

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

**СЕРЕДІН АНДРІЙ ПАВЛОВИЧ**

УДК 621.314.228:534](043.3)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ВТРАТ В  
ДРОСЕЛЯХ З ОДНОШАРОВОЮ ОБМОТКОЮ**

172 Телекомунікації та радіотехніка

17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії.

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

\_\_\_\_\_ А.П. Середін

Науковий керівник: Мовчанюк Андрій Валерійович, кандидат технічних наук,  
доцент

Київ – 2023

## АНОТАЦІЯ

**Середін А.П. Удосконалення методики оцінки втрат в дроселях з одношаровою обмоткою.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної науково-практичної задачі підвищення енергетичної ефективності силових індуктивних елементів з одношаровими обмотками без осердя в ультразвуковому діапазоні частот шляхом підвищення точності та коректності розрахунків величини втрат в їх обмотках за відомими аналітичними методиками. Останнє досягнуто шляхом емпіричного уточнення розрахункових виразів методик введенням ряду геометричних параметрів, знехтуваних у початкових виразах, та розрахунком коефіцієнтів для найбільш застосовуваних випадків в інженерно-конструкторській практиці (робочих частот, діаметрів провідників, типорозмірів каркасів, кількості витків обмотки).

Зміст дисертаційного дослідження викладено у чотирьох розділах, у кожному з яких представлено та пояснено основні результати дослідження:

У *вступі* виконано обґрунтування актуальності обраної теми дисертаційної роботи: визначено роль силових індуктивних елементів у сучасних РЕА, розглянуто особливості їх роботи у різних частотних діапазонах, виділено силові індуктивні елементи, що працюють у діапазоні ультразвукових частот, пояснено, чому стандартні методи боротьби з впливом частотних ефектів, які успішно використовуються в інших частотних діапазонах, в даному випадку малоефективні або недоцільні. Виходячи з цього визначено, що пошук шляхів мінімізації величини втрат в обмотках силових індуктивних елементах є актуальним завданням. Визначено два основні шляхи мінімізації втрат в даних

індуктивних елементах – шляхом оптимізації конструкції обмотки індуктивного елемента або шляхом підвищення точності теоретичного розрахунку за відомим методиками. Обґрунтовано вибір останнього способу. Розглянуто особливості роботи силових індуктивних елементах у складі узгоджуючих фільтрів ультразвукового технологічного обладнання, підкреслено важливість коректного розрахунку величини втрат дроселів фільтрів. Виходячи з цього сформульовано мету та визначено завдання дослідження, виконано опис методологічного апарату, надано інформацію про наукову та практичну новизну роботи, апробацію основних результатів дослідження на науково-практичних конференціях та їх публікацію у формі статей у фахових виданнях.

У *першому розділі* на основі розгляду наукових джерел виконано системний підхід до аналізу факторів, що впливають на величину втрат індуктивних елементів (втрати в осерді, втрати в діелектрику, втрати у провіднику обмотки). Проаналізовано кожен із них. Визначено, що в ультразвуковому діапазоні частот найбільший вплив матимуть втрати у провіднику обмотки. Детально розглянуто складові втрат у провіднику з представленням відповідних пояснень механізму виникнення кожного з вказаних частотних ефектів. Розглянуто та проаналізовано поширені методики розрахунку індуктивності як одиночного прямого циліндричного провідника, так і одиночного витка, згорнутого з нього. Проаналізовано методики розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів – графо-аналітичні та аналітичні, визначено переваги та недоліки кожної з них, відмічено більшу досконалість та універсальність аналітичних методик. Виконано розгляд поширених аналітичних методик, запропонованих *Dowell* та *Ferreira*. Визначено, що більш нові наукові праці за останні роки тим чи іншим чином базуються на основних результатах вищевказаних методик (як правило, теоретичного характеру без експериментальної перевірки результатів). Обґрунтовано передумови початку дисертаційного дослідження, зазначено, що розрахунок обмоток силових індуктивних елементів узгоджуючих фільтрів

ультразвукових пристроїв за даними методиками дає некоректні результати, що проявлялося у перегріві обмоток, хоча розрахунок накопичувальних дроселів імпульсних джерел живлення у цьому ж частотному діапазоні за вказаними методиками проблем не проявляв. Відповідно, розглянуто особливості роботи індуктивних елементів даного діапазону частот у складі узгоджуючих фільтрів та імпульсних джерел живлення, визначено можливі причини появи некоректних результатів розрахунків у випадку дроселя узгоджуючого фільтра. Виконано аналіз підходу до вирішення задачі та відповідні розрахункові вирази кожної з вказаних методик. Визначено їх основні переваги та недоліки, висунуто припущення, що причиною появи некоректних результатів є нехтування у методиках певними геометричними параметрами обмотки. Для загального ознайомлення розглянуто підхід до аналітичного розрахунку розподілу струму в одиночному круглому витку, запропонованого *В.А. Фоком*. Визначено складність поширення даного підходу до багатовиткової обмотки, що стало причиною відмови від використання аналітичного підходу до розв'язання задачі у даній дисертаційній роботі. Обгрунтовано вибір емпіричного методу з виконанням ряду експериментальних досліджень. Зроблено висновок про необхідність проведення подальших досліджень, зроблено загальні висновки по розділу.

У *другому розділі* дисертації виконано дослідження впливу знехтуваними у методиках геометричних параметрів одношарової обмотки на величину її втрат. Попередньо було обгрунтовано вибір тих чи інших геометричних параметрів індуктивних елементів, виходячи із практичного досвіду, обгрунтовано заміну натурних експериментальних вимірювань на машинні, у середовищі кінцево-елементного аналізу, виконано перевірку адекватності та коректності результатів машинного експерименту. Виконано дослідження впливу діаметра одиночного витка на його величину втрат з поясненням результатів та ілюстрацією явищ, що впливають на розподіл струму у провіднику при його згортанні у виток. Виконано дослідження впливу міжвиткової відстані на величину втрат багатовиткової одношарової обмотки

також з поясненням отриманих результатів. Визначено, що обидва параметри суттєво впливають на розподіл струму та величину втрат, тому нехтувати ними не варто. Досліджено вплив форми поперечного перерізу провідника (квадратного та циліндричного) на розподіл струму у ньому за однакових площ перерізу. Обговорено отримані результати, зроблено відповідні висновки по розділу.

У *третьому розділі* дисертації виконано дослідження впливу кількості витків на одношарову обмотку без осердя та з феромагнітним осердям. Попередньо обгрунтовано організацію експериментальної частини дослідження, де поєднано натурні експериментальні вимірювання з машинними у середовищі кінцево-елементного аналізу. Виконано дослідження впливу кількості витків на величину втрат одношарової обмотки без осердя, результати експериментальних вимірювань порівняно із теоретичними (*Ferreira*). Виконано аналогічне дослідження, але для обмотки із введеним феромагнітним осердям. Досліджено вплив феромагнітного осердя на величину втрат одношарових обмоток індуктивних елементів. Зроблено відповідні висновки по розділу.

У *четвертому розділі* виконано модифікацію розрахункового виразу методики *Ferreira* шляхом внесення у вираз геометричних параметрів одношарової обмотки, упущених у початковому виразі, розраховано відповідні коефіцієнти для найбільш поширених на практиці геометричних параметрів одношарових обмоток (діаметрів каркасів, діаметрів провідників, кількості витків, робочих частот). Попередньо було проведено ряд експериментальних вимірювань для одношарових обмоток без осердя, проаналізовано можливі шляхи внесення в аналітичний вираз методики відповідних геометричних параметрів, визначено ряд залежностей, згідно з якими на основі експериментальних даних побудовано ряд кривих. Визначено вимоги до апроксимуючих функцій, за допомогою спеціалізованих математичних пакетів виконано апроксимацію отриманих кривих, розраховано відповідні коефіцієнти. Здійснено спробу безпосереднього введення у розрахунковий

вираз методики знехтуваних параметрів для кількості витків та діаметра витка у вигляді уточнюючих множників, розраховано відповідні поправочні коефіцієнти. Виконано перевірку точності розрахунку доповненого (модифікованого) виразу відносно початкового виразу та відповідних експериментальних даних. Зроблено відповідні висновки про підвищення точності.

**Наукова новизна отриманих результатів**, отриманих при виконанні дисертаційної роботи, полягає у наступному:

1) Вперше запропоновано метод оцінки величини втрат багатовиткової одношарової обмотки шляхом поєднання машинного моделювання (в середовищі FEM аналізу) та експериментальних вимірювань, що дозволяє оцінити вплив геометрії обмотки на розподіл струму у поперечному перерізі провідника;

2) Удосконалено методику розрахунку величини втрат індуктивних елементів з одношаровими обмотками, шляхом доповнення початкового виразу уточнюючими множниками в яку, на відміну від існуючих методик, включено знехтувані раніше геометричні параметри обмотки.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що:

1) Визначено, що наявні методики розрахунку потребують додаткового дослідження впливу знехтуваних у них геометричних параметрів на розподіл струму у провідниках обмотки (величину їх втрат), з метою подальшого удосконалення виразів методик;

2) Встановлено, що похибка в розрахунках (відносно результатів експериментальних досліджень) лежить в межах від 20.6% до 39.6% (як наслідок нехтування впливом діаметра витка) та від 17.8% до 65.99% (як наслідок нехтування нерівномірністю розподілу струму у витках);

3) Виявлено, що за даних умов дослідження, форма поперечного перерізу провідника (кругла та квадратна) незначним чином впливає на розподіл струму, тому нею можна знехтувати;

4) Визначено, що аналітичну методику розрахунку можливо

використовувати для розрахунку величини втрат  $K_f$  одношарових обмоток індуктивних елементів за умови, що обмотка без осердя, кількість витків становить  $N \geq 30$ , а кінцевий результат розрахунку скориговано на величину відносного відхилення теоретичних та експериментальних даних (до 20.5% залежно від діаметра провідника та частоти для обмотки діаметром  $D_{coil} = 10$  мм (ETD-29));

5) Встановлено, що розрахунок величини втрат одношарових обмоток індуктивних елементів з феромагнітним осердям за аналітичною методикою *Ferreira* проводити не можна, оскільки розходження теоретичних обчислень за даною методикою та експериментальними даними сягає приблизно 1000% (11 разів), оскільки вплив осердя на величину втрат обмотки у даній методиці не враховано;

6) Виявлено, що можливою причиною розходження є вплив зміни конфігурації силових ліній магнітного поля всередині обмотки на розподіл струму у її провідниках при введенні феромагнітного осердя. Втрати в осерді, у даному випадку, майже не впливають на загальну величину втрат обмотки (зміна величини втрат в осерді у 50 разів спричиняє приріст величини втрат обмотки  $K_f$  лише на 3%), тому ними можна знехтувати;

7) Запропоновано ряд уточнень розрахункового виразу методики *Ferreira*, які дозволили врахувати вплив знехтованих у початковому виразі геометричних параметрів. В результаті модифікації розрахункових виразів зменшено розбіжність між експериментальними та теоретичними результатами з 59.5% до 11% (для  $K_f = f(N)$ ) та з 63% до 4% (для  $K_f = f(d/D_{coil})$ ).

Результати наукових досліджень можуть бути використані у практичній інженерно-конструкторській діяльності при розробці та конструюванні силових обмоток індуктивних елементів, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот (особливо дроселів узгоджувачих фільтрів ультразвукового технологічного обладнання) та інших індуктивних елементів, що працюють в даному частотному діапазоні у випадку переважаючої змінної складової струму.

**Ключові слова:** електромагнітне поле, телекомунікації, телекомунікаційна мережа, ультразвукова кавітація, імітаційне моделювання, ультразвукова резонансна система, ультразвукові коливання, імпульсні перетворювачі електроенергії, згладжування пульсацій, потужність втрат, опір втрат, контактне мікрозварювання, SEPIC перетворювач, DC-DC перетворювач, понижувально-підвищувальний перетворювач, AC-DC перетворювач, FEA аналіз, безпроводна передача енергії, перетворювач, мостовий інвертор, система імпульсно-фазового керування, дросель, скін-ефект, ефект близькості, експеримент.



## SUMMARY

**Seredin A. Improvement of the methodology for estimating losses in chokes with a single-layer winding.** - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of PhD in the field of knowledge 17 "Electronics and telecommunications" in the specialty 172 "Telecommunications and radio engineering". - National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and practical problem of increasing the energy efficiency of power inductive elements with single-layer windings without a core in the ultrasonic frequency range by increasing the accuracy and correctness of calculations of the amount of losses in their windings according to known analytical methods. The latter was achieved by empirically refining the calculation expressions of the methods by introducing a number of geometric parameters neglected in the initial expressions and calculating the coefficients for the most used cases in engineering practice (operating frequencies, conductor diameters, frame sizes, number of winding turns).

The content of the dissertation research is presented in four chapters, each of which presents and explains the main results of the research:

In the introduction, the relevance of the chosen topic of the dissertation is justified: the role of power inductive elements in modern radio electronic equipments is defined, the peculiarities of their operation in different frequency ranges are considered, power inductive elements operating in the ultrasonic frequency range are highlighted, it is explained why standard methods of combating the influence of frequency effects, which are successfully used in other frequency ranges, are ineffective or impractical in this case. Based on this, it was determined that the search for ways to minimize losses in the windings of power inductive elements is an urgent task. Two main ways of minimizing losses in these inductive elements have been

determined - by optimizing the design of the winding of the inductive element or by increasing the accuracy of the theoretical calculation using known methods. The choice of the last method is justified. The peculiarities of the operation of power inductive elements in the composition of matching filters of ultrasonic technological equipment are considered, the importance of correct calculation of the amount of losses of filter chokes is emphasized. Based on this, the goal and tasks of the research were formulated, the methodological apparatus was described, information was provided about the scientific and practical novelty of the work, the approval of the main research results at scientific and practical conferences and their publication in the form of articles in specialized publications.

In the first chapter, based on the review of scientific sources, a systematic approach to the analysis of factors affecting the amount of losses of inductive elements (losses in the core, losses in the dielectric, losses in the winding conductor) is performed. Each of them has been analyzed. It was determined that in the ultrasonic frequency range, losses in the winding conductor will have the greatest impact. The components of losses in the conductor are considered in detail, with corresponding explanations of the mechanism of occurrence of each of the specified frequency effects. Common methods of calculating the inductance of both a single straight cylindrical conductor and a single coil wound from it are considered and analyzed. The methods of calculating the amount of losses of windings of inductive elements are analyzed - grapho-analytical and analytical, the advantages and disadvantages of each of them are determined, the greater perfection and universality of analytical methods are noted. Common analytical techniques proposed by Dowell and Ferreira are reviewed. It has been determined that newer scientific works in recent years are based in one way or another on the main results of the above-mentioned methods (as a rule, theoretical in nature without experimental verification of the results). The prerequisites for the beginning of the dissertation research are substantiated, it is stated that the calculation of the windings of the power inductive elements of the matching filters of ultrasonic devices according to these methods gives incorrect results, which was manifested in the overheating of the windings,

although the calculation of the accumulative chokes of pulse power sources in the same frequency range according to the specified methods did not show any problems. Accordingly, the peculiarities of the operation of inductive elements of this frequency range as part of matching filters and pulse power sources are considered, possible reasons for the appearance of incorrect calculation results in the case of a choke of the matching filter are determined. The analysis of the approach to the solution of the problem and the corresponding calculation expressions of each of the specified methods were performed. Their main advantages and disadvantages are identified, the assumption is made that the reason for the appearance of incorrect results is the neglect of certain geometric parameters of the winding in the methods. For a general introduction, the approach to the analytical calculation of the current distribution in a single circular coil, proposed by V.A. Fock. The difficulty of spreading this approach to multi-turn winding was determined, which was the reason for refusing to use the analytical approach to solving the problem in this dissertation work. The choice of an empirical method with a number of experimental studies is justified. A conclusion was drawn on the need for further research, and general conclusions were drawn on the section.

In the second chapter of the dissertation, the study of the influence of the geometric parameters of the single-layer winding neglected in the methods on the value of its losses was carried out. In advance, the choice of certain geometric parameters of inductive elements was justified, based on practical experience, the replacement of natural experimental measurements with machine ones in the environment of finite element analysis was justified, the adequacy and correctness of the results of the machine experiment were checked. A study of the influence of the diameter of a single turn on its loss value was carried out with an explanation of the results and an illustration of the phenomena affecting the current distribution in the conductor when it is wound into a turn. A study of the influence of interturn distance on the loss value of a multi-turn single-layer winding was also carried out with an explanation of the obtained results. It was determined that both parameters significantly affect the current distribution and the amount of losses, so they should

not be neglected. The influence of the cross-sectional shape of the conductor (square and cylindrical) on the distribution of the current in it for the same cross-sectional areas was studied. The obtained results are discussed, relevant conclusions are drawn on the section.

In the third chapter of the dissertation, the influence of the number of turns on a single-layer winding without a core and with a ferromagnetic core was studied. The organization of the experimental part of the research, which combines natural experimental measurements with machine measurements in the environment of finite element analysis, is preliminarily substantiated. The study of the influence of the number of turns on the value of losses of a single-layer winding without a core was carried out, the results of experimental measurements were compared with theoretical ones (Ferreira). A similar study was performed, but for a winding with an introduced ferromagnetic core. The effect of the ferromagnetic core on the loss value of single-layer windings of inductive elements was studied. Appropriate conclusions were drawn on the section.

In the fourth chapter, the calculation expression of the Ferreira method was modified by introducing into the expression the geometric parameters of the single-layer winding omitted in the initial expression, the corresponding coefficients were calculated for the most common geometric parameters of single-layer windings in practice (diameters of frames, diameters of conductors, number of turns, operating frequencies). Previously, a number of experimental measurements were carried out for single-layer windings without a core, possible ways of introducing relevant geometric parameters into the analytical expression of the technique were analyzed, a number of dependencies were determined, according to which a number of curves were constructed on the basis of experimental data. The requirements for the approximating functions were defined, the obtained curves were approximated with the help of specialized mathematical packages, and the corresponding coefficients were calculated. An attempt was made to directly enter neglected parameters for the number of turns and the diameter of the turn into the calculation expression of the method in the form of clarifying factors, and the corresponding correction factors

were calculated. The accuracy of the calculation of the supplemented (modified) expression relative to the initial expression and the corresponding experimental data was checked. Corresponding conclusions about increasing accuracy were made.

**The scientific novelty of the results obtained during the dissertation work is as follows:**

1. For the first time, a method for estimating the loss value of a multi-turn single-layer winding by combining machine modeling (in the environment of FEM analysis) and experimental measurements is proposed, which allows to estimate the influence of the geometry of the winding on the current distribution in the cross section of the conductor;
2. The method of calculating the amount of losses of inductive elements with single-layer windings has been improved, by supplementing the initial expression with clarifying factors, which, unlike the existing methods, includes previously neglected geometric parameters of the winding.

**Practical importance of obtained results is as follows:**

1. It was determined that the existing methods of calculation require additional research into the effect of geometric parameters neglected in them on the distribution of current in the winding conductors (the amount of their losses), in order to further improve the expressions of the methods;
2. It was found that the error in the calculations (relative to the results of experimental studies) ranges from 20.6% to 39.6% (as a result of neglecting the influence of the diameter of the turn) and from 17.8% to 65.99% (as a result of neglecting the unevenness of the current distribution in the turns);
3. It was found that under the given research conditions, the shape of the cross section of the conductor (round and square) has a minor effect on the current distribution;
4. It was determined that the analytical method of calculation can be used to calculate the value of losses  $K_f$  of single-layer windings of inductive elements, provided that the winding is without a core, the number of turns is  $N \geq 30$ ,

and the final result of the calculation is adjusted for the value of the relative deviation of theoretical and experimental data (up to 20.5% depending on the conductor diameter and frequency for a winding with a diameter of  $D_{coil} = 10 \text{ mm}$  (ETD-29));

5. It was established that the calculation of the losses of single-layer windings of inductive elements with a ferromagnetic core according to the Ferreira analytical method cannot be carried out, since the difference between theoretical calculations according to this method and experimental data reaches approximately 1000% (11 times), since the influence of the core on the value of the winding losses in this method not taken into account;

6. It was found that the possible reason for the discrepancy is the influence of the change in the configuration of the magnetic field lines inside the winding on the current distribution in its conductors when a ferromagnetic core is introduced. Core losses, in this case, have almost no effect on the total value of the winding losses (a change in the value of the losses in the core by 50 times causes an increase in the value of the winding losses  $Kf$  by only 3%), so they can be neglected;

7. A number of refinements of the calculation expression of the Ferreira method were proposed, which allowed to take into account the influence of the geometric parameters neglected in the initial expression. As a result of the modification of the calculation expressions, the discrepancy between the experimental and theoretical results was reduced from 59.5% to 11% (for  $Kf = f(N)$ ) and from 63% to 4% (for  $Kf = f(d/D_{coil})$ ).

The results of scientific research can be used in practical engineering and design activities in the development and construction of power windings of inductive elements operating in the ultrasonic frequency range (especially chokes of matching filters of ultrasonic technological equipment) and other inductive elements operating in this frequency range in the case of a prevailing variable current component.

*Key words:* electromagnetic field, telecommunication, telecommunication network, ultrasonic cavitation, simulation modeling, ultrasonic resonance system, ultrasonic oscillations, impulse converters of electricity, smoothing out pulsation, power loss, loss resistance, contact microwelding, SEPIC converter, DC-DC power

converter, buck-boost converter, AC-DC power converter, FEA analysis, wireless power transfer, converter, bridge inverter, pulse-phase control system, choke, skin effect, proximity effect, experiment.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

A.P. Seredin, A.V. Movchaniuk, «Influence of Single Layer Winding Geometry of Inductive Element on Loss Resistance», *Radioelectronics and Communication Systems*, 2022, Vol. 65. No. 10 p.p. 551–561. doi: 10.3103/S073527272301003X (фахове видання категорії А, Scopus, Q3).

### Статті у наукових фахових виданнях України:

А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Вплив кількості витків одношарової обмотки індуктивного елемента на опір втрат», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4, с. 25–32, 2023. doi: 10.31649/1997-9266-2020-169-4-25-32 (фахове видання категорії Б).

### 2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Аналіз методик та модифікація існуючих виразів для розрахунку опору втрат дроселів на ультразвукових частотах», *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2020» (РТПСАС-2020)*, м. Київ, 16-22 листопада 2020 р., с. 52–54 (матеріали конференції);

2. А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, Я.Ф. Карашук, «Аналіз методик розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та кругового витка зі струмом», *X Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2021» (РТПСАС-2021)*, м. Київ, 9-11 листопада 2021 р., с. 108–110 (матеріали конференції);



3. А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Аналіз впливу радіуса витка індуктивного елемента на розподіл струму у провіднику. Кільцевий ефект», *XI Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2022» (РТПСАС-2022)*, м. Київ, 22-24 листопада 2022 р., с.119-121 (матеріали конференції).

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	22
ВСТУП .....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ВЕЛИЧИНИ ВТРАТ ОБМОТОК ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ. ....	33
1.1 Опір обмоток індуктивних елементів змінному струму (опір втрат), його складові вплив на величину втрат обмотки індуктивного елемента.....	33
1.2 Методики розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та витка зі струмом.....	47
1.2.1 Методика розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та її аналіз.....	48
1.2.2 Методики розрахунку індуктивності одиночного круглого витка та їх аналіз.....	49
1.3 Методики розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів. Критичний аналіз.....	52
1.4 Висновок про необхідність проведення подальших експериментів.....	61
1.5 Мета та завдання дослідження.....	62
Висновки до розділу 1.....	63
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА НА ВЕЛИЧИНУ ЇЇ ВТРАТ.....	64
2.1 Визначення мети дослідження.....	64
2.2 Основна частина.....	64

2.2.1 Обґрунтування вибору геометричних параметрів обмотки індуктивного елемента у дослідженні.....	65
2.2.2 Перевірка адекватності машинної моделі обмотки у середовищі кінцево-елементного аналізу.....	69
2.2.3 Дослідження впливу геометрії (діаметра) обмотки на величину втрат.....	72
2.2.4 Дослідження впливу міжвиткової відстані на величину втрат багатовиткової одношарової обмотки.....	76
2.2.5 Вплив форми перерізу провідника на розподіл струму у ньому.....	83
Висновки до розділу 2.....	90
 РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ВИТКІВ ТА ФЕРОМАГНІТНОГО ОСЕРДЯ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА.....	
3.1 Постановка задачі .....	92
3.2 Основна частина.....	93
3.2.1 Обґрунтування організації експериментальних вимірювань. Перевірка достовірності результатів машинного експерименту.....	95
3.2.2 Дослідження впливу кількості витків $N$ одношарової обмотки без осердя на величину втрат $K_f$ .....	97
3.2.3 Дослідження впливу кількості витків $N$ одношарової обмотки з феромагнітним осердям на величину втрат $K_f$ .....	101
3.2.4 Дослідження впливу феромагнітного осердя на величину втрат $K_f$ одношарової багатовиткової обмотки.....	104
Висновки до розділу 3.....	108
 РОЗДІЛ 4. МОДИФІКАЦІЯ ВИРАЗУ АНАЛІТИЧНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВЕЛИЧИНИ ВТРАТ ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА.....	
	110

	20
4.1 Постановка задачі.....	110
4.2 Виконання досліджень. Експериментальна частина .....	111
4.2.1 Аналіз можливих шляхів внесення доповнень у розрахунковий вираз методики.....	112
4.2.2 Модифікація розрахункового виразу. Розрахунок поправочних коефіцієнтів для найбільш поширених параметрів одношарових обмоток без осердя.....	132
4.2.3 Порівняння експериментальних результатів та теоретичних результатів розрахунку за уточненим та початковим виразом.....	141
Висновки до розділу 4.....	144
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	147
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	151
ДОДАТОК Б. ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАШИННОЇ МОДЕЛІ ОБМОТКИ У СЕРЕДОВИЩІ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ. РОЗРАХУНКОВІ ВИРАЗИ, РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....	154
ДОДАТОК В. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ (ДІАМЕТРА) ОБМОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ $K_f$ .....	162
ДОДАТОК Г. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІЖВИТКОВОЇ ВІДСТАНІ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ $K_f$ ОДНОШАРОВОЇ БАГАТОВИТКОВОЇ ОБМОТКИ.....	174

ДОДАТОК Д. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ВІТКІВ ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ БЕЗ ОСЕРДЯ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ  $K_f$ .....184

ДОДАТОК Е. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ВІТКІВ ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ  $K_f$ .....196

ДОДАТОК Є. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВЕЛИЧИНИ ВТРАТ  $K_f$ , ОПОРУ ВТРАТ  $R_{ac}$ , ІНДУКТИВНОСТІ  $L$  ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА БЕЗ ОСЕРДЯ ЗАЛЕЖНО ВІД ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ (КІЛЬКОСТІ ВІТКІВ  $N$ , ДІАМЕТРА ПРОВІДНИКА  $d$ , ДІАМЕТРА ОБМОТКИ  $D_{coil}$ ) ТА ЧАСТОТИ  $f$ .....209

ДОДАТОК Ж. 3D МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОШАРОВИХ ОБМОТОК ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, У СЕРЕДОВИЩІ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ.....231

ДОДАТОК З. КОЕФІЦІЄНТИ АПРОКСИМАЦІЇ ДЛЯ КРИВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ  $K_f = f(d/D_{coil})$  ТА  $K_f = f(N)$  ДЛЯ НАЙБІЛЬШ ПОШИРЕНИХ ПРАКТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОДНОШАРОВИХ ОБМОТОК.....234

ДОДАТОК И. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....243

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

## Скорочення

УФ	узгоджуючий фільтр
ПК	персональний комп'ютер
РЕА	радіоелектронна апаратура
ІДЖ	імпульсні джерела живлення

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Індуктивні елементи є невід’ємною частиною переважної частини як промислових, так і побутових пристроїв. Як відомо, вказані елементи є пасивними радіоелектронними компонентами, основною функцією яких є накопичення енергії магнітного поля (складової електромагнітного поля). Завдяки цій властивості, індуктивні елементи застосовуються у низці РЕА різного призначення та потужностей, власне, для накопичення енергії (у якості накопичувальних дроселів ІДЖ), передачі енергії (у системах безпроводної передачі енергії), придушення завад та згладжування пульсацій струму (у складі мережних та вихідних фільтрів ІДЖ), у складі резонансних та частото-вибіркових кіл (у т.ч. в якості дроселів УФ ультразвукового обладнання) [1], [2, с. 294-331].

