрування

Conditions of calibration

- температура навколишнього середовища/temperature 19,6 °C
- відносна вологість навколишнього середовища/humidity 49 %
- атмосферний тиск/atmospheric pressure 99,4 кПа
- напруга живлення/voltage 225 В
- частота мережі/ frequency 50,0 Гц
- коефіцієнт несинусоїдальності напруги/coefficient of harmonic distortion 1,4 %

4 Калібрування проведено за допомогою

Calibration was made with

4.1 Еталони

Standards

Назва Name	Вимірювальна система високої напруги постійного та змінного струмів
Тип, виробник Type, manufacturer	ВСВН-1-100, ТОВ "ІнтелТех"
Серійний номер Serial number	02/1996-03
Номер свідоцтва про калібрування Calibration certificate number	UA/29/181002/000775
Дата калібрування Calibration date	02.10.2018
Простежуваність до еталону Traceability to standard	Ідентифікатор сервіса НМІ: UkrCSM/7; UkrCSM/10

Назва	Вимірювач радіозавад
-------	----------------------

B05-3.5ПР-III-U-3.0

ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"

SE "UKRMETRTESTSTANDART"

Свідоцтво про калібрування

Calibration Certificate

Реєстраційний №

Reference number

UA/29/19/11/13/000951

Сторінка

Page

3

<i>Name</i>	
Тип, виробник <i>Type, manufacturer</i>	SMV-11, завод RTF, Німеччина
Серійний номер <i>Serial number</i>	90776
Номер свідоцтва <i>Calibration certificate number</i>	26-02-1071
Дата калібрування <i>Calibration date</i>	21.06.2019
Простежуваність до еталону <i>Traceability to standard</i>	Ідентифікатор сервіса HMI: UkrCSM/5

4.2 Допоміжне устаткування

Auxiliary facilities

Назва <i>Name</i>	Вимірювач параметрів повітря
Тип, виробник <i>Type, manufacturer</i>	"Атмосфера-1", ДП "Укрметртестстандарт"
Серійний номер <i>Serial number</i>	512
Номер свідоцтва про калібрування/перевірку <i>Calibration/verification certificate number</i>	UA/36/181228/4517
Дата калібрування/перевірки <i>Calibration/verification date</i>	28.12.2018
Основні параметри <i>Main parameters</i>	Діапазон вимірювання відносної вологості – від 10 до 90 % з діапазоном вимірювання температури від 5 до 40 °С; границі допустимої похибки при вимірюванні відносної вологості – $\pm 3\%$; границі допустимої похибки при вимірюванні температури – $\pm 0,5\text{ °С}$; діапазон вимірювання атмосферного тиску – від 65 до 110 кПа; границі допустимої похибки при вимірюванні атмосферного тиску – $\pm 1\text{ кПа}$

ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"

SE "UKRMETRTESTSTANDART"

Свідоцтво про калібрування
Calibration CertificateРеєстраційний №
Reference number

UA/29/1911/3/000951

Сторінка
Page

4

Назва Name	Мультиметр
Тип, виробник Type, manufacturer	DM 3559, All-Bright Technology Co. Ltd
Серійний номер Serial number	P011989
Номер свідоцтва про калібрування/перевірку Calibration/verification certificate number	UA/29/181228/000922
Дата калібрування/перевірки Calibration/verification date	26.12.2018
Основні параметри Main parameters	Діапазон вимірювання напруги – від 0,01 до 1000 В. Границі допустимої відносної похибки – $\pm 1\%$

5 Результати калібрування та невизначеність вимірювань

Calibration results and uncertainty of measurement

5.1 Повний опір кола зв'язку:

Положення перемикачів для частоти/Switch position for frequency, МГц/MHz	Середнє значення повного опору/ The average value of impedance, Ом/ Ω	Розширена невизначеність/ The expanded uncertainty, %
0,5	308,2	2
1	318,4	2

5.2 Кут між напругою та струмом кола зв'язку:

Положення перемикачів для частоти/Switch position for frequency, МГц/MHz	Середнє значення кута / The average value of angle, %	Розширена невизначеність/ The expanded uncertainty, %
0,5	0,37 °	2
1	13,2 °	2

5.3 Масштабний коефіцієнт кола зв'язку К+А

Частота/ Frequency, МГц/MHz	Середнє значення К+А / The average value of K+A, дБ/ dB	Розширена невизначеність/ The expanded uncertainty, дБ/ dB
0,5	24,0	1,7
1	22,5	1,7

ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ"

SE "UKRMETRTTESTSTANDART"

Свідоцтво про калібрування
Calibration CertificateРеєстраційний №
Reference number

UA/29/191113/000951

Сторінка
Page

5

5.4 Рівень зовнішніх радіозавад (фону установки)

Випробувальна напруга/ output test voltage, кВ/kV	Рівень зовнішніх радіозавад (фону установки)/ external radio interference level (installation background) дБ/ dB	
	при частоті/ for frequency $f = 0,5$ МГц	при частоті/ for frequency $f = 1$ МГц
10	20,0	23,8
15	20,0	23,8
20	20,0	23,8
25	20,2	23,8
30	20,2	23,8
35	21,4	23,8
40	23,8	23,8

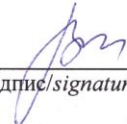
Розширена невизначеність 1,7 дБ

Розширена невизначеність отримана шляхом множення сумарної стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення $k = 2$, що визначає інтервал, з рівнем довіри, який приблизно дорівнює 95 % при допустимому нормальному розподілі. Оцінювання невизначеності проведено у відповідності з «Настановою GUM щодо виразу невизначеності вимірювань» (ISO GUM).

The expanded uncertainty is obtained by multiplying the combined standard uncertainty by a coverage factor $k = 2$ that produces an interval having level of confidence is approximately equal 95 percent assuming a normal distribution. The evaluation of uncertainty is conducting according to "ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement" (GUM).

Старший науковий співробітник

Senior Researcher


підпис/signature

В.В. Ісаєв

Ініціали, прізвище/name

ДОДАТОК Ж. Патент України на винахід «Високочастотний
загороджувач»



(11) **115475**(19) **UA**(51) МПК
H04B 3/56 (2006.01)

<p>(21) Номер заявки: а 2015 10741</p> <p>(22) Дата подання заявки: 04.11.2015</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.11.2017</p> <p>(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня: 11.04.2016, Бюл. № 7</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 10.11.2017, Бюл. № 21</p>	<p>(72) Винахідники: Бржезицький Володимир Олександрович, UA, Гаран Ярослав Олександрович, UA, Лапоша Микола Юрійович, UA</p> <p>(73) Власник: НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056, UA</p>
--	---

(54) Назва винаходу:

ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ЗАГОРОДЖУВАЧ

(57) Формула винаходу:

1. Високочастотний загороджувач, що містить котушку індуктивності, який **відрізняється** тим, що додатково містить просторові електроди, що охоплюють котушку індуктивності та з'єднуючі діелектричні кільця кріплення, розташовані на торцях котушки індуктивності, яка виконана у вигляді соленоїда з профільованим діелектричним каркасом.

2. Високочастотний загороджувач за п. 1, який **відрізняється** тим, що просторові електроди разом з профільованим діелектричним каркасом котушки індуктивності утворюють ємність високочастотного загороджувача.

(11) **115475**

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 0804061117.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.
2. Виконати пошук за номером заявки.
3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту



І.Є. Матусевич

10.11.2017



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **115475** (13) **C2**
(51) МПК
H04B 3/56 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: **а 2015 10741**
(22) Дата подання заявки: **04.11.2015**
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **10.11.2017**
(41) Публікація відомостей про заяву: **11.04.2016, Бюл.№ 7**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.11.2017, Бюл.№ 21**

(72) Винахідник(и):
**Бржезицький Володимир
Олександрович (UA),
Гаран Ярослав Олександрович (UA),
Лапоша Микола Юрійович (UA)**
(73) Власник(и):
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КІЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ",
пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)**
(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
SU 1119182 A, 15.10.1984
SU 555549, 25.04.1977
US 3603901, 07.09.1971
US 3504310, 31.03.1970
CA 2804459 A1, 21.07.2014
US 1913532, 13.06.1933
WO 2012/028342 A1, 08.03.2012
FR 842293 A, 06.08.1939
DE 722613 C, 14.07.1942
US 2515984 A, 18.07.1950