Уточнимо, що під поняттям імпульсних джерел живлення (імпульсних перетворювачів електроенергії) у даній роботі розумітимемо як DC-DC перетворювачі (понижувальні перетворювачі (*buck power converter*), підвищувальні перетворювачі (*boost power converter*), понижувально-підвищувальні перетворювачі (*buck-boost power converter*, *SEPIC converter*), так і AC-DC перетворювачі різних топологій (у т.ч. мостової, напівмостової) та способів керування ключовим елементом (широтно-імпульсний, фазовий, імпульсно-фазовий). Вказані ІДЖ застосовуються в основному у промисловості, зокрема для живлення обладнання телекомунікаційних мереж, зварювальних інверторів (у т.ч. для контактного мікрозварювання) і т.д.

Під ультразвуковим обладнанням розумітимемо потужне промислове ультразвукове обладнання для очищення предметів шляхом ультразвукової кавітації у рідинах, для розпилення рідин, зварювання, ультразвукового неруйнівного контролю і т.д.).

Індуктивні елементи у цих пристроях працюють у широкому діапазоні робочих частот. Тому доцільно розглянути особливості роботи даних індуктивних елементів у діапазонах низьких частот ( $f < 20$  кГц), середніх (ультразвукових) частот ( $f = 20 - 100$  кГц), високих частот ( $f = 100$  кГц –  $300$

МГц).

**Область низьких частот.** Індуктивні елементи, що працюють в даному частотному діапазоні, представлені дроселями фільтрів, основною функцією яких є згладжування пульсацій випрямленого струму у джерелах вторинного живлення та придушення синфазних завад на входах ІДЖ та мережних фільтрах [3, с. 35-36]. У даному діапазоні частот досить слабо проявляється вплив частотних ефектів (таких як витіснення струму на поверхню провідника (скін-ефект) чи взаємний вплив сусідніх провідників на розподіл струму у них (ефект близькості) [4]. Загалом, впливом вказаних ефектів на опір втрат обмоток нехтують, а останній, в результаті, визначається виключно омичними втратами у провіднику.

**Область високих частот.** У даному частотному діапазоні індуктивні елементи працюють у складі апаратури телекомунікаційних мереж в якості елементів резонансних кіл (у складі коливальних контурів), частото-вибіркових кіл (у складі пасивних  $LC$  фільтрів), накопичувальних елементів (в якості накопичувальних дроселів ІДЖ). У цьому діапазоні частот, на відміну від діапазону низьких частот, на опір втрат обмотки суттєвий вплив здійснюватимуть частотні ефекти, однак цей вплив зменшують різними способами – нанесенням на провідник покриття з низьким питомим опором (наприклад, срібла), використання спеціального багатожильного обмотувального провідника (літцендрату) [5], певного типу намотування (наприклад, типу «універсаль»), секціонування багатошарових обмоток і т.д. [6].

**Область середніх (ультразвукових) частот.** В індуктивних елементах, що працюють у цьому частотному діапазоні, вплив частотних ефектів на опір втрат обмотки буде суттєвішим, порівняно із діапазоном низьких частот, тому даний вплив необхідно враховувати, хоч він і буде меншим, ніж у діапазоні високих частот. Варто звернути увагу на ряд особливостей, що мають місце у цьому діапазоні частот. Використання для мінімізації впливу частотних ефектів на опір втрат обмотки тих методів, які успішно застосовуються у області



високих частот, у данному випадку або недоцільні взагалі, або мають суттєві обмеження. Зауважимо, що індуктивні елементи вказаного діапазону частот працюють у силових та високовольтних колах пристроїв великої потужності (наприклад, в ІДЖ у ролі накопичувального дросселя [7] чи у складі потужних ультразвукових пристроїв як дроселі УФ [8]), тому струми, що протікають через обмотки цих елементів, значно більші, ніж ті, що протікають в обмотках індуктивних елементів, що працюють у діапазоні високих частот. Таким чином, у випадку використання літцендрату для виконання обмоток силових індуктивних елементів в даному частотному діапазоні, останній необхідно обрати зі значно більшою площею поперечного перерізу, та більшим значенням пробивної напруги між жилами. Такий літцендрат є менш поширеним та більш дороговартісним, порівняно зі звичайним обмотувальним провідником [6], тому, особливо за масового виробництва, його використання може бути економічно не вигідним.

Виконання обмотки типу «універсаль» для обмоток силових індуктивних елементів також є недоцільним, оскільки технологічно важко виготовити дану обмотку для провідників великого перерізу. Окрім того, для отримання того ж значення індуктивності, що і для рядного намотування, необхідно використати більшу довжину провідника, що спричинить додатковий ріст опору втрат даної обмотки. Порівняно із областю високих частот, де для зменшення впливу міжвиткової відстані на опір втрат при рядному намотуванні достатньо було збільшити відстань між витками, причому відповідним зростанням довжини обмотки нехтували, то для силових індуктивних елементів, що працюють в області ультразвукових частот, довжина обмотки обмежена довжиною каркасу, який, у свою чергу, відповідає певним типорозмірам осердь. Також при надмірному збільшенні відстані між витками для досягнення необхідного значення індуктивності існує ризик не укластися повністю в один шар. Тоді доводиться переходити до виконання наступного шару, що у свою чергу, призведе до додаткового збільшення величини втрат такої обмотки за рахунок появи додаткового взаємного впливу уже між провідниками шарів, що в

цілому може нівелювати очікуване зменшення величини втрат від збільшення відстані між витками. Окрім цього, при виконанні кожного наступного шару виникає потреба запобігти «провалюванню» витків верхнього шару між витками нижнього, особливо при намотуванні з кроком. Дане завдання вирішується прокладанням міжшарової ізоляції, а це, у свою чергу, може суттєво погіршити умови для охолодження обмоток нижчих шарів, що особливо критично для силових індуктивних елементів [9].

Тому пошук шляхів мінімізації величини втрат в обмотках силових індуктивних елементів, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот та загального підвищення ККД пристроїв, до складу яких вони входять, є актуальним завданням. Одним із шляхів мінімізації втрат є визначення певних оптимальних геометричних параметрів обмоток, враховуючи при цьому ряд конструктивних обмежень (у т.ч. максимальної довжини намотки одного шару, залежно від діаметра провідника та товщини його ізоляції, довжини каркасу, кількості витків і т.д) при одночасному отриманні мінімально можливого значення опору втрат обмотки – тобто, оптимізації конструкції обмотки індуктивного елемента.

Іншим способом досягнення мінімального рівня величини втрат обмоток таких індуктивних елементів, є підвищення точності їх розрахунку за допомогою відомих аналітичних методик, шляхом аналізу та подальшої модифікації їх розрахункових виразів для найбільш поширених на практиці випадків. Особливо актуальним даний спосіб мінімізації втрат є для випадку дроселів узгоджуючих фільтрів (УФ), оскільки, беручи до уваги ряд особливостей роботи даного індуктивного елемента у складі УФ ультразвукових пристроїв великої потужності, ті чи інші упущення у методиках критично впливають на коректність результатів розрахунку (порівняно із накопичувальними дроселями ІДЖ), що призводить до значного розходження реальних та розрахункових даних та проявляється у перегріві обмоток. Тому останній спосіб оберемо як основу досліджень в рамках даної дисертації, а в якості досліджуваного індуктивного елемента оберемо силовий

дросель УФ ультразвукового пристрою. Розглянемо більш детально особливості роботи як силового дроселя у складі УФ, так і УФ загалом. Енергетичну ефективність роботи потужного ультразвукового пристрою наряду визначає енергетична ефективність узгоджувачого фільтра (УФ), оскільки через його елементи протікають значні струми. Основним призначенням УФ є, власне, узгодження вихідного опору ультразвукового генератора з вхідним опором випромінювача (п'єзовипромінювача) та фільтрація гармонік у вихідній напрузі. Найчастіше застосовуються фільтри першого порядку у вигляді пасивних  $LC$  фільтрів, які являють собою послідовний чи паралельний коливальний контур. До складу цих фільтрів входять один чи декілька індуктивних елементів (дроселів) та один чи декілька ємнісних елементів (конденсаторів). ККД узгоджувачого фільтра визначатимуть втрати у ємності та індуктивності, що входять до його складу [10].

Що стосується втрат у ємності, то в ультразвуковому діапазоні частот, основним будуть втрати у діелектрику. Однак, промисловість налагодила випуск сучасних зразків плівкових конденсаторів із малими значенням тангенсу кута діелектричних втрат та стабільним його значенням у широкому діапазоні робочих температур. Таким чином, впливом втрат у ємностях на загальний ККД узгоджувачого фільтра можна знехтувати.

Зовсім інша ситуація із втратами в індуктивних елементах, тим більше, що дроселі узгоджувачих фільтрів проектується і виготовляються кожен раз індивідуально. Також, існуючі на сьогодні аналітичні методики розрахунку втрат в обмотках індуктивних елементів мають ряд суттєвих недоліків та упущень, що не дозволяє їх використовувати для коректного розрахунку силових індуктивних елементів в ультразвуковому діапазоні частот, у тому числі й дроселів УФ. Тому завдання підвищення точності результатів розрахунків за відомими методиками, досягнутого удосконаленням відомих аналітичних виразів, має значний практичний та науковий інтерес.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертаційна робота виконана згідно з тематичними планами НДР «КПІ ім..

Ігоря Сікорського» та кафедри «Прикладної радіоелектроніки» (ПРЕ) Радіотехнічного факультету в межах Договору № ДНДЧ/0201.01/2100.02/47/2023 ТОВ «ТІНСТРУМ» від 30.03.2023 р.

**Мета і завдання дослідження.** *Метою дисертаційної роботи є поглиблення теоретичних положень та розроблення практичних рекомендацій щодо коректного розрахунку втрат в одношарових обмотках силових індуктивних елементів, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот шляхом модифікації розрахункових виразів існуючих аналітичних методик розрахунку.*

Досягнення мети передбачає вирішення наступних завдань:

1. Критичний аналіз існуючих аналітичних методик розрахунку величини втрат в обмотках індуктивних елементів;
2. Визначення ступеня впливу геометричних параметрів одношарової обмотки індуктивних елементів на розподіл струму у витках (величину втрат).
3. Аналіз шляхів уточнення наявних розрахункових виразів.
4. На основі даних, отриманих у ході попередніх досліджень, а також результатів експериментального дослідження обмоток без осердя з різними геометричними параметрами, здійснення уточнення (модифікації) розрахункових виразів наявних аналітичних методик.

**Об'єктом дослідження** є розподіл струму у багатовитковій одношаровій обмотці індуктивного елемента (силового дроселя УФ) в ультразвуковому діапазоні частот.

**Предметом дослідження** є аналітичні методики розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів (силових дроселів УФ) в ультразвуковому діапазоні частот.

**Методи дослідження.** При виконанні даної дисертаційної роботи в її основу покладено системний підхід до вивчення об'єкту дисертаційного дослідження, а також такі **універсальні (загальнологічні) методи** дослідження як *аналіз* (розбиття предмету дослідження на окремі структурні частини – наприклад, аналіз розрахункових виразів аналітичних методик розрахунку,

аналіз розподілу струму шляхом розбиття багатовиткової обмотки на окремі витки), *синтез* (об'єднання окремих частин об'єкту дослідження в одне ціле, наприклад, поширення результатів дослідження розподілу струму з одного витка на багатовиткову обмотку), *аналогія* (перенесення властивостей вивченого предмета на менш вивчений, наприклад, під час визначення способу внесення доповнюючих виразів при модифікації розрахункового виразу), а також *моделювання* (складання і дослідження моделі предмету дослідження з подальшим переходом до реального предмету), зокрема *імітаційне моделювання* (модель відтворює принцип роботи реального предмета за тих чи інших значень параметрів – машинне моделювання обмотки у середовищі кінцево-елементного аналізу). Також у дослідженні застосовано такі **методи емпіричного дослідження**, як *спостереження* (у т.ч. вимірювання параметрів об'єкту дослідження), *порівняння* (визначення подібних чи відмінних рис, наприклад, між результатами теоретичного, експериментального вимірювання параметрів обмоток та результатами машинного моделювання), *експеримент* (дослідження параметрів об'єкту дослідження за певних спеціально створених умов – натурне вимірювання параметрів виготовлених зразків одношарових обмоток з різними параметрами), *опис* (систематизація отриманих даних у ході дослідження), зокрема у роботі застосовано методику *графічного опису* (побудовано ряд порівняльних графіків залежностей), *статистичного опису* (сформовано ряд таблиць із числовими даними дослідження) та *словесного опису* (засобами мови – пояснення отриманих даних на графіках, у таблицях та результатів моделювання).

Для математичних розрахунків використано спеціалізований математичний пакет *MatLAB R2022*. Машинне моделювання проведено у середовищі FEM аналізу (кінцево-елементного аналізу) *COMSOL Multiphysics 5.6*. Інформаційною базою дисертаційного дослідження стали результати власних досліджень, наукові публікації та Інтернет-ресурси.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

- вперше запропоновано метод оцінки величини втрат багатовиткової

одношарової обмотки шляхом поєднання машинного моделювання (в середовищі FEM аналізу) та експериментальних вимірювань, що дозволяє оцінити вплив геометрії обмотки на розподіл струму у поперечному перерізі провідника;

- удосконалено методику розрахунку величини втрат індуктивних елементів з одношаровими обмотками, шляхом доповнення початкового виразу уточнюючими множниками в яку, на відміну від існуючих методик, включено знехтувані раніше геометричні параметри обмотки.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у тому, що:

- визначено, що наявні методики розрахунку потребують додаткового дослідження впливу знехтуваних у них геометричних параметрів на розподіл струму у провідниках обмотки (величину їх втрат), з метою подальшого удосконалення виразів методик;

- встановлено, що похибка в розрахунках (відносно результатів експериментальних досліджень) лежить в межах від 20.6% до 39.6% (як наслідок нехтування впливом діаметра витка) та від 17.8% до 65.99% (як наслідок нехтування нерівномірністю розподілу струму у витках);

- виявлено, що за даних умов дослідження, форма поперечного перерізу провідника (кругла та квадратна) незначним чином впливає на розподіл струму;

- визначено, що аналітичну методику розрахунку можливо використовувати для розрахунку величини втрат  $K_f$  одношарових обмоток індуктивних елементів за умови, що обмотка без осердя, кількість витків становить  $N \geq 30$ , а кінцевий результат розрахунку скориговано на величину відносного відхилення теоретичних та експериментальних даних (до 20.5% залежно від діаметра провідника та частоти для обмотки діаметром  $D_{coil} = 10$  мм (ETD-29));

- встановлено, що розрахунок величини втрат одношарових обмоток індуктивних елементів з феромагнітним осердям за аналітичною методикою *Ferreira* проводити не можна, оскільки розходження теоретичних обчислень за даною методикою та експериментальними даними сягає приблизно 1000% (11

разів), оскільки вплив осердя на величину втрат обмотки у даній методиці не враховано;

– виявлено, що можливою причиною розходження є вплив зміни конфігурації силових ліній магнітного поля всередині обмотки на розподіл струму у її провідниках при введенні феромагнітного осердя. Втрати в осерді, у даному випадку, майже не впливають на загальну величину втрат обмотки (зміна величини втрат в осерді у 50 разів спричиняє приріст величини втрат обмотки  $K_f$  лише на 3%), тому ними можна знехтувати;

– запропоновано ряд уточнень розрахункового виразу методики *Ferreira*, які дозволили врахувати вплив знехтованих у початковому виразі геометричних параметрів. В результаті модифікації розрахункових виразів зменшено розбіжність між експериментальними та теоретичними результатами з 59.5% до 11% (для  $K_f = f(N)$ ) та з 63% до 4% (для  $K_f = f(d/D_{coil})$ ).

Результати наукових досліджень можуть бути використані у практичній інженерно-конструкторській діяльності при розробці та конструюванні силових обмоток індуктивних елементів, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот (особливо дроселів УФ ультразвукового технологічного обладнання) та інших індуктивних елементів, що працюють в даному частотному діапазоні у випадку переважаючої змінної складової струму.

**Особистий внесок.** Основні теоретичні викладки, проведення та обробка результатів експериментальних досліджень, проведення теоретичних розрахунків та аналіз отриманих результатів в дисертаційній роботі отримані автором самостійно. У співавторстві з науковим керівником сформульовані мета і завдання досліджень, узгоджено плани проведення експериментальних досліджень, висновки. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті наукові результати та ідеї, які належать здобувачеві. Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві, відмічено у переліку опублікованих праць.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, пройшли апробацію на наступних конференціях:

1. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2020» (РТПСАС-2020), (м. Київ, 16-22 листопада 2020 р.);

2. X Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2021» (РТПСАС-2021), (м. Київ, 9-11 листопада 2021 р.);

3. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2022» (РТПСАС-2022), (м. Київ, 22-24 листопада 2022 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 5 наукових праць, в тому числі 2 статті в провідних фахових виданнях, з яких 1 у наукових фахових виданнях України та 1 у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базі Scopus (категорія A, Q3), 3 тези доповідей у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, 10 додатків. Робота містить 244 сторінки, в тому числі 123 сторінок основного тексту, 37 рисунків, 147 таблиць (з них 4 в основному тексті та 143 винесено у додатки). Список використаної літератури включає 38 найменувань. Додатки розміщено на 93 сторінках.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ВЕЛИЧИНИ ВТРАТ ОБМОТОК ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

#### 1.1 Опір індуктивних елементів змінному струму (опір втрат), його складові та вплив на величину втрат обмотки індуктивного елемента

Для повноти розуміння поняття опору втрат розглянемо ідеалізовану котушку індуктивності. Як відомо, її повний комплексний опір (імпеданс) має суто реактивний характер, тобто, є елементом, який віддає всю накопичену енергію магнітного поля споживачеві без втрат.

У реальних індуктивних елементах, при протіканні струму через обмотку, у ній, окрім основного ефекту взаємодії струму та магнітного потоку (що визначає індуктивність обмотки  $L$ ), матиме місце і ряд паразитних явищ, внаслідок яких в імпедансі обмотки  $Z$ , окрім реактивної складової  $X_L$ , з'являтиметься ще й активна складова  $R$ , величина якої і визначатиме величину опору втрат індуктивного елемента змінному струму частоти  $f$  [2, с. 560]:

$$Z = R + j \cdot X_L = R_{AC} + j \cdot (2\pi \cdot f \cdot L) \quad (1.1)$$

де  $Z$  – комплексний опір (імпеданс) обмотки індуктивного елемента,  $\text{Ом}$ ;

$R$  – дійсна (активна) складова комплексного опору обмотки (опір втрат),  $\text{Ом}$ ;

$X_L$  – уявна (реактивна) складова комплексного опору обмотки,  $\text{Ом}$ ;

$R_{AC}$  – опір обмотки змінному струму,  $\text{Ом}$ ;

$f$  – робоча частота,  $\text{Гц}$ ;

$L$  – індуктивність обмотки індуктивного елемента,  $\text{Гн}$ .

Таким чином, величина опору втрат  $R$  визначає енергетичну ефективність ( $\text{ККД}$ ) як окремого індуктивного елемента, що працює у складі  $\text{РЕА}$ , так і загальний  $\text{ККД}$  самого пристрою, до складу якого входять згадані індуктивні елементи. Тому пошук способів мінімізації опору втрат обмоток силових індуктивних елементів, у тому числі, що працюють в ультразвуковому

діапазоні частот, з метою досягнення максимально можливого *ККД* силових пристроїв, є досить актуальним завданням.

Розглянемо детальніше згадані вище паразитні явища, які визначають появу активної складової в імпедансі індуктивного елемента та, відповідно, величини втрат. Об'єктом розгляду оберемо типовий індуктивний елемент, обмотка якого виконана на діелектричному каркасі із феромагнітним осердям.

У загальному випадку, сумарні втрати в індуктивному елементі складатимуться із *втрат в осерді*, *втрат у діелектрику* та *втрат у провідниках обмотки* [11].

**Втрати в осерді.** Сумарні втрати в осерді складаються із трьох складових – *втрат на вихрові струми (чи струми Фуко)*, *втрат на гістерезис* та *втрат на післядію (втрат на магнітну в'язкість)* [12].

Відповідно, загальні втрати у феромагнітному осерді можна описати виразом:

$$P_{loss\_core\_Σ} = P_{eddy\_current} + P_{hysteresis} + P_{after\_effect} \quad (1.2)$$

де  $P_{loss\_core\_Σ}$  – сумарні втрати у феромагнітному осерді;

$P_{eddy\_current}$  – втрати на вихрові струми (струми Фуко);

$P_{hysteresis}$  – втрати на гістерезис (перемагнічування);

$P_{after\_effect}$  – втрати на післядію (магнітну в'язкість).

Розглянемо кожен складову детальніше.

**а) Втрати на вихрові струми.** Проходження змінного струму через обмотку котушки індуктивності створює змінне магнітне поле навколо провідників обмотки, яке, у свою чергу, здатне породжувати так звану вихрову *ЕРС* у провідних елементах (провідниках обмотки, осерді, екрані, тощо), що розташовані поруч. Наслідок – поява у них вихрових струмів (або струмів Фуко), які призводять до втрат енергії у провідних середовищах, у яких вони виникли, у тому числі і в осерді котушки індуктивності. Ця енергія, як правило, розсіюється у вигляді тепла та знижує загальний *ККД* індуктивного елемента.

Для зменшення втрат, спричинених цим явищем, використовують матеріали з підвищеним питомим опором, осердя збирають із тонких окремих пластин (як правило для роботи в діапазоні низьких частот) або використовують осердя з розпиленого заліза (для роботи в області середніх (ультразвукових) частот).

Приблизний розрахунок величини втрат у феромагнітному осерді на вихрові струми можна виконати за виразом:

$$P_{\text{eddy\_current}} = \xi \cdot f^2 \cdot (B_{\text{max}})^2 \quad (1.3)$$

де  $P_{\text{eddy.current}}$  – втрати на вихрові струми (струми Фуко), Вт/кг;

$\xi$  – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від природи магнітного матеріалу (у т.ч. від його форми та питомого опору);

$f$  – робоча частота, Гц;

$B_{\text{max}}$  – максимальна величина магнітної індукції в осерді протягом робочого циклу перемагнічування, Тл.

**б) Втрати на гістерезис.** Відомо, що при намагнічуванні осердя для ліквідації залишкової намагніченості, на нього впливають магнітним потоком протилежного напрямку. Оскільки повороту доменів у нове положення перешкоджає деяка сила, яку називають *коерцитивною*, необхідно витратити додаткову енергію на її подолання. Рівень даної енергії і визначає додаткові втрати на перемагнічування осердя. Окрім того, графічно, криву перемагнічування називають *петлею гістерезису*, площа якої характеризує величину втрат в осерді за один період коливань. Циклічну криву перемагнічування (петлю гістерезису) зображено на рис.1.1.

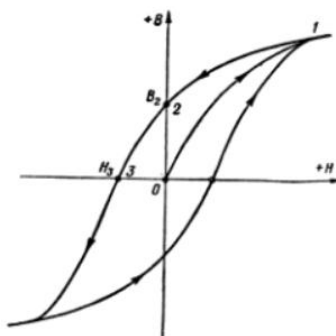


Рисунок 1.1 – Циклічна крива перемагнічування феромагнітного осердя (петля гістерезису) [12]

Розрахунок величини втрат на перемагнічування (гістерезис) можна виконати за виразом:

$$P_{hysteresis} = \eta \cdot f \cdot (B_{max})^n \quad (1.4)$$

де  $P_{hysteresis}$  – втрати на гістерезис (перемагнічування), Вт/кг;

$\eta$  – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від роду магнітного матеріалу;

$f$  – робоча частота, Гц;

$B_{max}$  – максимальна величина магнітної індукції в осерді протягом робочого циклу перемагнічування, Тл;

$n$  – показник степеня, що знаходиться в межах 1.6...2.

**в) Втрати на післядію (втрати на магнітну в'язкість).** Цей вид втрат у феромагнітних осердях, що проявляється при перемагнічуванні, пов'язаний з кінцевою зміною магнітного стану феромагнетика після зміни напруженості магнітного поля. Дане явище пов'язано з інерційністю процесу перемагнічування доменів. Чим коротша тривалість прикладеного магнітного поля, тим триваліше запізнювання, а, значить, і магнітні втрати, викликані цією інерційністю, будуть більші. Рівень даних втрат залежить від матеріалу феромагнітного осердя, його складу, термічної та механічної обробки.

Розрахунок величини втрат на післядію ( $P_{after\_effect}$ ) неможливо провести прямо, однак її можна визначити опосередковано, як різницю між величиною загальних втрат у феромагнітному осерді  $P_{loss\_core\_Σ}$  (1.2) та сумою втрат на гістерезис ( $P_{hysteresis}$ ) та вихрові струми ( $P_{eddy.current}$ ) [12]:

$$P_{after\_effect} = P_{loss\_core\_Σ} - (P_{eddy\_current} + P_{hysteresis}) \quad (1.5)$$

де  $P_{after\_effect}$  – втрати на післядію (магнітну в'язкість);

$P_{loss\_core\_Σ}$  – сумарні втрати у феромагнітному осерді;

$P_{eddy.current}$  – втрати на вихрові струми (струми Фуко);

$P_{hysteresis}$  – втрати на гістерезис (перемагнічування).

**Втрати в діелектрику.** Вплив діелектричних втрат на загальну величину втрат обмотки в ультразвуковому діапазоні частот проявляється надзвичайно мало (на відміну, наприклад, від індуктивних елементів, що працюють в *НВЧ* діапазоні) і як правило, ним нехтують. Загалом, втрати в діелектрику можна розділити на *втрати від міжвиткової паразитної ємності* та *втрати в діелектричному матеріалі каркасу*.

Розглянемо кожен складову детальніше.

**а) Втрати від міжвиткової паразитної ємності.** У цьому випадку втрати в діелектрику визначаються наявністю паразитної ємності між сусідніми витками котушки, яка, у свою чергу, складається із ємності через повітря та ємності через діелектричний каркас, що і призводить до витоку струму між витками. Разом ці ємності складають власну міжвиткову ємність котушки  $C_0$ .

Розрахувати опір втрат, що вноситься матеріалом каркасу індуктивного елемента, можливо за виразом, запропонованим У. Джексоном [13]:

$$r_{dielectric} = L^2 \cdot C_0 \cdot \omega^3 \cdot tg(\delta_{dielectric}) \quad (1.6)$$

де  $r_{dielectric}$  – опір втрат у діелектричних матеріалах індуктивного елемента, Ом;

$L$  – індуктивність обмотки, Гн;

$C_0$  – власна міжвиткова ємність обмотки, Ф;

$\omega$  – робоча кругова частота, рад/с;

$tg(\delta_{dielectric})$  – тангенс кута втрат діелектричного матеріалу каркасу.

**б) Втрати в діелектричному матеріалі каркасу.** Оскільки робочі частоти досліджуваних силових індуктивних елементів невисокі, а сучасні діелектричні матеріали каркасів мають малі значення  $tg(\delta_{dielectric})$ , тому втратами у діелектрику в даному випадку знехтуємо. Також, виходячи із практичного досвіду, встановлено, що в ультразвуковому діапазоні частот значний вплив на загальний опір втрат індуктивного елемента здійснюють саме втрати в осерді та провідниках обмотки, тому у даній роботі досліджуватимемо вплив саме цих ефектів на величину втрат обмотки [12, с. 10-14].

**Втрати у провіднику.** В області середніх (ультразвукових) частот найбільш значними виявляються втрати у провіднику, величина яких в основному і визначатиме загальну величину опору втрат обмотки.

Сумарний опір втрат обмотки визначається – *опором провідника постійному струму, опором провідника змінному струму певної частоти* (на який впливають *втрати від поверхневого ефекту (скін-ефекту) та втрати від ефекту близькості*) [14].

Розглянемо кожну складову детальніше.

а) опір провідника обмотки постійному струму  $R_{DC}$ . Дана величина визначає опір провідника обмотки постійній складовій струму, що протікає нею, прямо пропорційна довжині провідника та обернено пропорційна площі його поперечного перерізу. Розрахунок опору провідника довільної форми перерізу постійному струму  $R_{DC}$  виконується за загальновідомим виразом (1.7), описаний в ряді джерел, зокрема у [15], [2, с. 164-167]:

$$R_{DC} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.7)$$

де  $R_{DC}$  – опір провідника постійному струму, Ом;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$l$  – довжина провідника, м;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника, м<sup>2</sup>.

Для розрахунку опору постійному струму циліндричного провідника  $R_{DC\_round}$ , візьмемо до уваги, що площа його поперечного перерізу  $S_{round}$  розраховується як:

$$S_{round} = \pi \cdot r_0^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (1.8)$$

де  $S_{round}$  – площа поперечного перерізу циліндричного провідника, м<sup>2</sup>;

$r_0$  – радіус циліндричного провідника, м;

$d$  – діаметр циліндричного провідника, м.

Таким чином, підставивши вираз (1.8) у вираз (1.7), отримаємо вираз для розрахунку опору постійному струму циліндричного провідника  $R_{DC\_round}$ :

$$R_{DC\_round} = \rho \cdot \frac{l}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \rho \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d^2} = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot r_0^2} \quad (1.9)$$

де  $R_{DC\_round}$  – опір циліндричного провідника постійному струму, Ом;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$d$  – діаметр циліндричного провідника, м;

$l$  – довжина провідника, м;

$r_0$  – радіус циліндричного провідника, м.

Виходячи із попередніх міркувань, опір постійному струму обмотки, виконаної циліндричним провідником  $R_{DC\_cyl\_coil}$ , можна розрахувати за виразом (впливом товщини ізоляції знехтуємо):

$$R_{DC\_cyl\_coil} = \rho \cdot \frac{4 \cdot D_{coil} \cdot N}{d^2} \quad (1.10)$$

де  $R_{DC\_cyl\_coil}$  – опір постійному струму обмотки з циліндричного провідника, Ом;

$\rho$  – питомий опір матеріалу дроту обмотки, Ом·м;

$D_{coil}$  – діаметр обмотки, м;

$N$  – кількість витків;

$d$  – діаметр провідника обмотки, м.

*б) опір провідника змінному струму  $R_{AC}$  частотою  $f$ .*

Методика розрахунку опору прямого циліндричного одиночного провідника змінному струму  $R_{AC}$  на заданій частоті  $f$  теж є загальновідомою та описана, зокрема, у [2, с.184-185]. Згідно із нею, комплексний опір (імпеданс)  $Z_{round}$  даного провідника, з урахуванням впливу скін-ефекту, розраховується через параметри поля наступним чином:

$$Z_{\_round} = R_{AC\_round} + jX_L = \rho \cdot l \cdot \frac{k}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \frac{J_0(k \cdot r_0)}{J_1(k \cdot r_0)} \quad (1.11)$$

$$k = \sqrt{-j} \cdot \sqrt{\omega \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0} = \sqrt{-j} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}{\rho}} \quad (1.12)$$

де  $Z_{\_round}$  – комплексний опір (імпеданс) прямого циліндричного одиночного провідника, Ом;

$R_{AC\_round}$  – активний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

$X_L$  – реактивний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$l$  – довжина провідника, м;

$k$  – комплексне хвильове число,  $m^{-1}$ ;

$r_0$  – радіус провідника (струмопровідної жили), м;

$J_0(z)$  – функція Бесселя нульового порядку;

$J_1(z)$  – функція Бесселя першого порядку;

$\omega$  – кругова частота, рад/с;

$\sigma$  – питома електрична провідність матеріалу провідника, См/м;

$\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу провідника;

$\mu_0$  – магнітна стала, Гн/м.

$f$  – циклічна частота, Гц;

Значення опору провідника змінному струму (або опору втрат)  $R_{AC\_round}$  визначається як дійсна частина комплексного опору (імпедансу)  $Z_{\_round}$  даного провідника, розрахованого за виразом (1.11):

$$R_{AC\_round} = \operatorname{Re}\{Z_{\_round}\} = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r_0} \cdot \operatorname{Re}\left\{k \cdot \frac{J_0(k \cdot r_0)}{J_1(k \cdot r_0)}\right\} = \frac{\rho \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \operatorname{Re}\left\{k \cdot \frac{J_0(k \cdot r_0)}{J_1(k \cdot r_0)}\right\} \quad (1.13)$$

де  $R_{AC\_round}$  – активний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

$Z_{\_round}$  – комплексний опір (імпеданс) прямого циліндричного одиночного провідника, Ом;

$l$  – довжина провідника, м;

$\sigma$  – питома електрична провідність матеріалу провідника, См/м;



$r_0$  – радіус провідника (струмопровідної жили), м;

$k$  – комплексне хвильове число,  $m^{-1}$  (1.12);

$J_0(z)$  – функція Бесселя нульового порядку;

$J_1(z)$  – функція Бесселя першого порядку;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м.

На величину опору провідника змінному струму впливають такі частотні ефекти, як *втрати від поверхневого ефекту (чи скін-ефекту)* та *втрати від ефекту близькості* (у випадку одношарової обмотки це *самоефект близькості* та *міжжитковий ефект близькості*). Розглянемо їх детальніше:

в) втрати від поверхневого ефекту (скін-ефекту)  $R_{skin}$ . Даний ефект проявляється у тому, що при збільшенні частоти струму, що протікає через провідник, відбувається ріст опору втрат провідника. Це пояснюється особливостями розподілу змінного струму у провіднику, який протікає не по усьому перерізу провідника, як у випадку з постійним, а переважно у поверхневому шарі. Струмопровідна область прямого циліндричного провідника матиме форму кільця, товщина якого прямо залежатиме від частоти – при її збільшенні площа поперечного перерізу провідної області (тобто, товщина кільця) зменшуватиметься, що спричинить ріст опору провідника змінному струму.

Розглянемо більш детально поверхневий ефект у циліндричному провіднику – фізичну суть явища, паразитний вплив на опір провідника змінному струму та деякі загальновідомі шляхи боротьби з ним.

Поверхневий ефект (скін-ефект) – це явище зменшення амплітуди електромагнітного поля по мірі проникнення його у провідне середовище та концентрація струмопровідної області у поверхневих шарах провідника.

Розглянемо прямий циліндричний провідник довільної довжини із фіксованою площею поперечного перерізу. У випадку протікання через даний провідник постійного струму, його густина буде рівномірною по усій площі його перерізу (рис. 1.2 а, б). Однак, при протіканні через циліндричний

провідник змінного струму, ситуація змінюється – густина струму у поперечному перерізі провідника стає неоднорідною: у поверхневих шарах вона буде найбільшою, а в напрямку до центру провідника зменшуватиме своє значення за експоненційним законом (1.15). Таким чином, поверхневий шар є екраном, що створює опір проникненню поля вглиб провідника [14].

Отже, струмопровідна область у цьому випадку концентрується близько до поверхні провідника, що еквівалентно тому, що він протікає в порожнистому циліндричному провіднику товщиною  $\delta$ , що і проілюстровано на рис. 1.2 в, г.

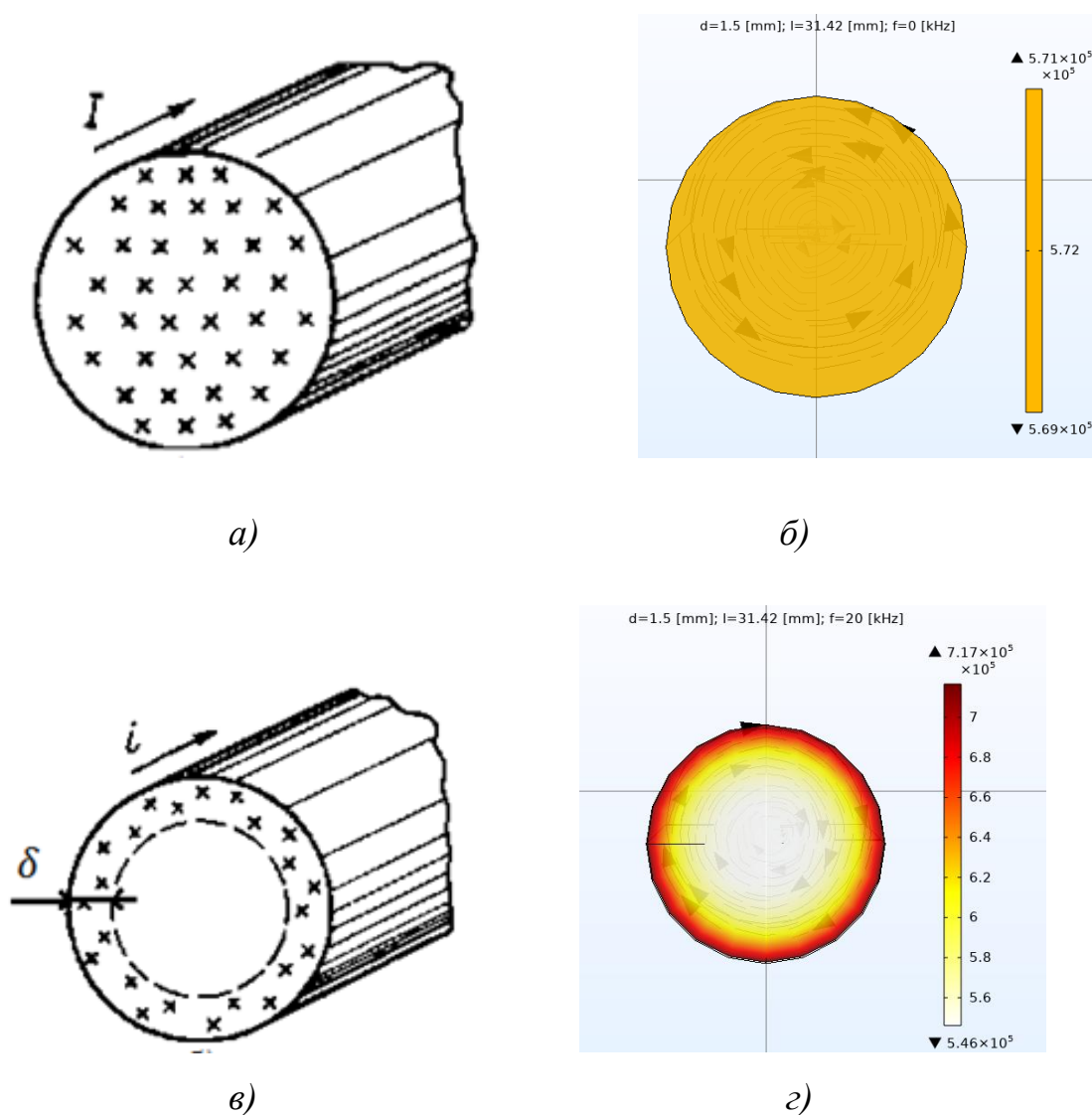


Рисунок 1.2 – Ілюстрація розподілу постійного (а), (б) та змінного (в), (г) струму у поперечному перерізі прямого одиночного циліндричного провідника (схематично (а), (в) (джерело: [14]) та при моделюванні у середовищі кінцево-елементного аналізу (б), (г) (розроблено автором))

Позначена на рис. 1.2 величина  $\delta$  описує глибину проникнення струму всередину провідника та називається товщиною скін-шару, розрахувати яку можна за наступним виразом, наведеного у [2, с.164-167]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad (1.14)$$

де  $\delta$  – товщина скін-шару, м;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$\mu$  – магнітна проникність матеріалу провідника;

$f$  – частота, Гц.

Якщо товщина скін-шару набагато менша радіусу провідника ( $\delta \ll r_0$ ), що ілюструє випадок сильного скін-ефекту, закон розподілу струму можна описати виразом:

$$j(y) = j_{surface} \cdot \exp\left(\frac{-y}{\delta}\right) \quad (1.15)$$

де  $j(y)$  – щільність струму на відстані  $y$  від поверхні провідника, А/м<sup>2</sup>;

$j_{surface}$  – щільність струму біля поверхні, А/м<sup>2</sup>;

$y$  – відстань від поверхні провідника, м;

$\delta$  – товщина скін-шару, м.

Розглянемо фізичну природу виникнення поверхневого ефекту на прикладі провідника, через який протікає змінний струм. Нехай у даний момент часу струм  $i$  має напрям, вказаний на рис.1.3. У свою чергу, він створює всередині провідника магнітне поле, лінії індукції якого лежать у площині, що перпендикулярна осі провідника.

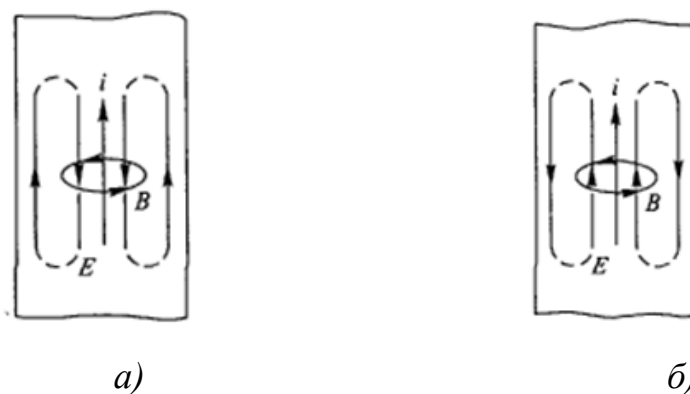


Рисунок 1.3 – До пояснення явища поверхневого ефекту у циліндричному провіднику: а) зростання сили струму; б) зменшення сили струму

(Джерело: [14])

Припустимо, що в певний момент часу величина струму  $i$  збільшується (рис.1.3, а). У цьому випадку збільшення величини магнітної індукції  $B$  викликає появу вихрового електричного поля  $E$ , яке біля поверхні провідника спрямоване так само, як і напрям протікання струму  $i$ , а на осі провідника – протилежно йому. Напрямок вихрового електричного поля  $E$  направлений так, що він буде підсилювати струм на поверхні провідника та ослаблювати його всередині.

У випадку ж, коли сила струму  $i$  зменшується, магнітна індукція  $B$ , що також зменшується, стане причиною появи електричного поля  $E$ , яке буде направлене у протилежному напрямку, порівняно з першим випадком, тобто, біля поверхні провідника електричне поле буде протилежне струму, а на осі співпадатиме з ним (рис. 1.3, б).

В обох розглянутих випадках вихрове електричне поле на осі провідника перешкоджає, а на поверхні сприяє зміні струму, тому на осі провідника змінний струм слабший, а в приповерхневих областях провідника – сильніший.

Оскільки, при наявності скін-ефекту весь струм концентрується поблизу поверхні циліндричного провідника, то це рівноцінно тому, що струм тече по своєрідному порожнистому циліндричному провіднику із товщиною стінок, рівній товщині скін-шару. Опір такого провідника відповідно буде більший, ніж опір суцільного циліндричного провідника та прямо пропорційно залежатиме

від частоти.

Існує ряд способів мінімізації впливу скін-ефекту на опір провідника змінному струму. Одним із них є нанесення на поверхню провідника покриттів з меншим питомим опором (срібло, золото). Також для виконання обмоток використовують спеціальний провідник – *літцендрат*, який складається з певної кількості ізольованих жилок, перевитих між собою та покритих декількома шарами ізоляції. Така конструкція значно збільшує провідну поверхню та зменшує його опір, внаслідок зменшення впливу поверхневого ефекту, а скручування додатково зменшує прояв ефекту близькості [14].

г) втрати від впливу ефекту близькості. При згортанні провідника зі струмом у кільце чи розташування поруч з ним іншого провідника, окрім розглянутого вище скін-ефекту, матиме місце і прояв ефекту близькості. Суть цього ефекту полягає у витісненні струму з провідника під дією вихрових струмів та магнітного поля сусіднього провідника. Форма струмопровідної області, у такому випадку, змінює форму з кільцевої на серповидну, в результаті чого ще більше зменшується ефективна площа провідної області та зростає величина активної складової комплексного опору [2, с. 226].

Розглянемо цей ефект детальніше. При розташуванні поруч двох і більше провідників чи навіть при скручуванні провідника у кільце, картина розподілу струмів у них змінюється. Як саме – залежить від напрямків протікання струмів у кожному провіднику. На рис. 1.4 зображено взаємодію магнітних полів двох провідників для випадку однакового (а) та протилежного (б) напрямків протікання струму. Потовщена лінія поблизу зовнішньої чи внутрішньої стінок провідника відповідає найбільшій густині струму для кожного конкретного випадку.

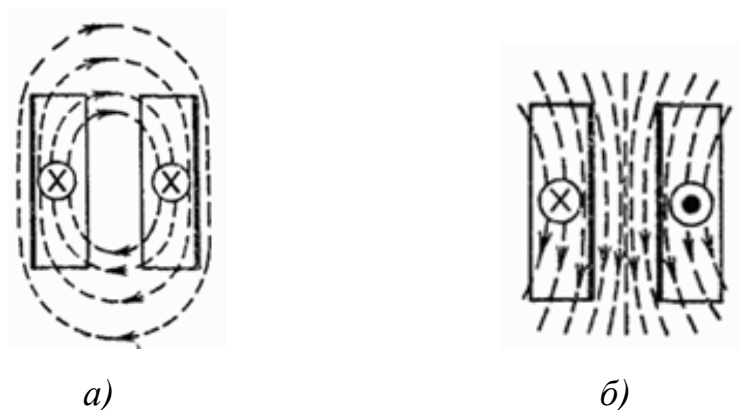


Рисунок 1.4 – До пояснення ефекту близькості між двома провідниками, у яких напрям протікання струму: а) співпадає; б) протилежний (Джерело: [13])

На рисунках проілюстровано, що різні частини провідників (у поперечному перерізі) зчеплені з неоднаковою кількістю ліній магнітного поля. Це призводить до того, що найбільша густина струму буде в тих частинах перерізу провідників, які зчеплені з найменшою кількістю ліній магнітного поля. Таким чином, при однаковому напрямку протікання струмів у сусідніх провідниках (рис.1.4, а) найбільша густина струму буде спостерігатися у найбільш віддалених один від одного частинах перерізів провідників. У випадку ж протилежного спрямування струмів (рис.1.4, б), найбільша їх густина спостерігатиметься у найбільш близьких частинах провідників [14]. Для індуктивних елементів, що розглядатимуться у даній дисертації, витки, які майже завжди укладаються в одному напрямку, тому і струми у них будуть спрямовані аналогічно, що відповідає розподілу на рис.1.4, а та ілюструє міжшаровий та міжвитковий (рис. 1.5) ефекти близькості.

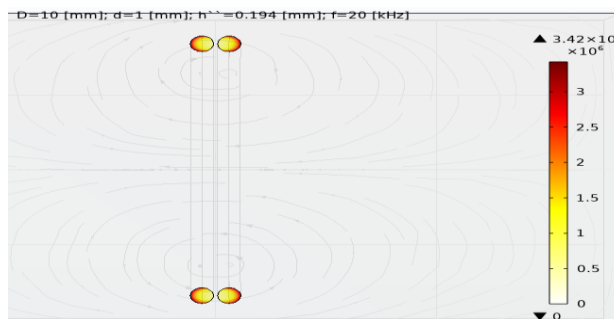


Рисунок 1.5 – Ілюстрація міжвиткового ефекту близькості на прикладі двохвиткової обмотки зі струмом у середовищі кінцево-елементного аналізу (розроблено автором)

Згортання провідника зі струмом у кільце спричиняє появу так званого *кільцевого ефекту* (далі використовуватимемо термін «*самоефект близькості*»), який є різновидом ефекту близькості. Суть ефекту полягає у концентрації струму у провіднику поблизу внутрішньої частини витка. Такий розподіл відповідає випадку, зображеному на рис. 1.3 б, коли у двох сусідніх провідниках струми протікають у протилежних напрямках. Розподіл струму у провіднику, згорнутого у кільце (круглий виток), у різних проекціях, зображено на рис. 1.6 а, б.

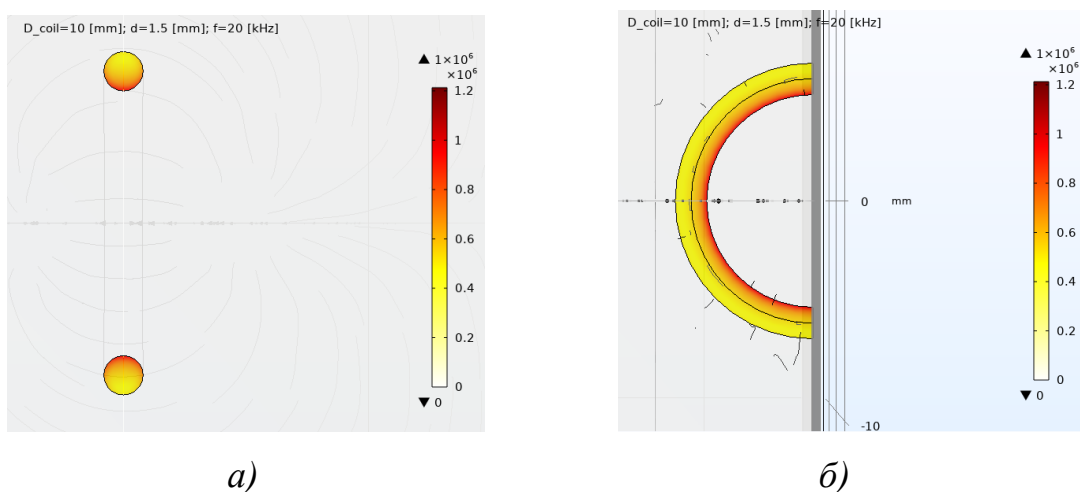


Рисунок 1.6 – Ілюстрація самоефекту близькості на прикладі витка зі струмом у середовищі кінцево-елементного аналізу (*розроблено автором*)

На практиці, для мінімізації ефекту близькості, вдаються до збільшення діаметра витка, відстані між сусідніми витками (кроку намотки), відстані між шарами. На прояв ефекту близькості впливає також і поверхневий ефект, тому вжиття заходів, спрямованих на мінімізацію останнього дозволить зменшити і прояв ефекту близькості [16].

## 1.2. Методики розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та витка зі струмом

Одним із основних параметрів будь-якого індуктивного елемента, у тому числі й силових, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот, є індуктивність обмотки та добротність. Згідно із визначенням, добротність

обмотки індуктивного елемента  $Q$  з індуктивністю  $L$  на частоті  $f$  рівна відношенню реактивного опору обмотки  $X_L$  на вказаній частоті до опору втрат  $R_{loss}$  (або опору змінному струму  $R_{AC}$ ):

$$Q = \frac{X_L}{R_{loss}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{R_{AC}} \quad (1.16)$$

де  $Q$  – добротність обмотки;

$X_L$  – реактивний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

$R_{loss}$  – опір втрат обмотки (еквівалентний опору обмотки змінному струму  $R_{AC}$ ), Ом;

$f$  – частота, Гц.

$L$  – індуктивність обмотки, Гн;

Таким чином, коректний розрахунок (чи вимірювання) індуктивності разом із відомою добротністю дозволяє визначити і опір втрат обмотки індуктивного елемента.

Розглянемо відомі методики розрахунку індуктивності провідників. Попередньо визначимо, що аналізу піддаватимуться методики розрахунку індуктивності провідників круглого перерізу (як найбільш поширених на практиці) в області низьких частот.

### **1.2.1. Методика розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та її аналіз**

Як правило, при розрахунку індуктивності  $L$  провідника вважають, що загальна індуктивність складається із індуктивності зовнішньої та індуктивності внутрішньої. Пояснюється це тим, що області магнітного поля всередині та зовні провідника утворюють, відповідно, внутрішнє та зовнішнє потокозчеплення. Таким чином, індуктивність прямого одиночного круглого провідника, згідно з [17] можна представити як:



$$L = L_{outside} + L_{inside} \quad (1.17)$$

де  $L$  – індуктивність прямого одиночного провідника, Гн;

$L_{outside}$  – зовнішня індуктивність прямого одиночного провідника, Гн;

$L_{inside}$  – внутрішня індуктивність прямого одиночного провідника, Гн.

Таким чином, розписавши кожен із доданків, отримаємо кінцевий вираз для розрахунку індуктивності прямого одиночного провідника:

$$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot l_{wire}}{8\pi} + \frac{\mu_0 \cdot l_{wire}}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{4 \cdot l_{wire}}{d} - 1 \right) = \frac{\mu_0 \cdot l_{wire}}{2\pi} \left( \ln \frac{4 \cdot l_{wire}}{d} - 0.75 \right) \quad (1.18)$$

де  $L$  – індуктивність прямого одиночного провідника, Гн;

$\mu$  – магнітна проникність матеріалу провідника (для міді  $\mu = 1$ );

$\mu_0$  – магнітна стала ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);

$l_{wire}$  – довжина провідника, м;

$d$  – діаметр провідника, м.

Більш детально виведення виразу (1.18) наведено у [17] і для спрощення тут не наводиться. Аналізуючи даний вираз на предмет коректності отриманого кінцевого результату, можна зробити висновок, що на розрахункове значення індуктивності, судячи із виразу, не впливає розподіл струму у перерізі провідника, що, звісно не відповідає дійсності. Оскільки з ростом частоти, за рахунок впливу поверхневого ефекту, глибина проникнення струму вглиб провідника зменшуватиметься, зростатиме і опір проходження струму. Можна припустити, що змінюватиметься і величина індуктивності провідника, причому, очікувано, з ростом частоти вплив поверхневого ефекту на індуктивність лише зростатиме.

### 1.2.2. Методики розрахунку індуктивності одиночного круглого витка та їх аналіз

Тепер розглянемо індуктивність провідника зі струмом, згорнутого у кільце, що має набагато більшу практичну цінність, ніж індуктивність прямого

одиначного провідника, та дозволить у подальшому змодельовати обмотки реальних індуктивних елементів.

Методи розрахунку індуктивностей кільцевого витка зі струмом представлені у [17] та відрізняються підходами, спрощеннями та допущеннями, тому їх розгляд та аналіз викликає значний науковий інтерес та теоретичну цінність, у тому числі при роботі над даною дисертацією. Нижче буде наведено лише кінцеві вирази розрахунку індуктивностей, виведення яких буде упущено у межах даного розділу.

У підході, описаному в [18], для виведення виразу індуктивності витка вирішено плоску задачу для обмотки, яка представлена у вигляді суцільної фольги нескінченної ширини. У подальшому, область вирішення плоскої задачі розширено на круглі провідники, які замінені еквівалентними провідниками квадратної форми рівної площі поперечного перерізу. Дане допущення було поширене на багатовиткову багат шарову обмотку, кінцевий вираз для індуктивності якої має вигляд:

$$L = \frac{\mu_0 (m + 0.5)^3 \cdot N^2 \cdot h \cdot l}{3b} \quad (1.19)$$

де  $L$  – індуктивність обмотки, Гн;

$\mu_0$  – магнітна стала ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);

$m$  – кількість шарів обмотки;

$N$  – кількість витків в одному шарі;

$h$  – висота провідника (квадратного перерізу), м;

$l$  – довжина намотки, м;

$b$  – ширина намотки, м.

Проаналізуємо даний метод. Виходячи із розгляду виразу (1.19) бачимо, що впливом товщини ізоляції провідника та діаметром витка було знехтувано. Зауважимо, що товщина ізоляції впливатиме на міжвитковий та міжшаровий ефект близькості, а діаметр витка на самоефект близькості, що, у свою чергу,

визначатиме розподіл струму у перерізі провідника та теоретично впливатиме на величину індуктивності обмотки.

У методиці [17], на відміну від попередньої, уже пропонується враховувати діаметр обмотки індуктивного елемента, тим самим брати до уваги вплив самоефекту близькості на кінцевий результат розрахунків. Розрахунок індуктивності обмотки за даною методикою здійснюється за виразом:

$$L = \mu_0 \cdot R \left[ \ln \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} + \frac{r^2}{8R^2} \left( \ln \frac{8R}{r} + \frac{1}{3} \right) \right] \quad (1.20)$$

де  $L$  – індуктивність обмотки, Гн;

$\mu_0$  – магнітна стала ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);

$R$  – радіус витка, м;

$r$  – радіус провідника (без ізоляції), м.