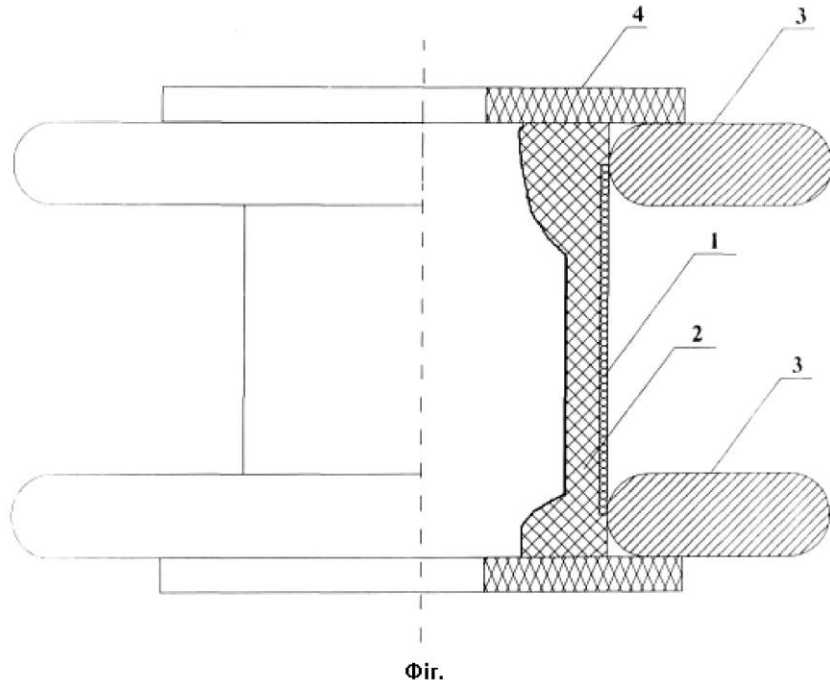
(54) ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ЗАГОРОДЖУВАЧ

(57) Реферат:

Винахід належить до галузі електротехніки, а саме до високочастотних загороджувачів, та може бути використаний в електричних мережах для передавання сигналів високих частот та в установках для вимірювання рівня радіозавад високовольтних ізоляторів. Високочастотний загороджувач містить котушку індуктивності, додатково містить просторові електроди та з'єднуючі діелектричні кільця кріплення, а котушка індуктивності виконана у вигляді соленоїда з профільованим діелектричним каркасом. Технічним результатом винаходу є збільшення коефіцієнта вибірковості та розширення частотного діапазону.

UA 115475 C2

UA 115475 C2



UA 115475 C2

Винахід належить до галузі електротехніки, а саме до високочастотних загороджувачів, та може бути використаний в електричних мережах для передавання сигналів високих частот та в установках для вимірювання рівня радіозавад високовольтних ізоляторів.

5 Відомий "Високочастотний загороджувач", що містить елемент настройки з розрядником і реактор із силовою обмоткою у вигляді спіралі із електропровідної стрічки, витки якої зв'язані через ізолюючі рейки з елементом настройки, між витками обмотки реактора розміщена стрічка з діелектричного матеріалу [1].

Недоліками відомого високочастотного загороджувача є те, що в реакторі електричний струм зміщення нейтралізує індуктивну складову струму, а в елементі настройки індуктивна 10 складова струму змінює ємнісну складову струму.

Найбільш близьким до запропонованого винаходу є "Високочастотний загороджувач", що містить силову котушку індуктивності, включену в розрив високовольтної лінії електропередачі, до кінця обмотки якої підключений один вивід елемента настройки, додаткову котушку індуктивності, витки обмотки якої розташовані між витками обмотки силовій котушки індуктивності. Додаткова котушка індуктивності індуктивно пов'язана з силовою котушкою індуктивності, причому початки обмоток силовій та додаткової котушок індуктивності об'єднані, а кінець обмотки додаткової котушки індуктивності підключений до іншого виводу елемента 15 настройки [2].

Недоліками високочастотного загороджувача є те, що розподілення електричного потенціалу в силовій котушці індуктивності не співпадає з розподіленням індукваного потенціалу магнітним полем котушки, в результаті чого ємнісні розподілені струми в силовій котушці індуктивності нейтралізують індуктивну складову струмів, що призводить до зменшення коефіцієнта вибіркості та до значних витрат матеріалів при виготовленні високочастотного загороджувача.

25 В основу винаходу поставлено задачу удосконалення конструкції високочастотного загороджувача, збільшення коефіцієнта вибіркості та розширення його частотного діапазону, шляхом встановлення просторових електродів та виконання котушки індуктивності у вигляді соленоїда з профільованим діелектричним каркасом.

Поставлена задача вирішується тим, що високочастотний загороджувач, що містить котушку індуктивності, згідно з запропонованим винаходом новим є те, що додатково містить просторові електроди та з'єднуючі діелектричні кільця кріплення, а котушка індуктивності виконана у вигляді соленоїда з профільованим діелектричним каркасом.