Також, аналізуючи вираз (1.20) бачимо, що не враховано вплив товщини ізоляції провідника, тому впливом міжвиткового та міжшарового ефекту близькості на розподіл струму у провіднику знехтувано, що теоретично впливатиме на коректність кінцевого результату.

Загалом, у методиках [17] та [18] не враховано зміну струмопровідної області при згортанні провідника у кільце, тобто, знехтувано впливом ефекту близькості, механізм виникнення якого було описано раніше. Нехтування таким явищем неминуче призведе до виникнення значної похибки у результаті розрахунку, яка, окрім того, теоретично зростатиме з підвищенням частоти.

Самоефект близькості, однак, було враховано у методиці [19], де аналітичним способом було виявлено, що у провіднику зі струмом, згорнутого у кільце, найбільша густина струму спостерігатиметься у внутрішній частині витка, що цілком узгоджується із результатами моделювання, представлених раніше на рис. 1.6.

Розглянемо вираз для розрахунку індуктивності витка зі струмом за згаданою методикою для випадку, коли діаметр провідника набагато менше

діаметра витка ( $d \ll D_{coil}$ ):

$$L = 4\pi R \left( \ln \frac{8R}{r} - 2 \right) \quad (1.21)$$

де  $L$  – індуктивність обмотки, Гн;

$R$  – радіус витка, м;

$r$  – радіус провідника (без ізоляції), м.

Суттєвим недоліком методу є те, що задача була вирішена лише для одного витка, тому при спробі поширити результати на багатовиткову та багатошарову обмотку ефект близькості не буде враховано, що значно вплине на точність кінцевого результату.

Отже, проаналізувавши найбільш відомі підходи до розрахунку індуктивності обмотки, бачимо, що кожна має свої суттєві недоліки. Як правило, для інженерних розрахунків їх точності достатньо, але для розрахунку обмоток силових індуктивних елементів, через обмотку яких протікають значні струми, застосування даних підходів не дозволить дати коректну оцінку втрат в обмотці. Тому вдосконалення методик розрахунку індуктивності з врахуванням особливостей розподілу струму у поперечному перерізі провідника індуктивних елементів є досить актуальною задачею [20].

### **1.3. Методики розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів. Критичний аналіз**

У практичній діяльності, для розрахунку величини втрат індуктивних елементів застосовується ряд методик. За способом врахування впливу поверхневого ефекту та ефекту близькості на величину втрат обмотки класифікуємо згадані методики розрахунку на *графо-аналітичні* та *аналітичні*.

В основу графо-аналітичних методик (описаних зокрема у [21]) покладено використання сімейства кривих, розрахованих за певними аналітичними виразами для конкретних випадків. Основними недоліками, які обмежують застосування таких методик для розрахунку індуктивних елементів,

є побудова сімейства кривих у логарифмічному масштабі, чутливому до похибок, де навіть її невелике значення по вісі абсцис дає суттєве відхилення по вісі ординат, а також неможливість оптимізації розрахункових виразів.

Найбільш зручними, універсальними та придатними до оптимізації вважаються аналітичні методики. На відміну від графо-аналітичних методик, опис впливу на величину втрат тих чи інших факторів відбувається безпосередньо з використанням конкретних геометричних параметрів обмотки. З відомих на даний момент аналітичних методик, що використовуються для розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів, в тому числі і в ультразвуковому діапазоні частот, є методика [18], запропонована *P.L.Dowell* та її модифікований варіант [22], запропонований *J.A. Ferreira*. Додатково для загального ознайомлення, також розглянемо і підхід, описаний в [19], але у подальших дослідженнях його не використовуватимемо.

Передумовою початку даного дослідження стало виявлення значного перегріву обмотки дроселя узгоджуючого *LC*-фільтра ультразвукового пристрою великої потужності, розрахованої за аналітичними методиками [18], [22]. Виходячи з цього, зроблено висновок, що результати розрахунків за вказаними методиками для даного випадку є некоректними.

Аналізуючи ряд більш сучасних публікацій, присвяченим розрахунку втрат в обмотках індуктивних елементів, визначено, що основні результати досліджень в цілому базуються на працях [18] та [22]. Наприклад, у праці [23] запропоновано точну аналітичну модель втрат для літцендрату, яка базується на аналітичному виразі методики [18] шляхом введення відповідних поправочних коефіцієнтів у вираз. Однак експериментальної перевірки теоретичної моделі не проводилося. У праці [24] виконано 2D моделювання обмоток у середовищі FEM аналізу, з подальшою модифікацією розрахункового виразу методики [18], відповідно до даних моделювання. Отриманий вираз описує теоретичну модель, експериментальна перевірка також відсутня. У праці [25] в рамках дослідження процесів, що впливають на втрати в індуктивних елементах ІДЖ, за основу взято розрахунковий вираз

методики [18]. Отримані теоретичні результати порівнювалися із симуляцією. Експериментальної перевірки не наведено. У праці [26] для аналізу та розрахунку втрат на вихрові струми в електричних машинах також використано методики [18] та [22], теоретичні результати розрахунків за якими порівнювалися із результатами FEM моделювання, яким замінено експериментальну перевірку. Остання також відсутня. У праці [27] виконано оцінку втрат в обмотках трансформаторів від вихрових струмів. Використано положення методики [18]. Експериментальна перевірка точності розрахунків за отриманим виразом відсутня.

Перед аналізом розрахункових виразів даних методик, пояснимо певну специфіку використання цих методик для розрахунку індуктивних елементів у складі різних силових пристроїв, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот. Як було зазначено у *Вступі*, силові індуктивні елементи в ультразвуковому діапазоні частот працюють у складі дроселів УФ потужних ультразвукових технологічних установок та як накопичувальні елементи (дроселі) у складі імпульсних джерел живлення.

У випадку розрахунку величини втрат обмоток накопичувальних дроселів імпульсних джерел живлення з використанням методик [18] та [22], варто врахувати, що через їх обмотку протікає струм з переважаючою постійною складовою, вплив на опір втрат змінної складової незначний ( $<30\%$ ), тому точності результатів розрахунку за вказаними методиками цілком достатньо, і наявна похибка проявляється не сильно.

У випадку розрахунку величини втрат обмоток дроселів узгоджуючих фільтрів, необхідно враховувати, що через їх обмотку протікає струм із переважаючою змінною складовою, тому загальний опір втрат прямо визначатиметься втратами обмотки змінному струму. При розрахунку втрат обмотки таких дроселів за даними методиками, похибка проявляється уже в значній мірі. Додамо, що за цими методиками розраховувалися індуктивні елементи для відносно малопотужних пристроїв (5 Вт), через обмотки яких протікають невеликі струми, що також сприяє некритичному прояву похибки

вказаних методик розрахунку.

У випадку дроселів узгоджуючих фільтрів, виходячи з практичного досвіду, проектуються вони як правило для пристроїв великої потужності (100–500 Вт), тому зі зростанням величини струмів, що протікають в обмотці, починає проявлятися некоректність результату розрахунку за [18] та [22], результатом чого і є перегрів обмоток [28].

Тому, для попереднього визначення причин розходження між результатами розрахунків за вказаними методиками та практичними даними у випадку дроселів УФ ультразвукових пристроїв, розглянемо та проаналізуємо підходи до вирішення задачі розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів, реалізовані у методиках [18] та [22].

Отже, у вказаних методиках задача вирішена як плоска (одновимірна) для обмотки, яка представлена у вигляді суцільної фольги нескінченної ширини. У подальшому, область вирішення плоскої задачі розширено на круглі провідники, які замінені еквівалентними провідниками квадратної форми рівної площі поперечного перерізу (рис. 1.7).

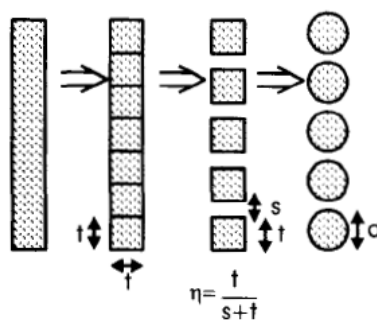


Рисунок 1.7 – Ідеалізоване представлення провідників обмотки індуктивного елемента у методиках [18] та [22]  
(Джерело: [22, с. 128])

З цього робимо висновок, що розрахункові вирази у [18], [22] виведені фактично для провідників квадратного перерізу, тому безпосереднє їх використовувати для розрахунку циліндричних провідників теоретично може призвести до появи похибки, оскільки розподіл струму у провідниках квадратної та циліндричної форм перерізу теоретично відрізнятиметься один

від одного навіть за однакових умов. Перевірку даного припущення проведемо у Розділі 2. Вирішення задачі як плоскої у розглянутих методиках теоретично може стати причиною не зовсім коректного врахування, чи навіть нехтування впливом певних геометричних параметрів обмотки на розподіл струму у провідниках витків, що стане причиною появи значної похибки у кінцевих результатах обчислень. Дослідження ступеня впливу згаданих геометричних параметрів обмотки на розподіл струму та, відповідно, величину втрат обмотки виконаємо у наступних розділах дисертації. Після попереднього аналізу підходів до вирішення задачі, застосованого у методиках, перейдемо до більш глибокого визначення причин розбіжності результатів розрахунків з експериментальними (практичними) даними. Для цього розглянемо та проаналізуємо відповідні аналітичні розрахункові вирази.

Зауважимо, що з метою зручності оцінки опору втрат, як правило, використовують безрозмірну величину втрат в обмотці, яка у даних методиках позначена як  $K_f$ :

$$K_f = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \quad (1.22)$$

де  $K_f$  – безрозмірна величина, що характеризує величину втрат обмотки;

$R_{AC}$  – опір обмотки змінному струму (дійсна частина комплексного опору) на частоті  $f$ , Ом;

$R_{DC}$  – опір обмотки постійному струму, Ом.

Перейдемо до розгляду та аналізу розрахункового виразу методики [18]:

$$K_f = \xi \cdot \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} + \frac{2 \cdot \xi}{3} \cdot (m^2 - 1)^2 \frac{\sinh(\xi) - \sin(\xi)}{\cosh(\xi) + \cos(\xi)} \quad (1.23)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{d}{\delta} \quad (1.24)$$

де  $\xi$  – допоміжний коефіцієнт (1.24);

$m$  – кількість шарів обмотки;

$d$  – діаметр провідника без ізоляції, мм;

$\delta$  – товщина скін-шару, мм.



У виразі (1.23) лівий доданок виражає вплив скін-ефекту на загальний опір втрат [29, с. 58-78]. Правий доданок описує явище взаємного впливу двох сусідніх провідників на розподіл струму в них (ефект близькості) [30].

Аналізуючи вираз (1.23), виявляємо, що не враховано вплив товщини ізоляції провідника (примусовий крок намотування). Тобто, не враховано вплив міжвиткового ефекту близькості для одношарової обмотки, оскільки, по-перше, при одношаровій обмотці ( $m = 1$ ) ефектом близькості взагалі знехтувано як таким; по-друге – у правій частині виразу відсутня змінна, що описує товщину ізоляції провідника чи відстань між витками.

Перейдемо до розгляду та аналізу розрахункового виразу методики [22]:

$$K_f = \frac{\xi}{2} \cdot \frac{\sinh(\xi) + \sin(\xi)}{\cosh(\xi) - \cos(\xi)} + \frac{\xi}{2} \cdot \eta^2 (2m-1)^2 \frac{\sinh(\xi) - \sin(\xi)}{\cosh(\xi) + \cos(\xi)} \quad (1.25)$$

$$\eta = \frac{d}{D_{wire}} \quad (1.26)$$

де  $\xi$  – допоміжний коефіцієнт, що розраховується за виразом (1.24);

$\eta$  – допоміжний коефіцієнт, що розраховується за виразом (1.26);

$m$  – кількість шарів обмотки;

$d$  – діаметр провідника без ізоляції, мм;

$D_{wire}$  – зовнішній діаметр провідника (з ізоляцією), мм.

Перейдемо до аналізу розрахункового виразу (1.25). Як бачимо, лівий та правий доданки описують ідентичні з виразом (1.23) явища. Однак у даному виразі модифіковано правий доданок шляхом внесення поправки для врахування загального ефекту близькості для одношарової обмотки таким чином, що при  $m = 1$  права частина виразу не дорівнює нулю. Також у виразі даної методики уже враховано вплив товщини ізоляції провідника (фактично міжвиткову відстань чи крок намотування) шляхом введення коефіцієнта  $\eta$  (1.26), який описує відношення діаметра провідника без ізоляції  $d$  до зовнішнього діаметра провідника (в ізоляції)  $D_{wire}$ , тобто враховано у певній мірі і вплив міжвиткового ефекту близькості.

У ході вивчення аналітичних методик [18] та [22], виявлено, що в обох методиках відсутня експериментальна перевірка результатів дослідження через ряд технічних труднощів, пов'язаних з вимірюваннями, що не дозволило на момент розробок даних методик перевірити коректність результатів дослідження на практиці. Тому, зроблено висновок, що можливою причиною появи невідповідності між результатами теоретичних розрахунків за відомим аналітичними виразами та відповідними експериментальними результатами може бути нехтування впливом геометрії обмотки на величину втрат в розглянутих методиках ([18, 22]) [9, 28].

Також, у ході аналізу методик виявлено, що не враховується вплив феромагнітного осердя на величину втрат обмотки, хоча теоретично, внесення осердя впливатиме на розподіл поля всередині обмотки та, відповідно, і на розподіл струму та величину втрат. Враховуючи той факт, що переважна більшість силових індуктивних елементів, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот, мають у своєму складі осердя із феромагнітних матеріалів для підвищення індуктивності обмотки, то розрахунок за вказаними методиками спричинить появу додаткової похибки у результатах обчислень. Відповідні дослідження впливу осердя на величину втрат одношарової обмотки проведемо у Розділі 3.

З метою загального ознайомлення та більшої повноти розгляду методик і підходів розрахунку величини втрат обмотки у межах даного розділу, пропонуємо розглянути підхід, описаний в [19]. Нагадаємо, що у розглянутих вище аналітичних методиках, де одним із вагомих недоліків визначено нехтування деякими геометричними параметрами обмотки (у т.ч. його діаметром). Цього вагомого недоліку частково позбавлений даний підхід. У ньому, шляхом розв'язання електродинамічної задачі зі знаходження розподілу поля навколо круглого витка зі струмом, із подальшим введенням кільцевих координат, розраховують густину струму, що протікає у даному кільці (одиначному круглому витку) та індуктивність такого витка. Зупинимось більш детально на тій частині методики, яка стосується знаходження густини струму.

У ході вирішення аналітичної задачі, було виведено вираз (1.27) для знаходження густини струму у круглому одиночному витку, який являє собою швидкозбіжний ряд:

$$\frac{4\pi}{c} \cdot j_i = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{A}{a^2} \cdot [2(ch(v) - \cos(\omega))]^{\frac{3}{2}} \cdot \left( \frac{1}{f_0} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4n^2 - 1} \cdot \frac{1}{f_n} \cdot \cos(n \cdot \omega) \right) \quad (1.27)$$

де  $j_i$  – густина струму у витку,  $A/m^2$ ;

$A$  – складова вектор-потенціалу ззовні та всередині витка (кільця);

$a$  – довжина дотичної від початку координат до кільця (рис.1.8), м;

$v$  та  $\omega$  – ортогональні циліндричні координати;

$f_n(v)$  – функція (1.29).

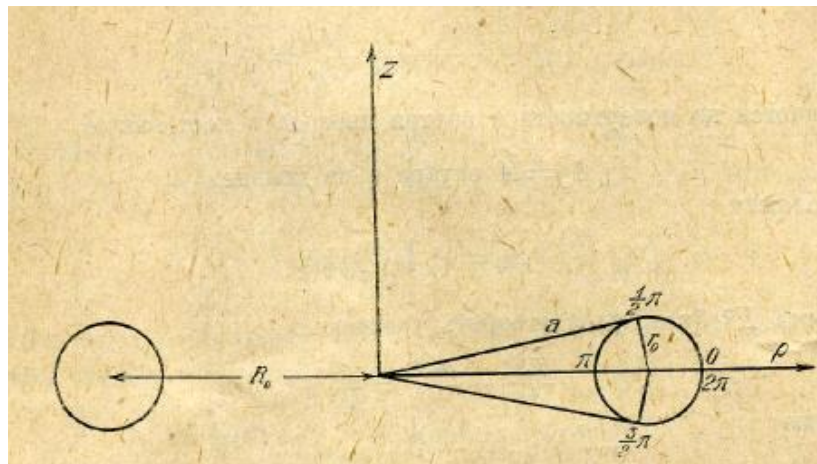


Рисунок 1.8 – Представлення поперечного перерізу витка у циліндричних координатах. Джерело: [19, с. 289]

Довжину дотичної із початку координат до кільця позначено як:

$$a = \sqrt{R_0^2 - r_0^2} \quad (1.28)$$

де  $a$  – довжина дотичної від початку координат до витка, м;

$R_0$  – радіус витка, м;

$r_0$  – радіус провідника, м.

Функцію  $f_n(v)$  від ортогональних кільцевих координат  $v$  описано як:

$$f_n(v) = \frac{1}{\pi} \int_{-v}^{+v} \sqrt{2(ch(v) - \cos(t))} \cdot ch \cdot nt \, dt \quad (1.29)$$

Із визначення функції  $f_n(\vartheta)$  (1.29) видно, що вона додатна, і при великих значеннях  $\vartheta$  швидко зростає по мірі збільшення значення коефіцієнта  $n$ . Вираз (1.27) показує, що густина струму найбільша при  $\omega = \pi$ , тобто із внутрішньої сторони кільця і найменша при  $\omega = 0$ , тобто із зовнішньої сторони (рис.1.8). Таким чином, приблизна кінцева формула для розрахунку густини струму у витку, яка у свою чергу, справедлива у випадку значного значення відношення  $R_0 / r_0$  та має вигляд:

$$\frac{4\pi}{c} \cdot j_i = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{A}{a^2} \cdot \frac{(2 \cdot ch(v_0))^{\frac{3}{2}}}{f_0} \cdot \left( 1 - \left( v_0 - \frac{1}{2} + 2 \cdot \lg 2 \right) \cdot \frac{\cos(\omega)}{ch(v_0)} \right) \quad (1.30)$$

де  $c$  – швидкість поширення світла, ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с);

$j_i$  – густина струму, А/м<sup>2</sup>;

$A$  – складова вектор-потенціалу ззовні та всередині витка;

$a$  – довжина дотичної від початку координат до кільця, м.

Однак, у випадку, коли  $ch(v_0) = \frac{R_0}{r_0} = 10$  вираз у круглих дужках (1.30) буде рівний  $1 - 0.388 \cdot \cos(\omega)$ . Таким чином, бачимо, що густина струму із внутрішньої сторони кільця перевищує густину струму на зовнішній приблизно удвічі. Це цілком узгоджується із результатами моделювання, представленими на рис. 1.6.

Основним недоліком даного підходу є вирішення задачі для одного витка, тобто поширення результатів розрахунків на багатовиткову чи багатошарову обмотку неможливе без спотворення кінцевого результату, оскільки у методі не враховано міжвитковий ефект близькості. Також у даному підході не враховано вплив феромагнітного осердя на розподіл струму у провіднику. Для виводу розрахункового виразу, у якому було б враховано у повній мірі геометричні

параметри обмотки (а також вплив феромагнітного осердя), можна, опираючись на даний підхід, вирішити аналітичним чином задачу розподілу струму у провідниках обмотки, однак даний спосіб є досить важким. Тому у даній роботі буде виконана спроба вирішення даної задачі для одношарової обмотки емпіричним шляхом для найбільш поширених геометричних параметрів індуктивних елементів та робочих частот з розрахунком відповідних коефіцієнтів, використовуючи за основу розглянуті вище аналітичні методики [18, 22].

#### **1.4. Висновок про необхідність проведення подальших досліджень**

Отже, підсумовуючи отримані результати аналізу найбільш поширених аналітичних методик розрахунку [18, 22] та на основі розгляду представлених у них розрахункових виразів, робимо висновок, що жодна з вказаних методик не враховує у повній мірі вплив ряду геометричних параметрів для одношарової обмотки (а саме діаметра обмотки, міжвиткової відстані, кількості витків (довжини обмотки)). Таким чином, у методиці [22] знехтувано як самофектом близькості, так і частково міжвитковим ефектом близькості, а для одношарової обмотки у випадку застосування методики [18] впливом ефекту близькості взагалі знехтувано як таким. В обох випадках, вказані упущення теоретично можуть стати причиною появи значної похибки у результатах розрахунку. Таким чином, важливим завданням є дослідження ступеня прояву та впливу на величину втрат обмотки вказаних геометричних параметрів для найбільш поширених практичних випадків.

На етапі попереднього аналізу вказаних методик визначено, що задача вирішувалася у них як плоска з подальшим її розширенням від обмотки, представленої у вигляді фольги на круглі провідники, які замінені еквівалентними провідниками квадратної форми рівної площі поперечного перерізу. Таким чином, висунуто припущення, що розрахункові вирази отримано для провідників квадратного перерізу, і застосування вказаних виразів для розрахунку обмоток, виконаних циліндричним провідником,

теоретично може внести похибку у результат. Тому важливим завданням також є дослідження впливу форми поперечного перерізу провідника на розподіл струму та величину втрат.

Також на розподіл струму у провідниках обмотки (відповідно і на величину втрат), теоретично може впливати і зміна конфігурації магнітного поля, спричиненого внесенням в обмотку феромагнітного осердя. Визначено, що у розглянутих вище методиках даний вплив не враховано взагалі. Тому виникає необхідність у дослідженні впливу феромагнітного осердя як на розподіл струму у провіднику, так і на ступінь впливу на величину втрат обмотки.

Отже, проведення подальших досліджень у роботі є важливою складовою як для повного розуміння ступеня прояву та впливу на величину втрат обмотки визначених геометричних параметрів обмотки, форми провідника та феромагнітного осердя в ультразвуковому діапазоні частот, так і для наступного максимально повного уточнення наявних розрахункових виразів вказаних методик для найбільш поширених практичних випадків.

Виходячи з цього визначимо мету та завдання дослідження в рамках даної дисертаційної роботи.

### **1.5. Мета та задачі дослідження**

*Метою дисертаційної роботи* є поглиблення теоретичних положень та розроблення практичних рекомендацій щодо коректного розрахунку втрат в одношарових обмотках силових індуктивних елементів, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот шляхом модифікації розрахункових виразів існуючих аналітичних методик розрахунку.

Досягнення мети передбачає вирішення наступних завдань:

1. Критичний аналіз існуючих аналітичних методик розрахунку величини втрат в обмотках індуктивних елементів;
2. Визначення ступеня впливу геометричних параметрів одношарової обмотки індуктивних елементів на розподіл струму у витках (величину втрат).

3. Аналіз шляхів уточнення наявних розрахункових виразів.

4. На основі даних, отриманих у ході попередніх досліджень, а також результатів експериментального дослідження обмоток без осердя з різними геометричними параметрами, здійснення уточнення (модифікації) розрахункових виразів наявних аналітичних методик.

### **Висновки до розділу 1**

На основі отриманих результатів проведеного аналізу у даному розділі, було зроблено наступні висновки:

1) відомі аналітичні методики [18, 22] для розрахунку одношарових обмоток необхідно використовувати з обережністю, оскільки при розрахунку величин втрат обмоток отримуємо некоректні результати, що проявляється у перегріві обмотки індуктивного елемента. Висунуто припущення, що можливою причиною цього є нехтування рядом геометричних параметрів одношарової обмотки на розподіл струму та, відповідно, на величину їх втрат;

2) у ході аналізу методик визначено, що методику [18] не можна використовувати для розрахунку одношарових обмоток індуктивних елементів, оскільки у цьому випадку нехтується впливом ефекту близькості як таким на величину втрат обмотки.

3) наявні методики розрахунку потребують додаткового дослідження впливу знехтованих у них геометричних параметрів на розподіл струму у провідниках обмотки та, відповідно, на величину їх втрат, з метою подальшого удосконалення виразів методик;

4) оскільки аналітичним шляхом задачу доповнення розрахункових виразів знехтованими раніше геометричними параметрами, вирішити важко, тому необхідно продовжити дослідження з метою уточнення розрахункових виразів для загальновживаних випадків, що і дозволить у подальшому врахувати геометричні параметри обмоток при розрахунку.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОДНОШАРОВОЇ ОБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ

#### 2.1 Визначення мети дослідження

У попередньому розділі здійснено аналіз найбільш поширених аналітичних методик розрахунку опору втрат обмоток індуктивних елементів, представлених методикою *Доуела (Dowell)* [18] та методикою *Ферера (Ferrera)* [22]. У ході аналізу розрахункових виразів (1.23), (1.25) методик, зроблено припущення, що ймовірною причиною розбіжності результатів теоретичного розрахунку за вказаними виразами та практичними (експериментальними) результатами є нехтування впливом геометричних параметрів обмотки на розподіл струму у провідниках та, відповідно, на опір втрат обмотки індуктивного елемента. Тому, відповідно до поставлених завдань наукової роботи, метою даного розділу стане дослідження впливу геометричних параметрів одношарової обмотки індуктивного елемента на величину втрат.

#### 2.2 Основна частина

Розглянемо більш детально можливі причини появи розбіжності між даними теоретичних розрахунків за методиками [18, 22] та експериментальними результатами. У попередньому розділі визначено, що у вказаних методиках вирішувалася плоска задача розподілу струму в обмотці, представленої у вигляді суцільної тонкої фольги нескінченної ширини, з наступним розбиттям її на круглі провідники, що замінені еквівалентними за площею поперечного перерізу провідниками квадратної форми. Тобто, теоретично, вирішення даної задачі як плоскої у вказаних методиках може стати причиною некоректного врахування впливу геометричних параметрів обмотки індуктивного елемента на розподіл струму у провідниках, та, відповідно, на величину втрат. В кінцевому результаті це призведе до появи значної похибки у результатах обчислень.



Перевірку даного припущення розпочнемо із дослідження впливу геометричних параметрів одношарових обмоток на величину втрат  $K_f$ . Для цього виконаємо порівняння теоретичних результатів розрахунку величини  $K_f$  за даними методиками та відповідними експериментальними результатами розрахунку цієї ж величини для обмоток з різними геометричними даними. Зауважимо, що натурні експериментальні вимірювання будуть замінені машинними у середовищі кінцево-елементного аналізу через гнучкість моделі та зручність роботи з нею. Зауважимо, що дослідження зазначених методик розрахунку у середовищі кінцево-елементного аналізу проводилися і раніше, зокрема у [31], [32], [33] однак, так само, як і в методиках [18, 22], виявлено відсутність експериментальної перевірки отриманих результатів моделювання, що є суттєвим недоліком.

Перед початком досліджень уточнимо, вплив яких саме геометричних параметрів обмотки на величину втрат буде досліджуватися та обґрунтуємо вибір їх величин, виходячи із практичного досвіду.

### 2.2.1 Обґрунтування вибору геометричних параметрів обмотки індуктивного елемента

Під поняттям «геометричні параметри обмотки» у цьому та наступних розділах дисертації матимемо на увазі наступні параметри: - *діаметр обмотки*  $D_{coil}$ ; - *діаметр провідника без ізоляції*  $d$ ; - *діаметр провідника з ізоляцією*  $D_{wire}$ ; - *крок намотування*  $h$ ; - *кількість витків обмотки*  $N$  (рис. 2.1).

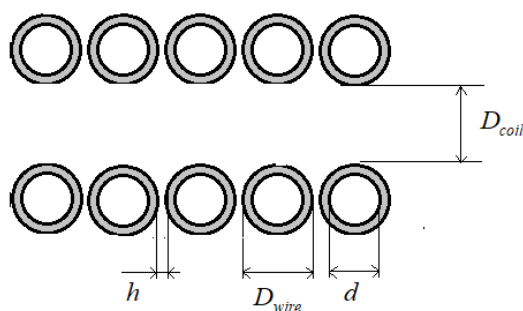


Рисунок 2.1 – Геометричні параметри одношарової обмотки індуктивного елемента без осердя (розроблено автором)

Обґрунтуємо вибір геометричних параметрів досліджуваних обмоток:

1) **Діаметр обмотки  $D_{coil}$** . Даний параметр залежатиме від зовнішнього діаметра каркасу (вплив товщини ізоляції провідника на діаметр обмотки у цьому випадку буде незначним, тому ним знехтуємо). У свою чергу, діаметр каркасу залежить від розмірів феромагнітного осердя, типорозмір якого розраховується залежно від потужності пристрою. На практиці, для виготовлення індуктивних елементів для імпульсних джерел живлення чи УФ ультразвукової апаратури використовують осердя марки *ETD*. Найбільш вживаними типорозмірами осердь для вказаних застосувань є: *ETD-59*, *ETD-49*, *ETD-39* та *ETD-29*. Для вказаних типорозмірів осердь, каркаси, що йдуть в комплекті з ними, матимуть наступні діаметри:  $D = 25 \text{ мм}$  (*ETD-59*),  $D = 20 \text{ мм}$  (*ETD-49*),  $D = 15 \text{ мм}$  (*ETD-39*),  $D = 10 \text{ мм}$  (*ETD-29*) [34]. Тому, у подальших дослідженнях, величини діаметрів витків  $D_{coil}$  оберемо рівними вказаним діаметрам каркасів. Зауважимо, що даний підхід справедливий лише для діаметрів одношарових обмоток чи першого шару багатошарових обмоток.

2) **Діаметр провідника без ізоляції  $d$** . Даний параметр розраховується, виходячи з площі поперечного перерізу циліндричного провідника  $S$  (2.1).

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \quad (2.1)$$

де  $d$  – діаметр циліндричного провідника без ізоляції,  $\text{мм}$ ;

$S$  – площа поперечного перерізу того ж провідника,  $\text{мм}^2$ .

У свою чергу, площа поперечного перерізу  $S$  розраховується залежно від величини струму  $I$ , що протікає через провідник обмотки та залежить від потужності  $U_3$  генератора. На практиці, дана потужність знаходиться в межах  $1 \dots 500 \text{ Вт}$ , а відповідні величини струму  $I$  лежать в межах  $0.15 \dots 4 \text{ А}$ . У практичних розрахунках значення густини струму у мідному провіднику обирають рівним  $j = 5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ , тому при вказаних величинах струмів  $I$ , площа поперечного перерізу циліндричного провідника  $S$  знаходитиметься в межах

$0.03 \text{ мм}^2 \dots 0.78 \text{ мм}^2$ . Здійснивши перерахунок за виразом (2.1), отримуємо, що діаметр провідника без ізоляції  $d$ , у цьому випадку, знаходитиметься у межах  $0.2 \text{ мм} \dots 1 \text{ мм}$ . У подальших дослідженнях розглядатимемо провідники чотирьох найбільш поширених на практиці діаметрів  $d$  ( $0.25 \text{ мм}$ ,  $0.5 \text{ мм}$ ,  $0.75 \text{ мм}$ ,  $1 \text{ мм}$ ).

**3) Діаметр провідника з ізоляцією  $D_{\text{wire}}$ .** У даному дослідженні в експериментальній частині (у натурному та машинному експериментах) використовуватимемо найбільш поширений і доступний одножильний обмотувальний провідник в емалевій ізоляції марки ПЕВ-1 та ПЕВ-2. Даний дріт застосовують при виготовленні обмотки індуктивних елементів, у тому числі й тих, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот. Окрім діаметра струмопровідної жили (діаметра провідника без ізоляції  $d$ ), одним із параметрів, який використовуватиметься у даному дослідженні є зовнішній діаметр провідника  $D_{\text{wire}}$  (рис. 2.1). Даний параметр прямо характеризує товщину ізоляції провідника  $a$ , яку можна розрахувати як:

$$a = \frac{D_{\text{wire}} - d}{2} \quad (2.2)$$

де  $d$  – діаметр циліндричного провідника без ізоляції, мм;

$D_{\text{wire}}$  – зовнішній діаметр циліндричного провідника з ізоляцією, мм.

Зазначимо, що для обраних у попередньому пункті провідників з діаметрами струмопровідних жил  $d$ , товщина ізоляції  $a$  буде неоднаковою. Наприклад, для провідника марки ПЕВ-1 з діаметрами струмопровідної жили  $d$  ( $0.25 \text{ мм}$ ,  $0.5 \text{ мм}$ ,  $0.75 \text{ мм}$ ,  $1 \text{ мм}$ ), зовнішній діаметр провідника в ізоляції буде рівний  $D_{\text{wire}}$  ( $0.284 \text{ мм}$ ,  $0.548 \text{ мм}$ ,  $0.809 \text{ мм}$ ,  $1.068 \text{ мм}$ ) відповідно. Товщина ізоляції, розрахована за виразом (2.2), для даного випадку становитиме  $a$  ( $0.017 \text{ мм}$ ,  $0.024 \text{ мм}$ ,  $0.03 \text{ мм}$ ,  $0.034 \text{ мм}$ ) відповідно. Для провідника марки ПЕВ-2 для таких самих діаметрів жили  $d$ , зовнішній діаметр провідника в ізоляції буде дещо більшим та рівний  $D_{\text{wire}}$  ( $0.301 \text{ мм}$ ,  $0.569 \text{ мм}$ ,  $0.832 \text{ мм}$ ,  $1.093 \text{ мм}$ ) відповідно. Товщина ізоляції, розрахована за виразом (2.2), для вказаного

провідника становитиме  $a$  (0.026 мм, 0.034 мм, 0.041 мм, 0.046 мм) відповідно [35].

**4) Крок намотування  $h$ .** Як правило, провідники обмоток індуктивних елементів укладаються щільно, без зазору. У цьому випадку, крок намотування  $h$  рівний нулю, а відстань між жилами сусідніх витків дорівнює подвійній товщині ізоляції. Однак, інколи виникає потреба у зменшенні втрат у провідниках обмотки в межах одного шару, спричинених міжвитковим ефектом близькості. У цьому випадку збільшують відстань між сусідніми витками шляхом введення примусового кроку намотування. На практиці, як правило, величину кроку обирають не більше  $h = 0.1$  мм, тому це значення і використовуватимемо у даному дослідженні.

**5) Кількість витків обмотки  $N$ .** На практиці кількість витків обмотки обмежується, головним чином, довжиною каркасу, діаметром провідника в ізоляції та примусовим кроком намотування. Однак для проведення більш детального дослідження впливу кількості витків на величину втрат, вирішено не вводити обмеження на кількість витків (довжину обмотки) залежно від довжини конкретного каркасу. Тому, дослідження проводитимуться для одношарових обмоток з кількістю витків до  $N=70$ .

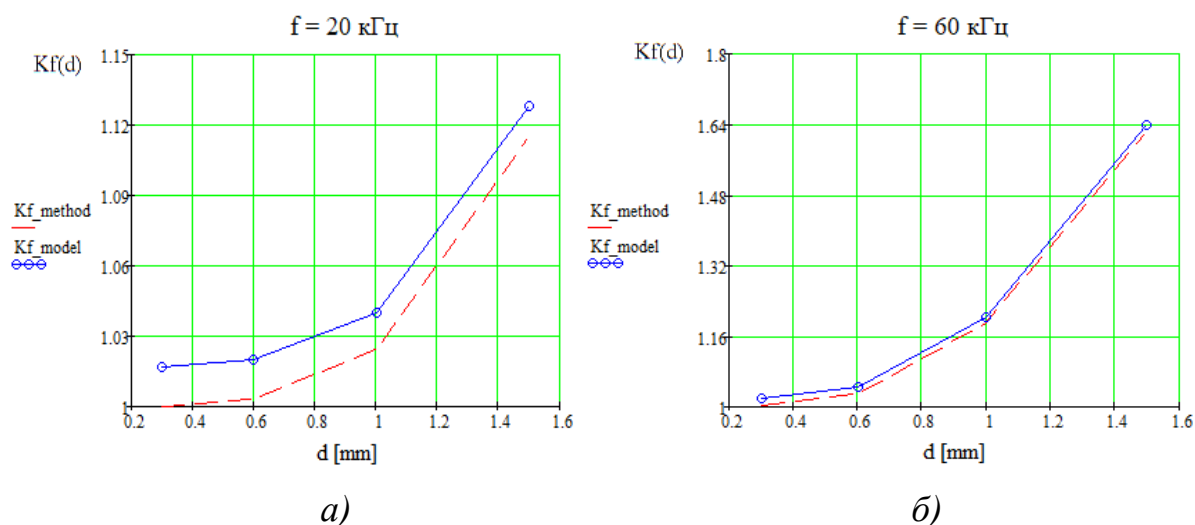
Отже, після вибору та обґрунтування геометричних параметрів обмотки, перейдемо до дослідження їх впливу на величину втрат одношарової обмотки індуктивного елемента. Оскільки, як було зазначено вище, натурні експериментальні вимірювання замінено відповідними машинними, виникає необхідність у перевірці адекватності моделі та коректності отриманих результатів.

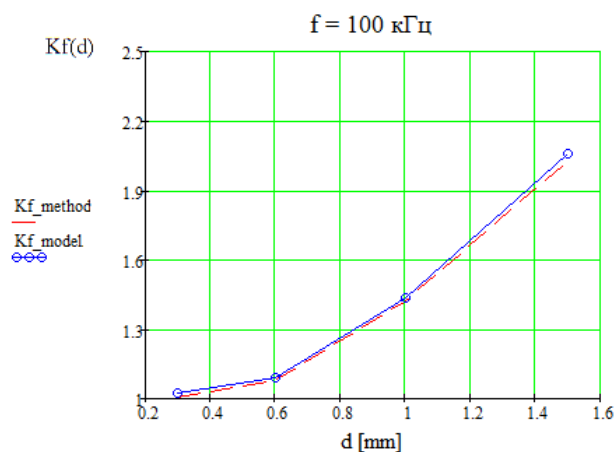
### **2.2.2 Перевірка адекватності машинної моделі обмотки у середовищі кінцево-елементного аналізу**

Для даної перевірки розглянемо прямий циліндричний одиночний провідник. Вибір даної конфігурації провідника для перевірки дозволяє, *по-перше*, оцінити коректність розрахунків машинної моделі в обраному

середовищі симуляції, шляхом порівняння результатів симуляції з результатами відповідних розрахунків за відомими теоретичними виразами; *по-друге* – дозволяє оцінити коректність врахування у машинній моделі впливу скін-ефекту на розподіл струму у провіднику та, відповідно, величину втрат, оскільки для прямого одиночного провідника на величину втрат впливатиме лише скін-ефект, ефект близькості для такого провідника відсутній.

Виконаємо теоретичний розрахунок величини  $K_f$  (1.22) за відомими розрахунковими виразами (позначимо як  $K_{f\_method}$ ) та розрахуємо цю ж величину для машинної моделі даного провідника у середовищі кінцево-елементного аналізу (позначимо як  $K_{f\_model}$ ). Розрахунки проведемо для провідників довжиною  $l=50$  мм, з діаметрами жили  $d=0.3, 0.6, 1, 1.5$  мм на частотах  $f=20, 60, 100$  кГц. Для теоретичного розрахунку величини  $K_{f\_method}$ , згідно із її визначенням за виразом (1.22), необхідно розрахувати опір відповідного провідника постійному струму  $R_{DC}$  та опір змінному струму  $R_{AC}$  на відповідній частоті  $f$ . Опір провідника постійному струму  $R_{DC}$  розраховується за загальновідомим виразом (1.10). Опір одиночного циліндричного прямого провідника змінному струму на визначеній частоті розраховується за виразом (1.13). Зазначені вирази, а також результати проведених теоретичних та експериментальних вимірювань наведено у Додатку Б. На рис. 2.2 а, б, в представлено результати порівняння теоретично розрахованих величин  $K_{f\_method}$  з отриманими у результаті машинного експерименту величинами  $K_{f\_model}$ .





в)

Рисунок 2.2 – Порівняння результатів теоретичного розрахунку величини втрат  $K_f$  циліндричного одиночного прямого провідника діаметром  $d$  та

машинного експерименту на частотах:

$$f_1 = 20 \text{ кГц (а)}, f_2 = 60 \text{ кГц (б)}, f_3 = 100 \text{ кГц (в)}$$

(розроблено автором)

Проаналізуємо отримані результати. Як бачимо, криві  $K_f(d)$  мають однаковий характер на кожній з досліджуваних частот – величина втрат провідника  $K_f$  зростає з ростом його діаметра, що пояснюється відповідним збільшенням впливу скін-ефекту на розподіл струму у провіднику.

Виходячи із наведених вище графіків, визначено, що розбіжність кривих, які описують результати теоретичних розрахунків та машинного експерименту, залежно від діаметра провідника  $d$ , незначна та складає: 1.14%...1.63% (для частоти  $f=20$  кГц), 0.97%...1.63% (для частоти  $f=60$  кГц), 0.8%...1.6% (для частоти  $f=100$  кГц). Отже, робимо висновок, що машинний експеримент в обраному середовищі симуляції дає коректні результати та, окрім того, з достатньою точністю враховує вплив скін-ефекту на величину втрат прямого одиночного провідника.

Наступним кроком стане перевірка коректності результатів машинного експерименту при дослідженні одношарової багатовиткової обмотки. Вибір даної конфігурації провідника для перевірки дає можливість, по-перше, оцінити коректність розрахунків машинної моделі багатовиткової одношарової

обмотки в обраному середовищі симуляції, шляхом порівняння результатів симуляції з результатами відповідних натурних експериментальних досліджень; по-друге – дозволяє оцінити коректність врахування у машинній моделі впливу на розподіл струму у провіднику та, відповідно, величину втрат, в основному ефекту близькості (самоефекту близькості та міжвиткового ефекту близькості), оскільки для даної конфігурації провідника, вплив на розподіл струму у ньому матиме саме цей фактор.

Виконаємо розрахунок величини втрат  $K_f$  у процесі проведення машинного експерименту ( $K_{f\_model}$ ) та натурального експерименту ( $K_{f\_exp}$ ) для одношарової обмотки з кількістю витків  $N = 25$ , виконаної провідником діаметром  $d = 1$  мм. Діаметр обмотки приймемо рівним  $D = 10$  мм, відстань між жилами сусідніх витків приймемо рівною подвійній товщині ізоляції провідника, оскільки витки укладалися щільно, без примусового кроку. Натурні вимірювання виконаємо за допомогою *LCR/ESR*-метра *BK Precision 886* на двох частотах  $f_1 = 10$  кГц,  $f_2 = 100$  кГц. Даний вибір частот зумовлений тим, що прилад проводить вимірювання на ряді фіксованих частот, серед яких тільки вказані частоти належать до діапазону ультразвукових частот. В результаті проведення натурального експерименту отримано значення:  $K_{f\_exp1} = 1.197$ ;  $K_{f\_exp2} = 3.11$ . В результаті машинного експерименту для цієї ж обмотки отримали:  $K_{f\_model1} = 1.34$ ;  $K_{f\_model2} = 3.29$ .

У ході порівняння отриманих результатів визначено, що відносна розбіжність результатів натурального та машинного експериментів складає 11% (для  $f_1 = 10$  кГц) та 5.5% (для  $f_2 = 100$  кГц). Оскільки розбіжність знаходиться у допустимих межах та пояснюється похибкою приладу та вимірювання, тому робимо висновок, що машинний експеримент в обраному середовищі симуляції з достатньою точністю враховує вплив ефекту близькості (самоефекту близькості та міжвиткового ефекту близькості) на величину втрат.

Отже, підсумовуючи результати проведеної перевірки, робимо висновок, що отримані в ході машинного експерименту результати коректні, машинна модель адекватна, з достатньою точністю враховується вплив як скін-ефекту,

так і ефекту близькості. Тому у подальших дослідженнях натурні експериментальні вимірювання замінимо машинними у середовищі кінцево-елементного аналізу [9].

### 2.2.3. Дослідження впливу діаметра обмотки на величину втрат

При детальному розгляді у *Розділі 1* аналітичних методик розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів [18, 22], однією із виявлених причин можливої некоректності отриманих результатів розрахунку визначено нехтування впливом геометричних параметрів обмотки, зокрема її діаметром. Тому метою даного розділу стане дослідження впливу діаметра обмотки індуктивного елемента  $D_{coil}$  на його величину втрат  $K_f$ .

Дослідження розпочнемо із машинного експерименту (моделювання) одиночного круглого витка діаметром  $D_{coil}$ , згорнутого із прямого циліндричного провідника діаметром  $d$  та довжиною  $l$ . Причому, довжина прямого провідника розраховується як довжина витка (кільця) з діаметрами  $D_{coil1}=5$  мм,  $D_{coil2}=10$  мм,  $D_{coil3}=15$  мм,  $D_{coil4}=20$  мм (впливом товщини ізоляції провідника знехтуємо). Таким чином, довжина прямого провідника  $l$  складатиме:  $l_1 = 15.7$  мм;  $l_2 = 31.41$  мм;  $l_3 = 47.12$  мм;  $l_4 = 62.83$  мм. Діаметри провідників (струмопровідних жил) обрано рівними:  $d=0.3, 0.6, 1, 1.5$  мм. Машинний експеримент виконаємо у середовищі кінцево-елементного аналізу на частотах:  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц. Виконаємо моделювання (машинний експеримент) для прямих одиночних циліндричних провідників з довжинами  $l$ , діаметрами жили  $d$  (дані геометричні параметри провідників вказані вище). У ході машинного експерименту для кожного значення параметрів  $l$  та  $d$  на розраховується величина втрат провідника  $K_{f\_direct}$ . Розрахунок проведемо на кожній із вказаних вище частот  $f$ .

Наступним етапом дослідження стане проведення машинного експерименту для одиночних круглих витків, згорнутих із вказаних прямих провідників. У ході моделювання виконаємо розрахунок величини втрат витка  $K_{f\_circle}$  для кожного значення параметрів  $D_{coil}$  та  $d$  на кожній із вказаних вище



частот  $f$ . Далі за розрахованими величинами втрат обчислимо відносне відхилення величин втрат для одиночного круглого витка  $K_{f\_circle}$  та еквівалентного йому за довжиною прямого провідника  $K_{f\_direct}$  діаметрами  $d$ . При цьому відносне відхилення для кожного діаметра провідника  $d$  позначимо як  $\Delta\_d$ . На рис. 2.3 а, б, в приведено сімейство кривих залежності  $\Delta\_d$  від діаметра витка  $D_{coil}$ . Результати машинного експерименту для круглих витків та еквівалентних їм за довжиною прямих провідників та результати обчислення їх відносних відхилень наведено у Додатку В.

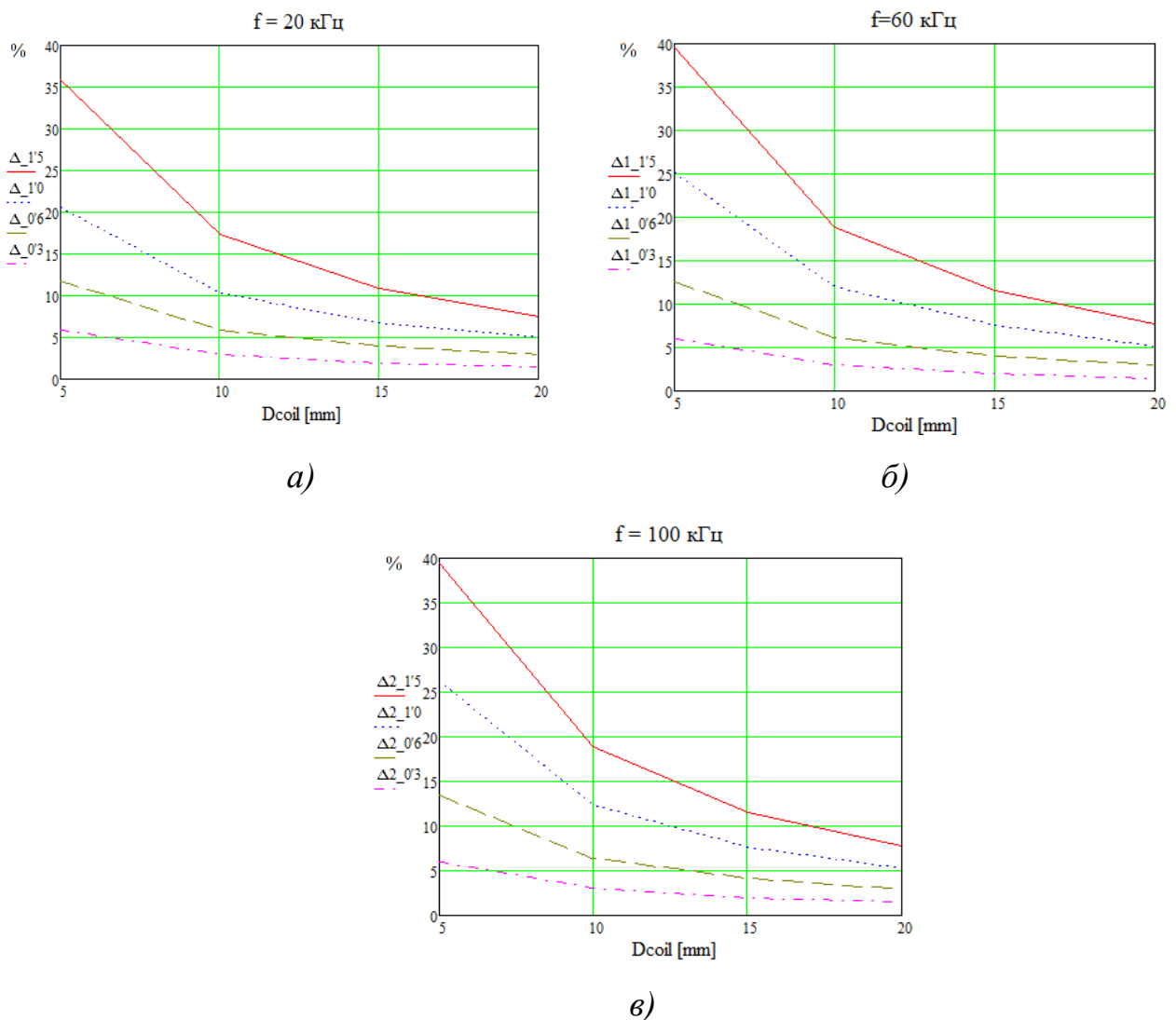


Рисунок 2.3 – Оцінка впливу діаметра обмотки на величину втрат  $K_f$  одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d$  на частотах:

$$f_1 = 20 \text{ кГц (а)}, f_2 = 60 \text{ кГц (б)}, f_3 = 100 \text{ кГц (в)}$$

(розроблено автором)

Проаналізуємо отримані результати. З рисунків бачимо, що вплив геометрії (діаметра) обмотки на величину її втрат зростає зі збільшенням діаметра провідника  $d$ , збільшенням частоти  $f$  та зменшенням діаметра витка  $D_{coil}$ . Залежно від частоти, вказаний вплив становитиме від 35% до 39.59% (при діаметрі витка  $D_{coil} = 5$  мм та діаметрі провідника  $d_1 = 1.5$  мм) та від 20.6% до 26.2% (при діаметрі витка  $D_{coil} = 5$  мм та діаметрі провідника  $d_2 = 1$  мм). Зі зменшенням діаметра провідника вплив геометрії (діаметра) обмотки на її величину втрат зменшується і, наприклад, для провідників діаметрами  $d_3 = 0.6$  мм та  $d_4 = 0.3$  мм становитиме від 11.7% до 13.5% та від 5.91% до 5.97% відповідно, залежно від частоти. У випадку провідника діаметром  $d_4 = 0.3$  мм, як бачимо, вплив діаметра обмотки на величину втрат, навіть за найменшого діаметра обмотки  $D_{coil} = 5$  мм, є незначним, тому ним можна знехтувати.

Варто зауважити, що на величину втрат одиночного витка впливатиме, окрім самоефекту близькості, також скін-ефект (хоч і в меншій степені, ніж самоефект близькості), вплив якого зростатиме з ростом діаметра провідника. Таким чином, найбільший сумарний вплив ефекту близькості та скін-ефекту (39.59%) спостерігатимемо за найменшого діаметра витка ( $D_{coil} = 5$  мм), де вплив самоефекту близькості є найбільшим, та для провідника з найбільшим діаметром ( $d_1 = 1.5$  мм), за якого вплив скін-ефекту також буде максимальним, але все ж меншим, ніж вплив самоефекту близькості.

Таким чином, виконано експериментальне підтвердження висунутого раніше припущення, що однією із причин некоректності результатів розрахунку за методиками [18, 22] є нехтування впливом геометрії (діаметра) обмотки на величину її втрат. У свою чергу, на величину втрат провідника напряму впливає розподіл струму у ньому, тому робимо припущення, що знехтувано зміною розподілу струму при згортанні провідника у кільце. Теоретично, якби розподіл струму не змінювався б при згортанні провідника, то величина втрат  $K_{f\_direct}$  для прямого провідника та величина втрат  $K_{f\_circle}$  для згорнутого з нього витка були б ідентичні та визначалися б виключно втратами від скін-ефекту. Однак проведені вище експериментальні дослідження показали

наявність значної розбіжності між величинами  $K_{f\_direct}$  та  $K_{f\_circle}$ , яка становить від 20.6% до 39.59%, залежно від частоти для найменшого діаметра витка  $D_{coil}$  (рис. 2.3 а, б, в). Зазначимо, що вказані розбіжності отримані для одного витка і при масштабуванні обмотки до багатовиткової вплив діаметра обмотки на величину її втрат проявлятиметься значно сильніше, тому його необхідно враховувати у розрахунках.

Вплив геометрії витка на величину її втрат  $K_f$  залежить від діаметра обмотки  $D_{coil}$  таким чином, що зі збільшенням величини  $D_{coil}$  цей вплив зменшується (для прикладу, для витка з діаметром  $D_{coil1}=5$  мм він становить 39.5%, а для витка з діаметром  $D_{coil4} = 20$  мм – уже 7.7%, при діаметрі провідника  $d_1 = 1.5$  мм в обох випадках). Отже, має місце явище зміни форми струмопровідної області провідника, згорнутого у кільце, тобто явище *самоефекту близькості*. Проілюструємо його на прикладі розподілу струму в одиночних круглих витках мінімального та максимального діаметрів ( $D_{coil1}=5$  мм та  $D_{coil4}=20$  мм відповідно), отриманого у ході проведення машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу для провідника діаметром  $d_1 = 1.5$  мм на частоті  $f=20$  кГц (рис. 2.4 а, б).