30 Крім того, просторові електроди разом з профільованим діелектричним каркасом котушки індуктивності утворюють ємність високочастотного загороджувача. Причому профілювання діелектричного каркаса котушки індуктивності та просторові електроди виконані таким чином, що розподілення електричного потенціалу в котушці співпадає з розподіленням індукваного потенціалу магнітним полем котушки. Таким чином, забезпечується незалежна робота електричної та магнітної складових котушки індуктивності в будь-якому діапазоні частот.

40 Суть винаходу, що пропонується, пояснюється кресленням, де зображено високочастотний загороджувач.

Високочастотний загороджувач містить котушку індуктивності 1 з профільованим діелектричним каркасом 2, просторові електроди 3, з'єднуючі діелектричні кільця кріплення 4.

Високочастотний загороджувач працює наступним чином.

45 Високочастотні сигнали надходять на котушку індуктивності 1, що з'єднана з просторовими електродами 3, які разом з профільованим діелектричним каркасом 2 утворюють ємність високочастотного загороджувача. При цьому ємність загороджувача та індуктивність котушки утворюють паралельний резонансний контур, який забезпечить максимальне значення його прохідного комплексного опору на частоті загородження та збільшить коефіцієнт вибіркості високочастотного загороджувача.

50 При наявності просторових електродів та профілювання діелектричного каркаса котушки індуктивності, розподілення електричного потенціалу в котушці співпадає з розподіленням індукваного потенціалу магнітним полем котушки, при цьому ємнісні та індуктивні струми протікають незалежно один від одного, що розширить частотний діапазон високочастотного загороджувача.

55 Джерела інформації:

1. Авторське свідоцтво СССР № 555549, "Высокочастотный заградитель", МПК H04B3/54, опублік. 25.07.1977.

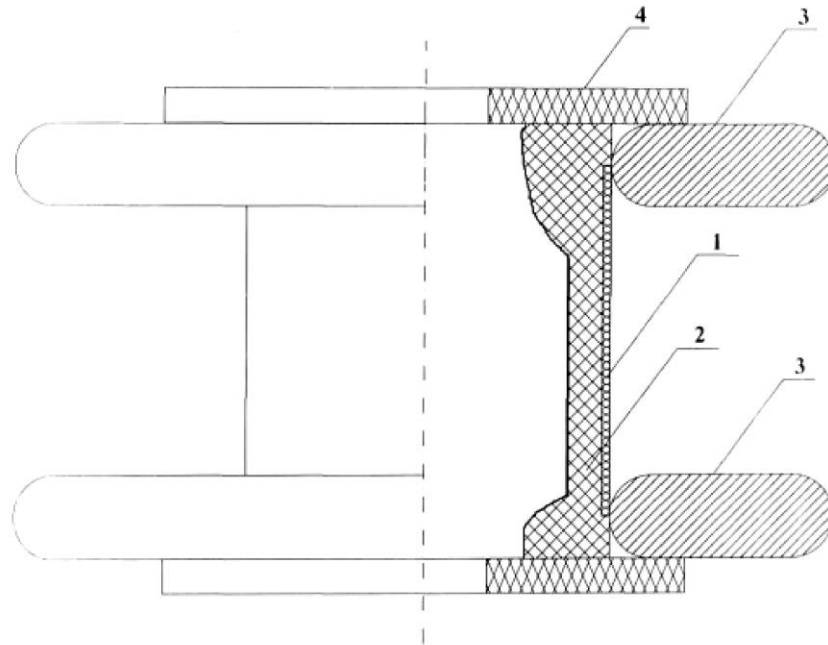
2. Авторське свідоцтво СССР № 1119182, "Высокочастотный заградитель", МПК H04B3/54, опублік. 15.10.1984.

60

UA 115475 C2

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Високочастотний загороджувач, що містить котушку індуктивності, який **відрізняється** тим, що додатково містить просторові електроди, що охоплюють котушку індуктивності та з'єднуючі діелектричні кільця кріплення, розташовані на торцях котушки індуктивності, яка виконана у вигляді соленоїда з профільованим діелектричним каркасом.
2. Високочастотний загороджувач за п. 1, який **відрізняється** тим, що просторові електроди разом з профільованим діелектричним каркасом котушки індуктивності утворюють ємність високочастотного загороджувача.



Комп'ютерна верстка А. Крулевський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601