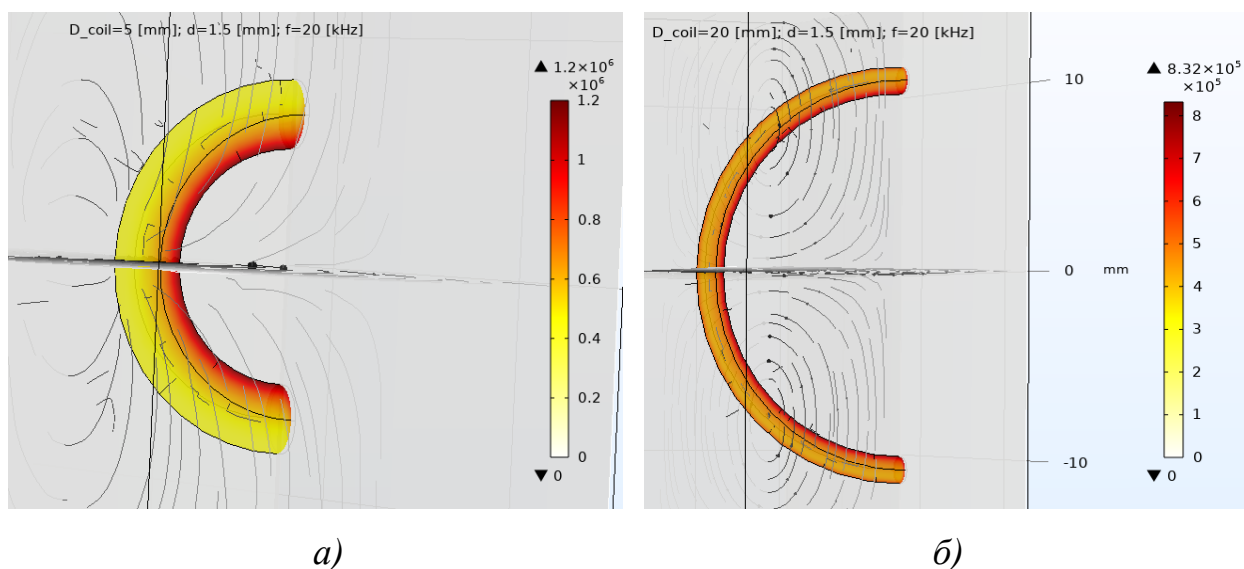


Рисунок 2.4 – Розподіл струму у поздовжньому перерізі одиночного круглого витка діаметром  $D_{coil1}=5$  мм (а) та  $D_{coil4}=20$  мм (б)

(розроблено автором)

Бачимо, при згортанні прямого провідника у кільце (виток), струмопровідна область концентрується поблизу його внутрішньої частини. Причому, за мінімального діаметра витка ( $D_{coil1}=5\text{ мм}$ ) спостерігаємо значно більшу густину струму, що протікає вказаною струмопровідною областю, ніж у випадку одиночного витка максимального діаметра ( $D_{coil4}=20\text{ мм}$ ), тобто чітко проявляється вплив діаметра витка на розподіл струму та, відповідно, на величину втрат у провіднику витка. Окрім того, дана область має значно меншу площу поперечного перерізу, ніж в еквівалентному прямому провіднику. Все це пояснює отриману значну розбіжність результатів, представлену на рис. 2.3 а, б, в [9, 36].

#### **2.2.4. Дослідження впливу міжвиткової відстані на величину втрат багатовиткової одношарової обмотки**

Нагадаємо, що у ході аналізу методик розрахунку величин втрат обмоток індуктивних елементів, проведеному у *Розділі 1*, виявлено, що одним із недоліків методики [18], який суттєво впливає на коректність результатів розрахунку, є повне нехтування впливом ефекту близькості як такого для одношарової обмотки. Вказане упущення було усунено у методиці [22]. Однак, виходячи з розрахункового виразу методики, визначено, що все ж знехтувано впливом відстані між сусідніми витками на величину втрат обмотки. Таким чином, завданням даного дослідження стане оцінка впливу міжвиткової відстані (тобто впливу міжвиткового ефекту близькості) на розподіл струму у сусідніх провідниках та, відповідно, на величину втрат багатовиткової обмотки в цілому.

У подальшому, під поняттям міжвиткової відстані розумітимемо відстань між струмопровідними жилами сусідніх витків  $h'''$  включно з товщиною ізоляції провідників  $a$  та примусовим кроком намотування  $h$  (рис 2.1).

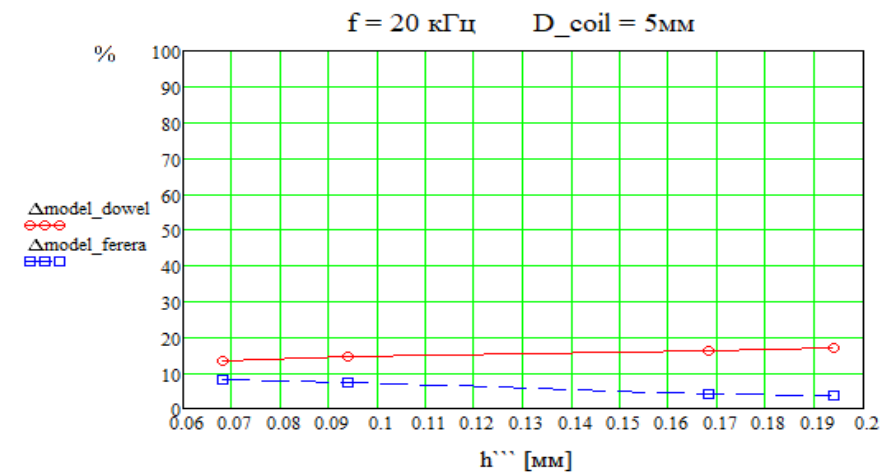
Дослідження полягатиме у проведенні машинного експерименту для багатовиткової одношарової обмотки з подальшим порівнянням отриманих результатів величин втрат обмотки із результатами теоретичного розрахунку

аналогічної обмотки за вказаними методиками. Також у дослідженні визначимо коректність врахування у згаданих методиках міжвиткового ефекту близькості на величину втрат обмотки.

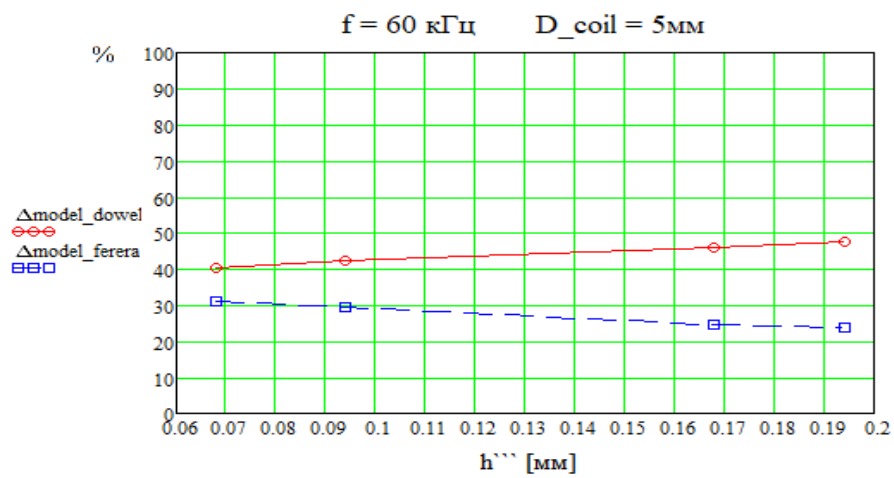
Розглянемо одношарову п'ятивиткову обмотку, виконану циліндричним провідником з діаметром жили  $d = 1$  мм з різною товщиною ізоляції  $a$  та введеним примусовим кроком намотування  $h$  (що, як зазначено вище, сумарно визначатиме відстань між жилами провідників сусідніх витків  $h''$  (міжвиткову відстань)).

Для дослідження вибрано наступні значення міжвиткових відстаней:  $h''_1 = 0.068$  мм,  $h''_2 = 0.094$  мм,  $h''_3 = 0.168$  мм,  $h''_4 = 0.194$  мм. Уточнимо, що вказані вище величини  $h''_1$  та  $h''_2$  відповідають подвійній товщині ізоляції провідників ПЕВ-1 та ПЕВ-2 відповідно, укладених щільно. Відстані  $h''_3$  та  $h''_4$  відповідають подвійній товщині ізоляції провідників та додатково введеного примусового кроку намотування  $h = 0.1$  мм. Дослідження проведемо для максимального ( $D_{coil4}=20$  мм) та мінімального діаметра обмотки ( $D_{coil1}=5$  мм) на трьох частотах:  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц.

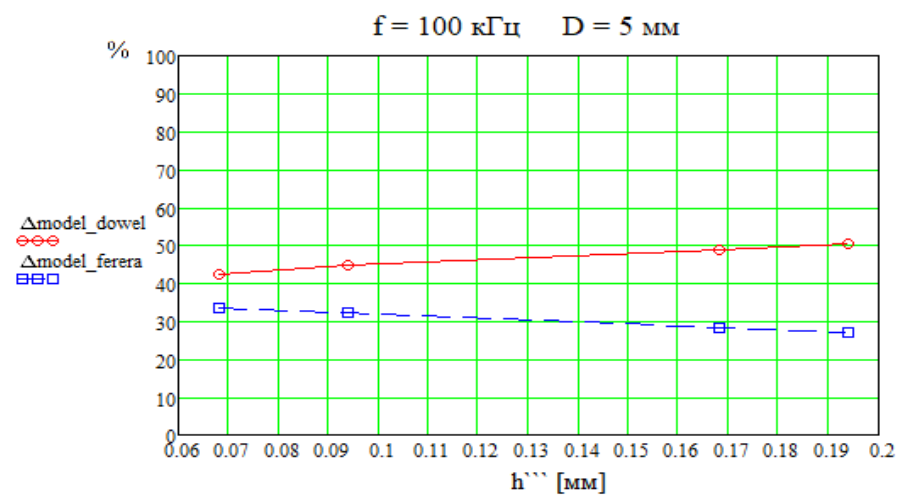
Розрахуємо відносне відхилення величини втрат  $K_f$  багатовиткової обмотки, отриманих у ході машинного експерименту ( $K_{f\_model}$ ) та величин втрат  $K_f$ , отриманих у ході теоретичних розрахунків за методиками [18, 22] ( $K_{f\_Dowel}$  та  $K_{f\_Ferrera}$ ). Розраховані відносні відхилення позначимо як  $\Delta_{model\_Dowel}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  відповідно. Детальні результати машинного експерименту та теоретичних розрахунків, а також розрахункові вирази та результати обчислення їх відносних відхилень наведено у Додатку Г. На рис. 2.5 а, б, в приведено криві залежностей відносного відхилення  $\Delta_{model\_Dowel}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  від міжвиткової відстані  $h''$ , розрахованих для мінімального ( $D_{coil1} = 5$  мм) діаметра обмотки на трьох частотах  $f$ .



а)



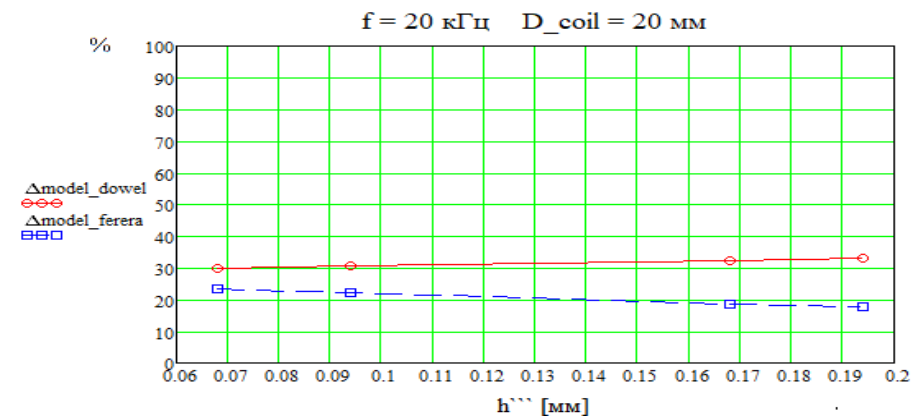
б)



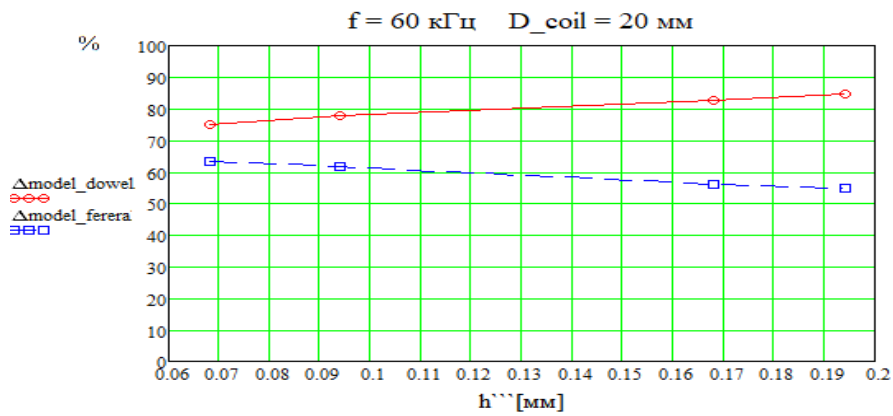
в)

Рисунок 2.5 – Відносне відхилення результатів машинного експерименту та теоретичного розрахунку при зміні міжвиткової відстані  $h'''$  для обмотки діаметром  $D_{\text{coil}} = 5 \text{ мм}$  на частотах: а)  $f_1 = 20 \text{ кГц}$ ; б)  $f_2 = 60 \text{ кГц}$ ; в)  $f_3 = 100 \text{ кГц}$  (розроблено автором)

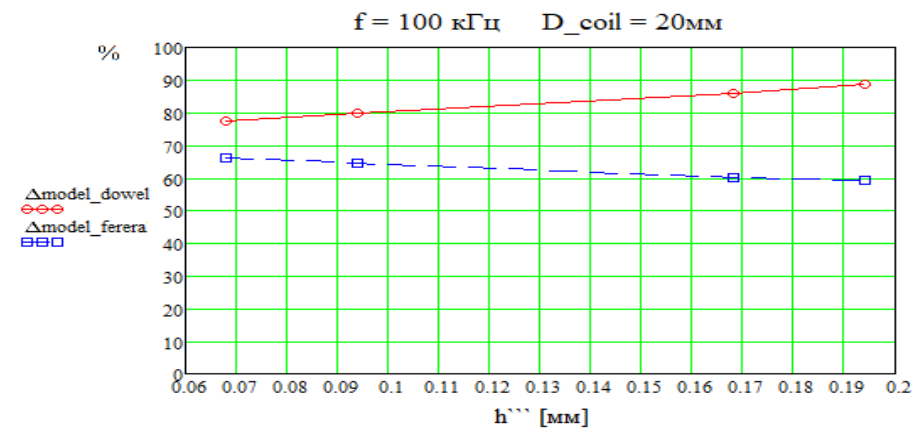
На рис. 2.6 а, б, в наведено криві залежностей відносних відхилень  $\Delta_{\text{model\_Dowel}}$  та  $\Delta_{\text{model\_Ferrera}}$  від міжвиткової відстані  $h'''$  для максимального ( $D_{\text{coil4}} = 20 \text{ мм}$ ) діаметра обмотки на трьох частотах  $f$ .



а)



б)



в)

Рисунок 2.6 – Відносне відхилення результатів машинного експерименту та теоретичного розрахунку при зміні міжвиткової відстані  $h'''$  для обмотки діаметром  $D_{\text{coil4}} = 20 \text{ мм}$  на частотах: а)  $f_1 = 20 \text{ кГц}$ ; б)  $f_2 = 60 \text{ кГц}$ ; в)  $f_3 = 100 \text{ кГц}$  (розроблено автором)

Проаналізуємо отримані результати. Оскільки дослідження проводилися для мінімального та максимального діаметрів обмотки  $D_{coil}$ , це дозволило додатково оцінити ступінь впливу геометрії (діаметра) обмотки (самоефекту близькості) на загальний ефект близькості. Отже, виконаємо аналіз результатів, отриманих для обмотки з мінімальним діаметром  $D_{coil1} = 5 \text{ мм}$  (тобто за максимального впливу самоефекту близькості) та представлених на рис. 2.5 а, б, в.

Бачимо, що величина відносного відхилення  $\Delta_{model\_Dowel}$  результатів машинного експерименту та теоретичних розрахунків за методикою [18] найбільша та, залежно від міжвиткової відстані  $h'''$ , знаходиться в межах від 13.44% до 17% (при  $f_1 = 20 \text{ кГц}$ ), від 40.34% до 47.6% (при  $f_2 = 60 \text{ кГц}$ ) та від 42.47% до 50.39% (при  $f_3 = 100 \text{ кГц}$ ), та, як бачимо, зростає з ростом частоти. Причиною появи такої суттєвої розбіжності між результатами машинного експерименту та розрахунками за методикою [18] є повне нехтування впливом ефекту близькості як таким на величину втрат одношарових обмоток.

Щодо величини відносного відхилення  $\Delta_{model\_Ferrera}$  результатів машинного експерименту та розрахунків за методикою [22], бачимо, що вона значно менша, ніж у випадку з методикою [18], та, залежно від міжвиткової відстані  $h'''$ , складає уже від 3.52% до 8.04% (при  $f_1 = 20 \text{ кГц}$ ), від 23.68% до 30.94% (при  $f_2 = 60 \text{ кГц}$ ) та від 27.05% до 33.39% (при  $f_3 = 100 \text{ кГц}$ ), та, як у попередньому випадку, зростає з ростом частоти. Зменшення величини відносного відхилення, порівняно з попереднім випадком, пояснюється врахуванням у методиці [22] впливу міжвиткового ефекту близькості на величину втрат обмотки, хоч і не в повній мірі (детальніше пояснення наведемо нижче).

При проведенні дослідження обмотки мінімального діаметра, залишається невідомо, який з ефектів проявляється та впливає на величину втрат найбільше – самоефект близькості чи міжвитковий ефект близькості. Для цього перейдемо до дослідження обмотки найбільшого діаметра ( $D_{coil4} = 20 \text{ мм}$ ). У цьому випадку вплив самоефекту близькості буде мінімальним (близько



5% для вказаного діаметра провідника (рис. 2.3 а, б, в)) і яким можна знехтувати. Результати дослідження представлено на рис. 2.6 а, б, в.

Як бачимо, у даному випадку, величина  $\Delta_{\text{model\_Dowel}}$  відносного відхилення результатів машинного експерименту та теоретичних розрахунків за методикою [18], як і в попередніх дослідженнях, найбільша та, залежно від міжвиткової відстані  $h''''$ , знаходиться в межах від 29.66% до 33.15% (при  $f_1 = 20$  кГц), від 74.97% до 84.57% (при  $f_2 = 60$  кГц) та від 77.28% до 88.56% (при  $f_3 = 100$  кГц). Як і у попередніх дослідженнях, причиною появи даної суттєвої розбіжності є незмінною – нехтування впливом ефекту близькості як таким на величину втрат одношарових обмоток.

У свою чергу, величина  $\Delta_{\text{model\_Ferrera}}$  відносного відхилення результатів машинного експерименту та розрахунків за методикою [22], є меншою, ніж у випадку з методикою [18], та, залежно від міжвиткової відстані  $h''''$ , складає уже від 17.8% до 23.49% (при  $f_1 = 20$  кГц), від 54.65% до 63.26% (при  $f_2 = 60$  кГц) та від 59.3% до 65.99% (при  $f_3 = 100$  кГц).

Таким чином, отримані результати ілюструють вплив міжвиткового ефекту близькості, який, як бачимо, досить значний. Оскільки у методиці [22], порівняно із методикою [18], враховано вплив ефекту близькості (а отже, і міжвиткової відстані) в цілому на величину втрат обмотки, тому, теоретично, розходження результатів машинного експерименту та теоретичних розрахунків повинне бути мінімальним. Однак, розрахована вище величина відносного відхилення  $\Delta_{\text{model\_Ferrera}}$  показує, що розходження є досить значним, тобто вплив міжвиткового ефекту близькості у методиці [22] враховано в певній мірі некоректно.

Зауважимо, що у подальших дослідженнях за основу братимемо лише методику [22], оскільки вона є максимально досконалою у випадку розрахунку одношарових обмоток, порівняно з методикою [18].

Однією із можливих причин даної розбіжності, виявленої у процесі машинного експерименту, є неідентичність розподілів струмів у крайніх та внутрішніх витках обмотки. Оскільки задача у методиці [22], нагадаємо,

вирішувалася як плоска, розподіл струмів у крайніх та внутрішніх витках шару було прийнято однаковим, що, як виявлено, є хибним підходом. На рис. 2.7 а, б проілюстровано розподіл струму у провідниках одношарової обмотки з мінімальною ( $h'''_1 = 0.068 \text{ мм}$ ) та максимальною ( $h'''_4 = 0.194 \text{ мм}$ ) міжвитковою відстанню.

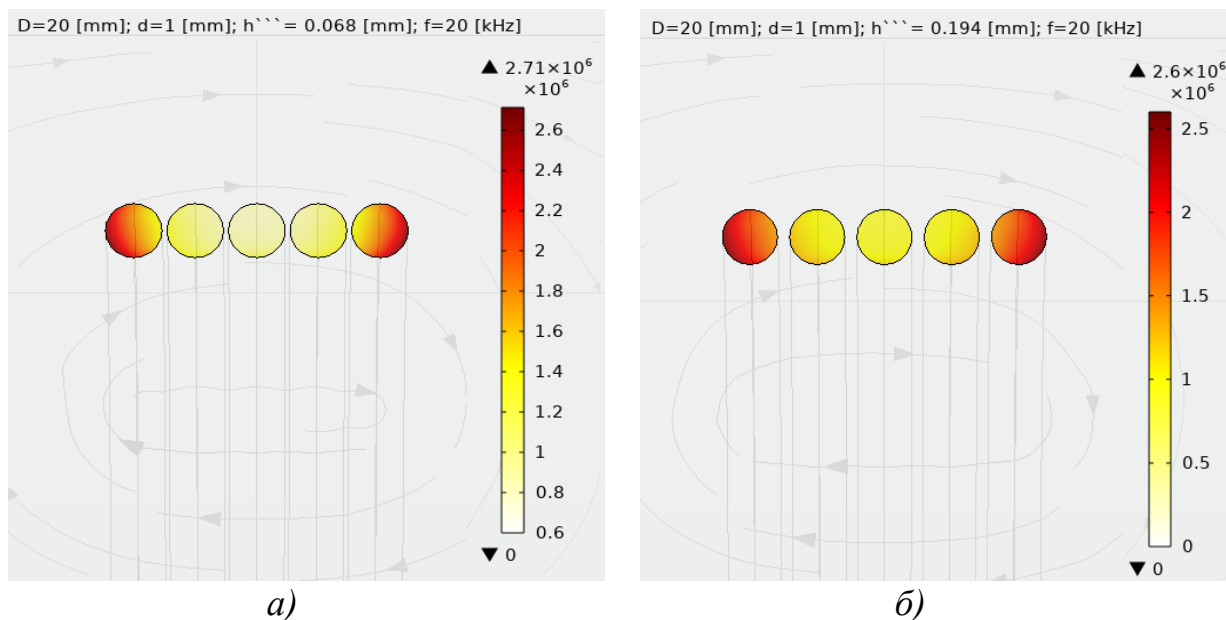


Рисунок 2.7 – Розподіл струму у провідниках одношарової п'ятивиткової обмотки з міжвитковою відстанню: а)  $h'''_1 = 0.068 \text{ мм}$ ; б)  $h'''_4 = 0.194 \text{ мм}$   
(розроблено автором)

З рисунків бачимо, що розподіл струму у зовнішніх та внутрішніх витках обмотки є нерівномірним – як і передбачалося, найбільша густина струму спостерігається у крайніх витках, менша – у внутрішніх. Також вказана нерівномірність проявляється тим більше, чим менша відстань між витками  $h'''$ . Також спостерігаємо явище витіснення струму у крайніх витках на зовнішню сторону провідника, яке зростає знову ж при зменшенні міжвиткової відстані.

Описаний розподіл струмів отримано для обмотки найбільшого діаметра ( $D_{coil4} = 20 \text{ мм}$ ), за якого вплив геометрії (діаметра) обмотки (а, відповідно, і самоефекту близькості) є мінімальним, тому дані рисунки ілюструють вплив на розподіл струму у витках обмотки виключно міжвиткового ефекту близькості, який, як бачимо, є значним, тому нехтування ним може спричинити появу

значної похибки у розрахунках [9].

### 2.2.5. Вплив форми перерізу провідника на розподіл струму у ньому

У ході досліджень, проведених вище, встановлено, що результати розрахунків величин втрат обмоток індуктивних елементів за визначеними відомими аналітичними методиками значно розходяться із результатами машинного експерименту. Однією із причин даних розходжень може стати некоректне врахування особливостей розподілів струмів у провідниках різних форм поперечного перерізу.

Враховуючи те, що у розглянутих аналітичних методиках розрахунку вирішувалася плоска задача для провідників квадратного перерізу, важливим є дослідження особливостей розподілу струму у даних провідниках та еквівалентних їм за площею поперечного перерізу циліндричних провідниках. Для цього виконаємо машинний експеримент у середовищі кінцево-елементного аналізу для одиночних прямих провідників, відповідно квадратного та циліндричного перерізів (рис. 2.8 а, б), одиночних круглих витків (рис. 2.9 а, б) та багатовиткових одношарових обмоток, виконаних з даних провідників (рис. 2.10 а, б). Також оцінімо вплив форми перерізу провідників на форму струмопровідної області та величину густин струмів, що протікають через них.

Розпочнемо із дослідження розподілу струму у прямих одиночних провідниках квадратної та циліндричної форми з рівними площами поперечного перерізу. Щодо геометричних параметрів провідників, визначимо їх наступним чином: діаметр жили круглого провідника оберемо рівним  $d = 1.5$  мм; висоту сторони квадратного провідника, виходячи із рівності площ поперечного перерізу, приймемо рівною  $a = 1.327$  мм; довжину провідників встановимо рівною  $l = 31.42$  мм. Дослідження проведемо на частоті  $f_l = 20$  кГц. Результати представлено на рис. 2.8 а, б.

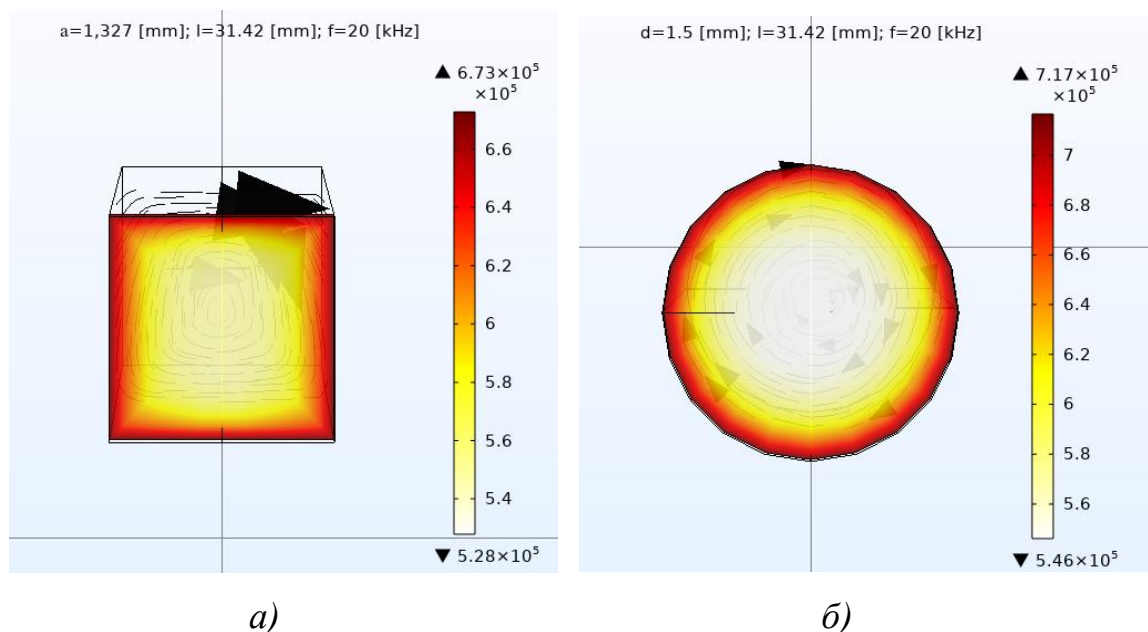


Рисунок 2.8 – Розподіл та густина струму у перерізі прямого одиночного провідника квадратної форми перерізу (а) та еквівалентного йому за площею перерізу прямого одиночного циліндричного провідника (б)  
(розроблено автором)

Бачимо, що у випадку із провідником квадратного перерізу, товщина струмопровідної області неоднакова по периметру, на відміну від циліндричного провідника, де вона рівномірно розподілена поблизу поверхні. Також звернемо увагу, що за однакових умов проведення машинного експерименту, густина струму, що протікає через провідник квадратного перерізу ( $j = 6.73 \times 10^5 \text{ A/m}^2 = 0.673 \text{ A/mm}^2$ ) менша, ніж у еквівалентному циліндричному провіднику ( $j = 7.17 \times 10^5 \text{ A/m}^2 = 0.717 \text{ A/mm}^2$ ) приблизно на 7 %. Також, додатково було розраховано величини втрат прямого одиночного провідника квадратного перерізу ( $K_{f\_quad}$ ) та відповідного прямого одиночного циліндричного провідника ( $K_{f\_cylindrical}$ ). Отримані результати (за вказаних умов дослідження) наступні:  $K_{f\_quad} = 1.0853$ ;  $K_{f\_cylindrical} = 1.1280$ . Як бачимо, за однакових умов проведення експерименту, величина втрат провідника квадратного перерізу буде меншою приблизно на 4 %, ніж у еквівалентному циліндричному провіднику, хоча й дана розбіжність незначна та нею, як правило, нехтують при розрахунках.

Вказані розбіжності та факт більшої товщини струмопровідної області (особливо поблизу кутів) пояснює, чому втрати від скін-ефекту в одиночному прямому провіднику квадратного перерізу ( $K_{f\_quad}$ ) дещо менші, ніж в еквівалентному йому за площею поперечного перерізу циліндричному провіднику ( $K_{f\_cylindrical}$ ).

Далі, прямі одиночні провідники згорнемо у кільце (одиночний круглий виток). Геометричні розміри провідників встановимо такі ж, як і у попередньому дослідженні, діаметр витка оберемо рівним  $D_{coil2} = 10$  мм. Дослідження проведемо на частоті  $f_l = 20$  кГц. Результати представлено на рис. 2.9 а, б.

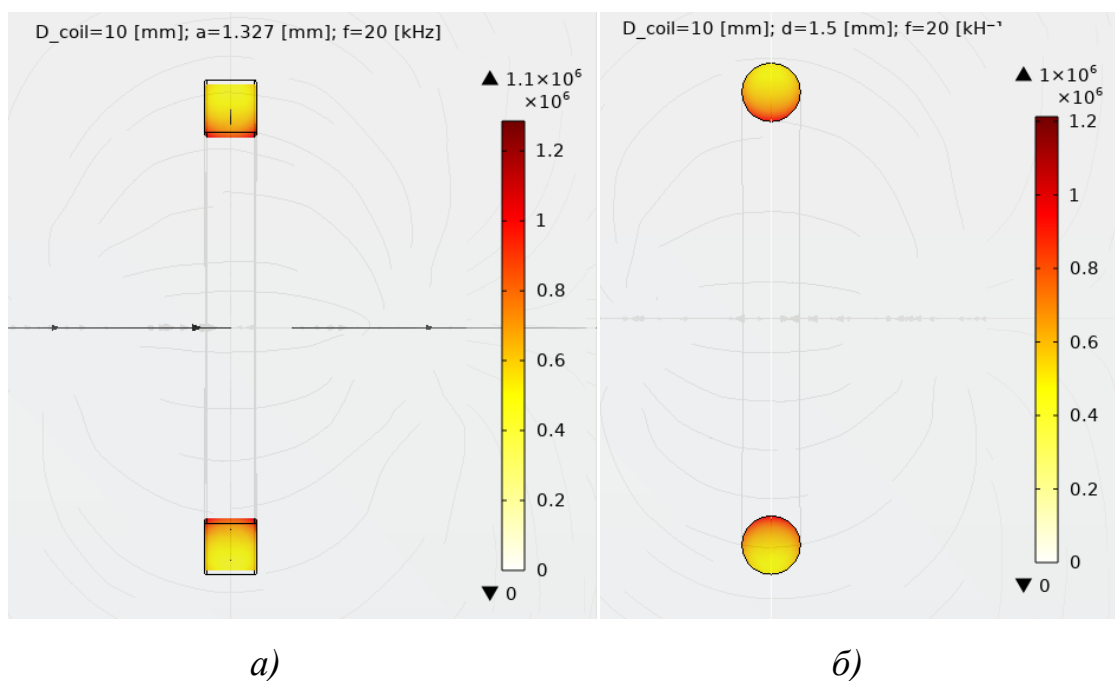


Рисунок 2.9 – Розподіл та густина струму у поперечному перерізі одиночного круглого витка, згорнутого з прямого провідника квадратної форми перерізу (а) та з еквівалентного йому за площею перерізу прямого циліндричного провідника (б)  
(розроблено автором)

Бачимо, що при згортанні прямого провідника у кільце, струмопровідна область змінює свою форму та площу – під дією самоєфекту близькості дана область зміщується з приповерхневих областей провідника до його внутрішньої

частини за обох форм поперечного перерізу. Також помітно, що площа провідної області у провіднику квадратного перерізу дещо більша, ніж у еквівалентному циліндричному провіднику. Це підтверджується дещо більшою густиною струму, що протікає через розглянутий провідник квадратного перерізу ( $j = 1.1 \times 10^6 \text{ A/m}^2 = 1.1 \text{ A/mm}^2$ ), ніж через еквівалентний циліндричний провідник ( $j = 1 \times 10^6 \text{ A/m}^2 = 1 \text{ A/mm}^2$ ), причому розбіжність між ними становить близько 9%.

Також, додатково було розраховано величини втрат одиночних витків, згорнутих з провідника квадратного перерізу ( $K_{f\_circle\_quad}$ ) та відповідного циліндричного провідника ( $K_{f\_circle\_cylindrical}$ ). Отримані результати (за вказаних умов дослідження) наступні:  $K_{f\_circle\_quad} = 1.3070$ ;  $K_{f\_circle\_cylindrical} = 1.3220$ . Як бачимо, величина втрат одиночного витка згорнутого з провідника квадратного перерізу буде меншою приблизно на 2.2 %, ніж у еквівалентному циліндричному провіднику.

Враховуючи отримані досить незначні розбіжності, умовно вважатимемо, що вплив геометрії (діаметра) обмотки (самоефекту близькості) за даних умов приблизно однаковий як для одиночного витка, згорнутого з квадратного провідника, так і для одиночного витка з циліндричного провідника.

Розглянемо розподіл струму у циліндричних та квадратних провідниках рівних площ перерізу, з яких виконана багатовиткова одношарова обмотка. Геометричні параметри провідників аналогічні попереднім дослідженням: діаметр жили круглого провідника рівний  $d = 1.5 \text{ мм}$ ; висота сторони квадратного провідника, виходячи із рівності площ поперечного перерізу, рівна  $a = 1.327 \text{ мм}$ . Дослідження проведемо для п'ятивиткової обмотки діаметром  $D_{coil2} = 10 \text{ мм}$ , міжвитковою відстанню  $h''_4 = 0.194 \text{ мм}$  на частоті  $f_l = 20 \text{ кГц}$ . Результати представлено на рис. 2.10 а, б.

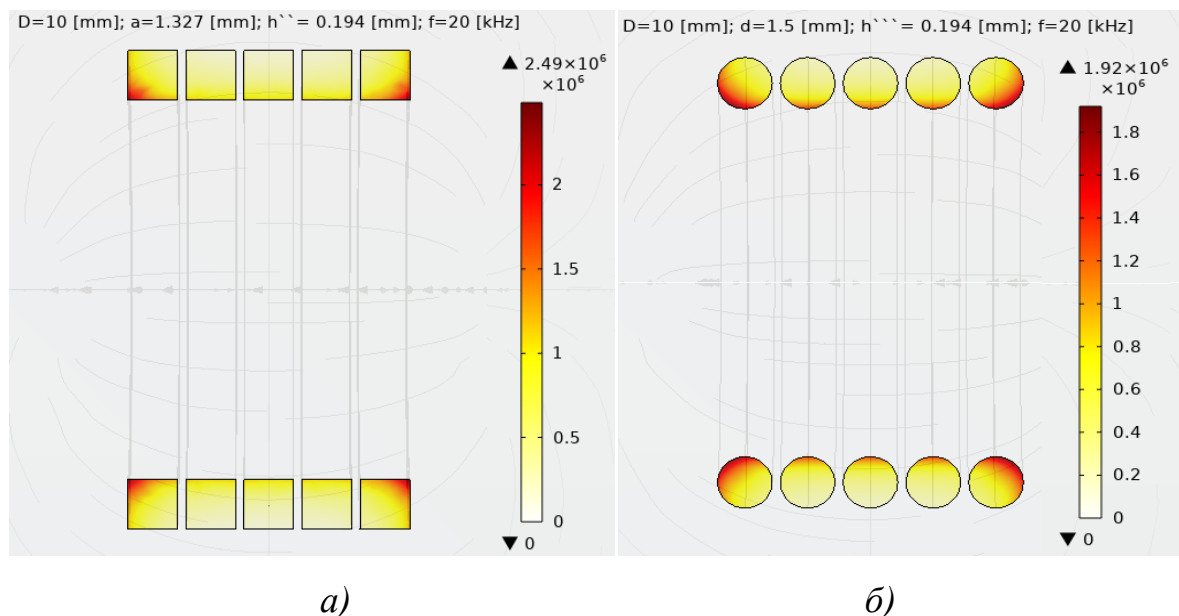


Рисунок 2.10 – Розподіл та густина струму у поперечному перерізі одношарової багатовиткової обмотки, виконаної з провідника квадратної форми перерізу (а) та циліндричного провідника (б) рівних площ поперечного перерізу

*(розроблено автором)*

У загальному випадку багатовиткової одношарової обмотки, бачимо, що незалежно від форми провідника розподіл струму у крайніх та внутрішніх витках неоднаковий – площа струмопровідної області у крайніх витках більша, ніж у внутрішніх, тобто спостерігаємо вплив міжвиткового ефекту близькості. Окрім того, у внутрішніх витках певна незначна частина струмопровідної області сконцентрована поблизу внутрішньої частини витка, тобто спостерігаємо певний вплив ще й самоефекту близькості.

У випадку обмотки, виконаної із провідника квадратної форми перерізу, спостерігаємо найвищу концентрацію струмопровідної області лише у крайніх витках з максимальною шириною біля зовнішніх кутів, на відміну від внутрішніх витків, у яких густина струму мінімальна та приблизно однакова. Тобто, фактично основна частина струму у такій обмотці протікає лише невеликою струмопровідною областю у крайніх витках, що підтверджує більша, ніж у обмотці з еквівалентного циліндричного провідника, густиною

струму ( $j = 2.49 \times 10^6 \text{ A / м}^2 = 2.49 \text{ A / мм}^2$  у квадратному провіднику проти  $j = 1.92 \times 10^6 \text{ A / м}^2 = 1.92 \text{ A / мм}^2$  у циліндричному). Розбіжність у даному випадку становить приблизно 23 %, що досить суттєво.

Щодо обмотки із циліндричного провідника, рівної площі перерізу з квадратним, бачимо, що, розподіл струму у крайніх та внутрішніх витках дещо відрізняється від розглянутого вище для квадратного провідника. Як і в попередньому випадку обмотки з квадратним провідником, в обмотці з циліндричного провідника найбільша концентрація струмопровідної області відбувається у крайніх витках поблизу внутрішньої частини. Однак щодо внутрішніх витків, в обмотці з циліндричного провідника спостерігаємо збільшення розмірів струмопровідної області поблизу внутрішньої частини витків, що вказує на зміну впливу у даному випадку самоєфекту близькості. Тобто, у багатовитковій обмотці з циліндричного провідника за тих самих умов розміри струмопровідної області візуально будуть дещо більшими, ніж в обмотці з провідника квадратної форми перерізу, що ілюструється відповідним розходженням величин густин струмів, представлених вище.

Виходячи з цього, теоретично, і величина втрат обмотки з циліндричного провідника повинна бути меншою, порівняно із обмоткою з квадратного провідника за тих самих умов. Для перевірки даного припущення розраховано величини втрат одношарових п'ятивиткових обмоток, виконаних з провідника квадратного перерізу ( $K_{f\_multiturn\_quad}$ ) та з циліндричного провідника ( $K_{f\_multiturn\_cylindrical}$ ). Отримані результати (за вказаних ідентичних умов дослідження) наступні:  $K_{f\_multiturn\_quad} = 1.8955$ ;  $K_{f\_multiturn\_cylindrical} = 1.8442$ . Як бачимо, величина втрат обмотки, виконаної з провідника квадратного перерізу буде дещо більшою, приблизно на 3 %, ніж в обмотки з циліндричного провідника тієї самої площі перерізу.

Враховуючи те, що зазначені відмінності є незначними, тому вважатимемо, що вплив міжвиткового ефекту близькості на величину втрат буде приблизно однаковим як для багатовиткової одношарової обмотки з циліндричного, так і для обмотки з квадратного провідника рівних площ



перерізу.

В загальному, підсумовуючи результати дослідження, робимо висновок, що хоч форма поперечного перерізу провідника і впливає на розподіл струму через вплив таких явищ як скін-ефект, самоефект близькості чи міжвитковий ефект близькості, однак цей вплив є досить незначним, тому умовно ним можна знехтувати та прийняти приблизно ідентичним вплив зазначених явищ на розподіл струму та величину втрат у провідниках квадратної та циліндричної форм перерізу [9].

Провівши у даному розділі ряд досліджень для вивчення впливу геометричних параметрів одношарових обмоток індуктивних елементів, підсумуємо отримані результати:

1) в розглянутих аналітичних методиках розрахунку величини втрат обмоток індуктивних елементів [18, 22] виявлено, що для витків вирішені плоскі задачі, в результаті чого знехтувано впливом геометрії (діаметра) обмотки на розподіл струму у провіднику при згортанні його у виток та відповідним впливом на кінцеву величину втрат. Результати машинного експерименту показали, що у випадку одновиткової обмотки, вплив зміни розподілу струму у провіднику при згортанні його у кільце становить від 20.6% до 39.59% залежно від частоти та діаметра провідника. Виявлено, що причиною даної розбіжності є прояв самоефекту близькості, який тим сильніше проявляється, чим менший діаметр витка. При масштабуванні обмотки до багатовиткової вплив вказаного даного явища зростає ще більше, тому впливом геометрії (діаметра) обмотки нехтувати не варто;

2) виходячи з того, що для одношарової обмотки у методиці [22] вирішено плоску задачу, не було враховано нерівномірність розподілу струму у зовнішніх (крайніх) та внутрішніх витках обмотки, спричиненого впливом міжвиткового ефекту близькості. Результати машинного експерименту показали, що нехтування вказаною нерівномірністю може внести значну похибку у результат розрахунку. Залежно від частоти та відстані між витками, величина вказаної похибки становитиме ввід 17.8 % до 65.99 % для

одношарової обмотки, тому даним явищем не можна нехтувати при розрахунках;

3) виявлено, що для розрахунку величини втрат одношарових обмоток індуктивних елементів, методику [18] використовувати не рекомендовано, оскільки вплив ефекту близькості у ній розглядається виключно як міжшаровий, для кількості шарів  $m \geq 2$ . Для одношарової обмотки впливом ефекту близькості знехтувано взагалі як таким, що є однією із причин появи некоректного результату при розрахунках одношарових обмоток за вказаною методикою;

4) у результаті дослідження впливу форми поперечного перерізу провідника (для квадратного та циліндричного провідників рівної площі перерізу) на розподіл струму в них (та на величину втрат), виявлено, що за даних умов дослідження форма поперечного перерізу провідника впливає на розподіл струму (через вплив таких явищ як скін-ефект, самоефект близькості чи міжвитковий ефект близькості), однак цей вплив є досить незначним (до 4%), тому умовно ним можна знехтувати та прийняти приблизно ідентичним вплив зазначених явищ на розподіл струму та величину втрат у провідниках квадратної та циліндричної форм перерізу.

## **Висновки до розділу 2**

На основі отриманих результатів при проведенні у даному розділу ряду досліджень, було зроблено наступні висновки:

1) причинами відхилення результатів машинного експерименту та теоретичних розрахунків для одношарової багатовиткової обмотки є нехтування впливом геометрії (діаметра) обмотки та нерівномірністю розподілу струмів між крайніми (зовнішніми) та внутрішніми витками;

2) наявні методики розрахунку потребують уточнень та внесення у їх розрахункові вирази параметрів, що описуватимуть вплив геометричних даних обмотки;

3) визначено, що в ультразвуковому діапазоні частот, вплив форми

поперечного перерізу провідника – квадратного та циліндричного (за умови рівності площ перерізу) незначний (до 4%), тому вказаним впливом можна умовно знехтувати;

4) оскільки аналітичним шляхом дану задачу вирішити важко, тому необхідно продовжити дослідження з метою уточнення розрахункових виразів для загальновживаних випадків, що і дозволить у подальшому врахувати геометричні параметри обмоток при розрахунку.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ВИТКІВ ТА ФЕРОМАГНІТНОГО ОСЕРДЯ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА

### 3.1 Постановка задачі

Нагадаємо, що передумовами початку досліджень у *Розділі 2* стали результати аналізу найбільш поширених аналітичних методик розрахунку величин втрат обмоток індуктивних елементів [18, 22], виконаних у *Розділі 1* дисертації. У ході аналізу, нагадаємо, було зроблено припущення, що можливою причиною розбіжності практичних (експериментальних) результатів із результатами теоретичних розрахунків за даними методиками є нехтування впливом ряду геометричних параметрів обмотки на розподіл струму у провідниках, що у свою чергу негативно впливає на коректність розрахунку величини втрат обмотки.

Таким чином, у *Розділі 2* дисертації було виконано дослідження впливу таких геометричних параметрів одношарових багатовиткових обмоток на їх опір втрат, як діаметра обмотки  $D_{coil}$  та відстані між сусідніми витками  $h'''$ . Оскільки у методиках було вирішено плоскі задачі, визначено, що не враховано вплив на розподіл струму самоефекту близькості, величина якого залежить від діаметра обмотки  $D_{coil}$ . Також з тієї ж причини знехтувано нерівномірністю розподілу струму у крайніх та внутрішніх витках багатовиткової одношарової обмотки, спричиненого міжвитковим ефектом близькості, який у свою чергу залежить від міжвиткової відстані  $h'''$ . У результаті проведених досліджень виявлено, що вплив розглянутих геометричних параметрів обмотки на розподіл струму у провідниках обмотки суттєвий і нехтування ними може призвести до появи некоректного результату, тому їх необхідно врахувати у подальшій модифікації розрахункового виразу.

Однак варто зауважити, що з розглянутих вище геометричних параметрів (діаметр витка  $D_{coil}$  та відстань між сусідніми витками  $h'''$ ) значний вплив на

величину втрат багатовиткової одношарової обмотки теоретично проявлятиме також кількість витків обмотки  $N$ . Тому одним із завдань даного розділу стане дослідження впливу кількості витків  $N$  одношарової багатовиткової обмотки на величину її втрат  $K_f$ .

Фактично, дане дослідження є продовженням роботи, проведеної у Розділі 2, однак виділене в окремий розділ з міркувань зручності викладу результатів експериментальних досліджень.

Також, візьмемо до уваги, що реальні силові індуктивні елементи, що працюють в даному частотному діапазоні, у т.ч. в складі  $УФ$  потужних ультразвукових пристроїв, мають у своєму складі феромагнітне осердя, яке вводять, як правило, для підвищення величини індуктивності. Очевидно, що введення реального осердя (із втратами) в обмотку теоретично також впливатиме на розподіл струму у провідниках, а, відповідно, і на величину втрат обмотки в цілому. Зауважимо, що у відомих аналітичних методиках розрахунку [18, 22] знехтувано впливом осердя на величину втрат обмотки, що теоретично також може вносити суттєву похибку у результати розрахунків. Тому, наступним завданням стане дослідження впливу феромагнітного осердя із втратами на величину втрат одношарової багатовиткової обмотки індуктивного елемента.

### 3.2 Основна частина

Як зазначалося у Розділі 1, однією із можливих причин розбіжності експериментальних (практичних) результатів та результатів теоретичних розрахунків величини втрат обмоток індуктивних елементів за відомим аналітичними методиками [18, 22] є нехтування впливом геометричних параметрів обмотки на розподіл струму у витках та, відповідно, на величину втрат обмотки. Одним із вказаних геометричних параметрів є величина, що описує кількість витків обмотки  $N$ . Тому у першій частині розділу (п. 3.2.2), відповідно до одного із поставлених вище завдань, виконаємо дослідження впливу кількості витків  $N$  одношарової обмотки без осердя на величину її втрат

*Kf*. Суть дослідження полягатиме у порівнянні експериментальних результатів для одношарової обмотки без осердя з різною кількістю витків  $N$ , з результатами теоретичного розрахунку тієї ж обмотки за методикою [22]. Зауважимо, що методику [18] у даному розділі розглядати не будемо, оскільки, за результатами проведеного раніше аналізу, визначено, що для одношарової обмотки у ній повністю знехтувано впливом ефекту близькості, на відміну від методики [22], яка є найбільш досконалою серед розглянутих в плані врахування геометричних параметрів обмотки та ефекту близькості на величину втрат одношарової обмотки.

Уточнимо, що експериментальні вимірювання та теоретичні розрахунки виконаємо для одношарової обмотки фіксованого діаметра  $D_{coil}$  та фіксованою міжвитковою відстанню  $h''$ , однак з різними діаметрами провідників  $d$  та з різною кількістю витків  $N$ . Дослідження проведемо на різних частотах  $f$ .

У ході аналізу аналітичних методик розрахунку також було виявлено, що ще однією можливою причиною розходження експериментальних результатів із теоретично розрахованими є нехтування впливом феромагнітного осердя на розподіл струму у витках обмотки та, відповідно, на величину її втрат  $Kf$ . Тому теоретичний розрахунок одношарової обмотки з осердям, зокрема за методикою [22], ймовірно даватиме результати зі значною похибкою.

Таким чином, відповідно до поставленого вище завдання дослідження, у другій частині розділу (*n.n.* 3.2.3) виконаємо дослідження впливу кількості витків  $N$  одношарової обмотки із введенням феромагнітним осердям на величину втрат  $Kf$ , а у третій частині – (*n.n.* 3.2.4) проведемо дослідження впливу величини втрат в осерді на загальну величину втрат обмотки  $Kf$ .

Суть дослідження, проведеного у *n.n.* 3.2.3, полягатиме у порівнянні експериментальних результатів для одношарової обмотки з осердям, що має різну кількість витків  $N$  (кількість витків обмотки  $N$  оберемо більшим, ніж у попередньому дослідженні), з результатами теоретичного розрахунку тієї ж обмотки за методикою [22]. Умови проведення даного дослідження ідентичні *n.* 3.2.2, однак з тим доповненням, що обране феромагнітне осердя має фіксовані

геометричні параметри (діаметр та довжину) та фіксоване значення величини втрат (тобто, у ході вимірювань обраний тип осердя не буде замінюватися на інший).

Зміст дослідження, проведеного у п. 3.2.4, полягатиме у виконанні машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу для обмотки із фіксованим діаметром  $D_{coil}$ , кількістю витків  $N$ , відстанню між сусідніми витками  $h''$ , діаметром провідника  $d$  та частотою вимірювання  $f$ . Змінюватися буде лише один параметр – уявна частина комплексної магнітної проникності феромагнітного осердя  $\mu_i$ , яка і характеризує величину його втрат. Дане дослідження і дозволить оцінити величину та характер впливу втрат осердя на загальну величину втрат багатовиткової одношарової обмотки [36].

Перед початком виконання досліджень, варто вказати на певні особливості організації їх експериментальної частини.

### **3.2.1 Обґрунтування організації експериментальних вимірювань.**

#### **Перевірка достовірності результатів машинного експерименту**

При виконанні описаних вище досліджень, важливим завданням є отримання коректних та інформативних результатів експериментальних вимірювань, оскільки від цього залежатиме правильність подальшого порівняння з даними теоретичних розрахунків, коректність та повнота зроблених висновків. Тому, експериментальну частину досліджень вирішено організувати введенням двох взаємодоповнюючих складових – натурних експериментальних вимірювань та машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу. Такий підхід дозволить виконати вимірювання для широкого діапазону кількості витків обмотки. Нагадаємо, що при обґрунтуванні геометричних параметрів досліджуваних обмоток, проведеного у *Розділі 2*, визначено, що з метою повноти вивчення впливу кількості витків  $N$  одношарової обмотки на величину втрат, обмеження їх кількості вводити не будемо. Таким чином, у даних дослідженнях максимальна кількість витків обмотки становитиме  $N = 70$ . Основною причиною вибору такого підходу є

наявність обмежень для кількості витків досліджуваної обмотки як для натурального, так і для машинного експериментів.

Щодо натурних експериментальних вимірювань, визначено, що наявними вимірювальними приладами з достатньою точністю можливо виконати вимірювання необхідних для розрахунку величини втрат обмотки  $K_f$  параметрів, лише для кількості витків  $N \geq 20$ . Для меншої кількості витків значення вимірюваних величин будуть досить невеликі, і на точність результату почне впливати похибка приладу.

Щодо машинних експериментальних вимірювань, що проводитимуться у середовищі кінцево-елементного аналізу, за умови максимально ощадливих налаштуваннях сітки, максимальна кількість витків, яку можливо змодельовати за параметрів наявного ПК не перевищує  $N \leq 25$ . За більшої кількості витків моделювання неможливе (з'являється повідомлення про перевищення об'єму наявної оперативної пам'яті ПК).

Таким чином, експериментальні вимірювання обмотки з кількістю витків  $N \leq 25$  виконаємо за допомогою машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу, а для обмоток, з кількістю витків  $N \geq 25$  – за допомогою натурних експериментальних вимірювань.

За такої організації експериментальної частини досліджень, важливо переконатися у достовірності результатів машинного експерименту (оскільки правильності результатів натурних вимірювань можемо довіряти). Для цього виконаємо порівняння результатів розрахунку величини втрат  $K_f$  обмотки, отриманих у ході машинного експерименту ( $K_{f\_model}$ ) та результатів розрахунку величини втрат  $K_f$  тієї ж обмотки, отриманих у ході натурних вимірювань ( $K_{f\_experimental}$ ). Вимірювання проведемо для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil} = 10 \text{ мм}$ , з кількістю витків  $N = 25$ , виконаних провідником діаметром  $d = 1 \text{ мм}$ . Відстань між сусідніми витками рівна подвійній товщині ізоляції провідника ( $h''' = 0.068 \text{ мм}$ ).

Натурні вимірювання виконаємо за допомогою LCR/ESR-метру типу *BK Precision* моделі 886 [37] на трьох фіксованих частотах –  $f_1 = 1 \text{ кГц}$ ,  $f_2 = 10 \text{ кГц}$ ,



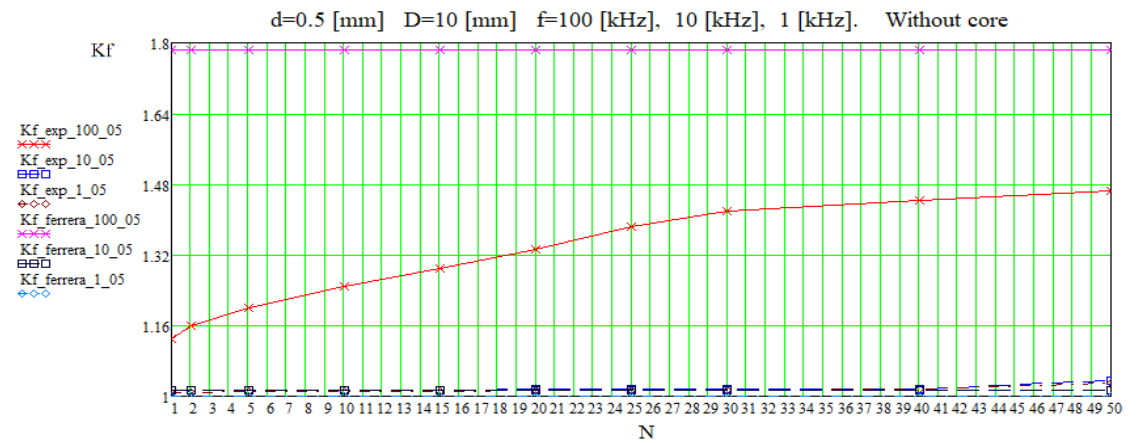
$f_3 = 100$  кГц (у подальших дослідженнях натурні вимірювання, машинний експеримент та теоретичні розрахунки виконуватимемо на вказаних частотах).

Результати натурних вимірювань наступні:  $K_{f1\_experimental} = 1.032$ ;  $K_{f2\_experimental} = 1.197$ ;  $K_{f3\_experimental} = 3.11$ . Результати проведеного машинного експерименту для аналогічної обмотки:  $K_{f1\_model} = 1.13$ ;  $K_{f2\_model} = 1.34$ ;  $K_{f3\_model} = 3.29$ . Порівняємо отримані результати. Відносна розбіжність результатів машинного експерименту та натурального вимірювання для вказаних частот, становить від 5.5% до 10.7%, що пояснюється впливом похибки вимірювання. Таким чином, робимо висновок, що машинний експеримент з відносно достатньою точністю дозволяє розрахувати величину втрат одношарової обмотки  $K_f$ , порівняно із натурним експериментом, тому в експериментальній частині дослідження натурні вимірювання доповнимо машинними експериментальними вимірюваннями [36].

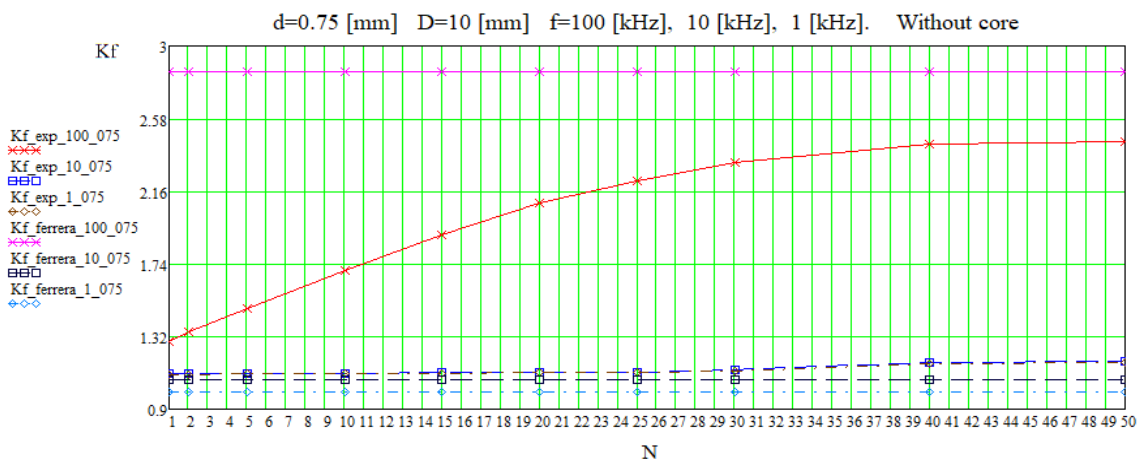
### **3.2.2. Дослідження впливу кількості витків $N$ одношарової обмотки без осердя на величину втрат $K_f$**

Відповідно до описаного у п. 3.2 змісту та плану проведення даного дослідження, перейдемо до його виконання. Проведемо експериментальні вимірювання з подальшим розрахунком величини втрат  $K_{f\_exp}$  для одношарової обмотки без осердя, з фіксованим діаметром  $D_{coil} = 10$  мм. Обмотка виконана із провідників діаметрами:  $d_1 = 0.5$  мм,  $d_2 = 0.75$  мм,  $d_3 = 1$  мм, з кількістю витків  $N = 1 \dots 50$ , міжвиткова відстань  $h'''$  фіксована та рівна подвійній товщині ізоляції провідника ( $h''' = 0.068$  мм). Вимірювання виконаємо на частотах  $f_1 = 1$  кГц,  $f_2 = 10$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц.

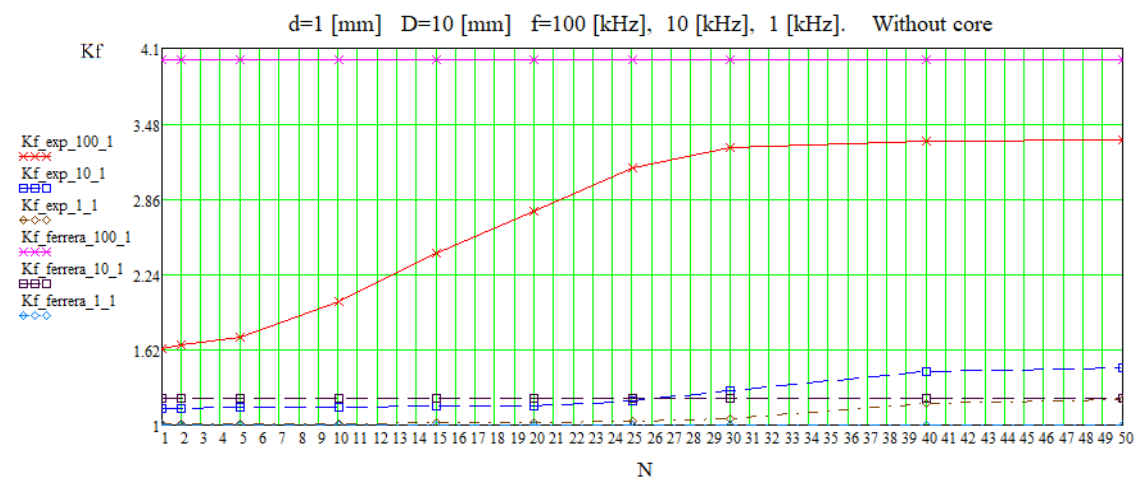
Далі виконаємо теоретичний розрахунок величини втрат аналогічної обмотки  $K_{f\_Ferrera}$  за розрахунковим виразом методики [22] та порівняємо із отриманими експериментальними даними  $K_{f\_exp}$ . Результати дослідження представлено на рис. 3.1 а, б, в. Більш детально методика розрахунку та отримані дані описані у Додатку Д.



a)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Залежність величини втрат  $K_f$  одношарової обмотки без осердя від кількості витків  $N$  для експериментальних вимірювань  $K_{f\_exp}$  та теоретичних розрахунків  $K_{f\_Ferrera}$  на трьох частотах  $f$  для діаметрів провідників:

a)  $d_1 = 0.5$  мм; б)  $d_2 = 0.75$  мм; в)  $d_3 = 1$  мм

(розроблено автором)

Перед аналізом отриманих на рисунках результатів, варто пояснити прийняті при побудові графіків скорочення змінних. На одному графіку, для компактності, об'єднано отримані експериментально ( $K_{f\_exp}$ ) та теоретично ( $K_{f\_Ferrera}$ ) криві величини втрат обмотки, розрахованих для трьох вказаних вище діаметрів провідників  $d$  на трьох частотах  $f$ . Таким чином, змінні позначалися за наступним алгоритмом:  $K_{f\_(\text{спосіб отримання даних})\_(\text{частота } f, \text{ кГц})\_(\text{діаметр провідника } d, \text{ мм})}$ .

Наприклад, змінна  $K_{f\_exp\_100\_1}$  (рис. 3.1. в) позначає величину втрат обмотки  $K_f$ , отриману у ході експериментальних вимірювань («exp») на частоті  $f = 100 \text{ кГц}$ , для обмотки з діаметром провідника  $d = 1 \text{ мм}$ . Або, змінна  $K_{f\_ferrera\_1\_075}$  (рис. 3.1. б) позначає величину втрат обмотки  $K_f$ , отриману у ході теоретичних розрахунків за методикою [22] («ferrera») на частоті  $f = 1 \text{ кГц}$ , для обмотки з діаметром провідника  $d = 0.75 \text{ мм}$  і т.д.

Перейдемо до аналізу отриманих результатів. Як бачимо із рис. 3.1 а, б, в, для усіх трьох випадків, крива, що описує експериментально отриману величину втрат обмотки  $K_{f\_exp}$ , зростає зі збільшенням кількості витків  $N$ . Дана тенденція пояснюється зміною індукції магнітного поля, утвореного при протіканні струму у провідниках обмотки. А, оскільки величина магнітної індукції зростає зі збільшенням кількості витків  $N$ , це впливає на величину втрат обмотки.

Однак зауважимо, що починаючи із певного значення числа витків  $N$ , зростання величини втрат обмотки  $K_{f\_exp}$  починає різко сповільнюватися та виходить на певний відносно сталий рівень, який майже не залежатиме від кількості витків. Така тенденція пояснюється тим, що починаючи з цієї кількості витків, обмотка починає поводити себе як соленоїд (у якому, нагадаємо, довжина обмотки набагато перевищує діаметр). Уздовж поздовжньої осі такої обмотки встановлюється однорідне магнітне поле, величина якого у подальшому майже не залежатиме від кількості витків, відповідно, і величина втрат обмотки  $K_{f\_exp}$  також не змінюватиметься.

Для вказаних параметрів обмотки, зазначене припинення росту величини втрат  $K_{f\_exp}$  відбувається за кількості витків приблизно  $N \geq 30$  для вказаних вище

діаметрів провідників  $d$  та частот  $f$ . Зазначимо, що у межах кількості витків від  $N = 30$  до  $N = 50$  приріст величини втрат  $K_{f\_exp}$  є незначним (в межах від 2% до 5% залежно від частоти та діаметра провідника). Таким чином вважатимемо, що в даному випадку величина  $K_{f\_exp}$  є сталою.

Далі виконаємо порівняння величин втрат, отриманих у ході експериментальних вимірювань ( $K_{f\_exp}$ ) з величинами втрат обмотки, отриманих у ході теоретичних розрахунків за методикою [22] ( $K_{f\_Ferrera}$ ) для вказаних вище параметрів обмотки. На рис. 3.1 а, б, в бачимо, що на усіх обраних частотах  $f$  та діаметрах провідників  $d$ , крива, що описує теоретично розраховану величину втрат  $K_{f\_Ferrera}$  не залежить від числа витків обмотки  $N$ , що очевидно, оскільки у методиці [22] знехтувано впливом кількості витків  $N$  на величину втрат. Відмітимо також, що у розглянутому випадку одношарової обмотки без осердя, з кількістю витків  $N \geq 30$ , відносне відхилення величини  $K_{f\_Ferrera}$  та  $K_{f\_exp}$  майже не змінюється з ростом кількості витків та сягає 20.5 %, залежно від обраної частоти  $f$  та діаметра провідника обмотки  $d$ .

Отже, робимо висновок, що аналітичну методику розрахунку [22] все ж цілком можливо використовувати для обчислення величини втрат одношарових обмоток  $K_f$ , однак за умови, що обмотка без осердя, кількість витків даної обмотки складатиме  $N \geq 30$ , а результат розрахунку буде скореговано на величину вказаного вище відносного відхилення величин втрат обмотки  $K_{f\_Ferrera}$  та  $K_{f\_exp}$  (більш детально вибір значень величин корекції залежно від частоти  $f$ , діаметра провідника  $d$  в діапазоні кількості витків  $N = 30...50$  описано у *Додатку Д*).

Також відмітимо, що при збільшенні діаметра провідника  $d$ , відповідно, зростає і величина втрат обмотки (при фіксованій частоті  $f$  і кількості витків  $N$ ), причому, найбільший приріст спостерігаємо на частоті  $f_3 = 100$  кГц. При збільшенні діаметра провідника з  $d_1 = 0.5$  мм до  $d_3 = 1$  мм максимальне значення величини втрат  $K_{f\_exp}$  (при  $N = 50$ ) зростає майже удвічі, однак уже на частоті  $f_2 = 10$  кГц даний приріст складає лише 30%. Пояснюється дана тенденція зростанням впливу скін-ефекту на величину втрат при збільшенні

діаметра провідника та частоти [36].

### 3.2.3. Дослідження впливу кількості витків $N$ одношарової обмотки з феромагнітним осердям на величину втрат $K_f$

Розглянуті вище індуктивні елементи з одношаровими обмотками без осердь, як правило, досить рідко використовуються у складі силових пристроїв, що працюють в ультразвуковому діапазоні частот. Основною причиною цього є невеликі значення індуктивностей таких індуктивних елементів. Найбільш поширеними у цих пристроях є індуктивні елементи (у т.ч. і з одношаровими обмотками), у конструкцію яких введено осердя із феромагнітних матеріалів, що дозволяє значно збільшити величину індуктивності при збереженні основних геометричних розмірів обмотки.

Отже, відповідно до описаного у п. 3.2 змісту та плану проведення даного дослідження, перейдемо до аналізу впливу кількості витків  $N$  одношарової обмотки індуктивного елемента із феромагнітним осердям на величину втрат  $K_f$ .

Дослідження розпочнемо із проведення експериментальних вимірювань, у ході яких виконаємо розрахунок величини втрат  $K_{f\_exp\_core}$  для вказаної обмотки, з фіксованим діаметром  $D_{coil} = 10$  мм. Обмотка виконана із провідників діаметрами:  $d_1 = 0.5$  мм,  $d_2 = 0.75$  мм,  $d_3 = 1$  мм, з кількістю витків  $N = 1 \dots 70$ , міжвиткова відстань  $h'''$  фіксована та рівна подвійній товщині ізоляції провідника ( $h''' = 0.068$  мм). У конструкцію обмотки введено феромагнітне осердя марки 600НН [33], виконане у вигляді циліндричного стержня діаметром  $D_{core} = 10$  мм та довжиною  $l_{core} = 160$  мм. Вимірювання проведемо на частотах  $f_1 = 1$  кГц,  $f_2 = 10$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц.

Наступним кроком стане виконання теоретичного розрахунку величини втрат аналогічної обмотки ( $K_{f\_Ferrera}$ ) згідно з методикою [22] та порівняння отриманих результатів з результатами попереднього експериментального розрахунку величини  $K_{f\_exp\_core}$ . Результати дослідження представлено на рис. 3.2 а, б, в. Більш детально методика розрахунку та отримані у ході дослідження результати представлені у Додатку Е.

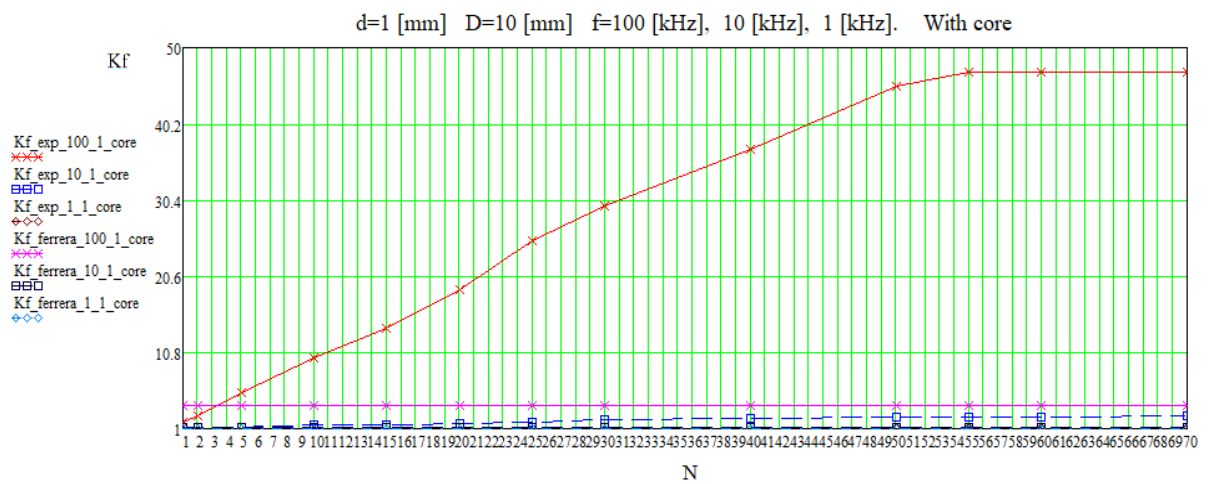
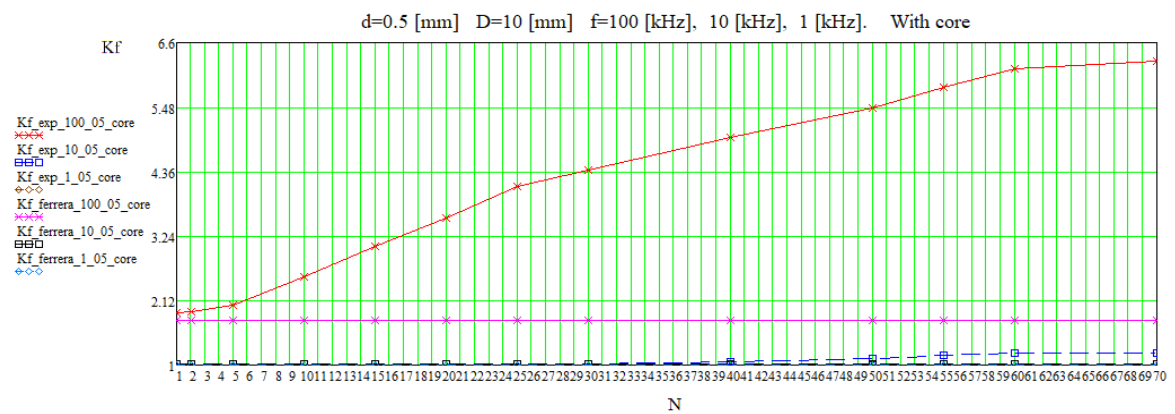
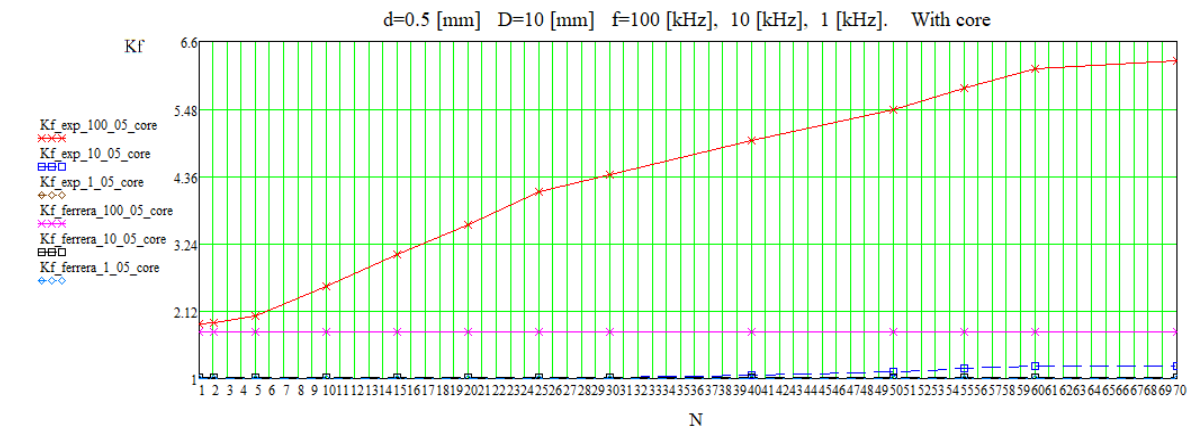


Рисунок 3.2 – Залежність величини втрат  $K_f$  одношарової обмотки з осердям типу 600НН від кількості витків  $N$ , отриманої для експериментальних вимірювань  $K_{f\_exp\_core}$  та теоретичних розрахунків  $K_{f\_Ferrera}$  на трьох частотах для діаметрів провідників: а)  $d_1 = 0.5$  мм; б)  $d_2 = 0.75$  мм; в)  $d_3 = 1$  мм  
(розроблено автором)

Прийняті на рисунках умовні скорочення змінних пояснено у попередньому пункті дослідження, тому перейдемо одразу до аналізу отриманих результатів.

Як бачимо, у випадку обмотки із феромагнітним осердям зберігається така ж тенденція залежності кривої, що описує експериментально отриману величину втрат обмотки  $K_{f\_exp\_core}$  від кількості витків  $N$  (рис. 3.2 а, б, в), що й для обмотки без осердя (рис. 3.1 а, б, в) (тобто, величина  $K_{f\_exp\_core}$  зростає зі збільшенням кількості витків обмотки  $N$ , але починаючи із певної їх кількості, її зростання припиняється та виходить на певний сталий рівень (назвемо його «плато»), величина якого майже не залежить від подальшого збільшення кількості витків). Однак, на відміну від обмотки без осердя, у даному випадку припинення росту величини втрат  $K_{f\_exp\_core}$  спостерігаємо уже за кількості витків  $N \geq 50$  для розглянутих діаметрів провідників  $d$  та частот  $f$ .

Зазначимо, що після виходу кривої  $K_{f\_exp\_core}$  на відносно сталий рівень (плато), що відбувається за кількості витків в межах від  $N = 50$  до  $N = 70$ , подальший ріст величини  $K_{f\_exp\_core}$  є незначним – від 4% до 5% (залежно від діаметра провідника  $d$  та частоти  $f$ ). Тобто вважатимемо, що і в цьому випадку величина втрат обмотки  $K_{f\_exp\_core}$  є відносно сталою.

Далі виконаємо порівняння величини втрат обмотки  $K_{f\_exp\_core}$ , отриманої у ході експериментальних вимірювань, із теоретично розрахованою величиною втрат  $K_{f\_Ferrera}$  для обмотки з тими ж параметрами. Бачимо, що для обраних вище діаметрів провідників  $d$  та частот  $f$  характер кривої, що описує величину втрат  $K_{f\_Ferrera}$ , як і в попередньому дослідженні, також не залежить від кількості витків обмотки  $N$  та має вигляд прямої.

У даному випадку (для одношарових обмоток з осердям з кількістю витків  $N \geq 50$ ) відносне відхилення величин втрат  $K_{f\_Ferrera}$  та  $K_{f\_exp\_core}$  також майже не змінюється зі збільшенням кількості витків, тобто збережено попередню тенденцію. Однак зауважимо, що на відміну від попереднього дослідження обмотки без осердя, величина вказаного відхилення значно зросла, і становить від 250% до 1000% (для обмотки без осердя, нагадаємо, ця величина

сягала 20.5%). Тобто, розбіжність між результатами теоретичних та експериментальних даних в цьому випадку становить від 3.5 до 10 разів відповідно, залежно від частоти  $f$  та діаметра провідника обмотки  $d$ , що є дуже суттєвим показником.

Отже, враховуючи отриману значну розбіжність між теоретичними та експериментальними результатами, робимо висновок, що використовувати аналітичну методику [22] для розрахунку величини втрат одношарової обмотки із феромагнітним осердям не можна.

Також, як і у попередньому дослідженні, збільшення діаметра провідника обмотки  $d$  призводить до росту величини її втрат, причому найбільший приріст спостерігається на частоті  $f_3 = 100$  кГц за найбільшого обраного діаметра провідника ( $d_3 = 1$  мм). Також, на вказаній частоті, при збільшенні діаметра провідника обмотки з  $d_1 = 0.5$  мм до  $d_3 = 1$  мм (тобто удвічі), максимальне значення величини втрат  $K_{f\_exp\_core}$  (при кількості витків  $N = 70$ ) зростає у 7.5 разів, однак при зменшенні частоти до  $f_2 = 10$  кГц втрати обмотки зростатимуть лише удвічі. Тобто, як і у випадку обмотки з осердям, тенденція зберігається та пояснюється, знову ж, зростанням впливу скін-ефекту на величину втрат при збільшенні діаметра провідника та частоти. Однак вказані значення приросту будуть дещо більші, ніж для попереднього дослідження, головним чином через вплив осердя на конфігурацію магнітного поля в обмотці та, відповідно, розподіл струму у провідниках [36].

#### **3.2.4. Дослідження впливу феромагнітного осердя на величину втрат $K_f$ одношарової багатовиткової обмотки**

У ході виконання попереднього дослідження, нагадаємо, виявлено значну розбіжність між результатами теоретичних та експериментальних вимірювань, яка для одношарової обмотки із феромагнітним осердям становить від 250% до 1000%. Теоретично, причиною появи даної розбіжності можуть бути як втрати в осерді, так і вплив самого осердя на конфігурацію поля в обмотці, що у свою чергу, впливатиме на розподіл струму у провідниках обмотки та величину її



втрат. Тому, для перевірки вказаних припущень, виконаємо дослідження впливу феромагнітного осердя на величину втрат обмотки  $K_f$ , яке описане у п.3.2 розділу.

Розпочнемо із дослідження впливу втрат в осерді на величину втрат обмотки індуктивного елемента. Відомо, що здійснюючи вплив на феромагнітне осердя змінним магнітним полем високої частоти, магнітна проникність осердя носитиме комплексний характер, уявна частина ( $\mu_i$ ) якої і описуватиме поглинання (тобто втрати) електромагнітної енергії в осерді при його перемагнічуванні [2, с.81].

Теоретично, якщо змінювати величину уявної проникності осердя  $\mu_i$  в певних межах, можна дослідити вплив втрат в осерді на величину втрат  $K_f$  обмотки індуктивного елемента. Однак, у ході натурального вимірювання (експерименту), виконати дане дослідження неможливо, оскільки обраний тип осердя має певне фіксоване значення втрат, на величину якого неможливо вплинути ззовні. Тому перейдемо до машинного експерименту, у ході якого і виконаємо описане вище дослідження. Розглянемо одношарову обмотку діаметром  $D_{coil} = 10$  мм, яка складається із  $N = 5$  витків, виконаних провідником діаметром  $d_3 = 1$  мм, міжвиткова відстань у даному випадку рівна подвійній товщині ізоляції провідника ( $h''' = 0.068$  мм), тобто витки укладені щільно. Дослідження проведено на фіксованій частоті  $f_3 = 100$  кГц. В обмотку введено осердя з параметрами, що відповідають параметрам використаного у натурних експериментах осердя марки 600НН ( $\mu = 600$ ;  $\mu_i = 0.5$ ).

Варто пояснити, що за даних параметрів наявного ПК (головним чином через розмір оперативної пам'яті), максимальна кількість витків обмотки з осердям із втратами, яку можливо промодельовати у середовищі кінцево-елементного аналізу, навіть за найбільш ощадливих налаштувань, не перевищує  $N = 5$ . Але навіть за такої кількості витків цілком можливо дослідити вплив осердя на величину втрат обмотки.

Виконаємо розрахунок величини втрат обмотки з обраним вище осердям  $K_{f\_model\_core}$  при проведенні машинного експерименту, з подальшим порівнянням

отриманих результатів із результатами натурних вимірювань величини втрат  $K_{f\_exp\_core}$  аналогічної обмотки з такими ж параметрами осердя. Отже, у ході розрахунків отримано наступні результати:  $K_{f\_model\_core} = 4.1521$ ;  $K_{f\_exp\_core} = 4.37$ . Відносне відхилення складає близько 5%, що не перевищує похибки вимірювання. Тому, робимо висновок, що у даному випадку машинний експеримент дає коректні результати, і його можна використовувати у подальших дослідженнях.

Наступним кроком стане дослідження впливу втрат в осерді на величину втрат обмотки, шляхом зміни уявної частини комплексної провідності осердя в широких межах –  $\mu_i = 0 \dots 50$ .

Спочатку проведемо дослідження для випадку ідеального осердя без втрат, встановивши уявну частину комплексної провідності осердя  $\mu_i = 0$ . За вказаних вище параметрів обмотки, розрахована у ході машинного експерименту величина її втрат складає  $K_{f\_model\_core\_ideal} = 4.1510$ .

Далі, повторимо аналогічні розрахунки для випадку максимально можливого (на рівні середовища моделювання) рівня втрат осердя – уявну частину комплексної провідності осердя встановимо рівною  $\mu_i = 50$ . Розрахована для цього випадку величина втрат обмотки складає  $K_{f\_model\_core\_loss} = 4.2620$ .

Як бачимо, при зміні величини втрат в осерді (тобто  $\mu_i$ ) у 50 разів, величина втрат обмотки при цьому зростає лише на 3%, тобто, за даних умов дослідження, вплив втрат у феромагнітному осерді на величину втрат в обмотці є незначним. Таким чином, робимо висновок, що ймовірною причиною значного збільшення величини втрат розглянутої обмотки, порівняно із обмоткою без осердя, (відповідно, і різкого збільшення розбіжності між результатами теоретичних та експериментальних вимірювань для обох випадків) є, швидше за все, зміна конфігурації магнітного поля в обмотці при внесенні в неї феромагнітного осердя.

Виконаємо перевірку даного припущення у середовищі кінцево-елементного аналізу шляхом моделювання конфігурації магнітного поля

всередині обмотки та розподілу струму у її витках для випадків відсутності осердя ( $\mu = 1$ ) та його наявності ( $\mu = 600$ ). Результати дослідження представлено на рис. 3.3 а, б відповідно.

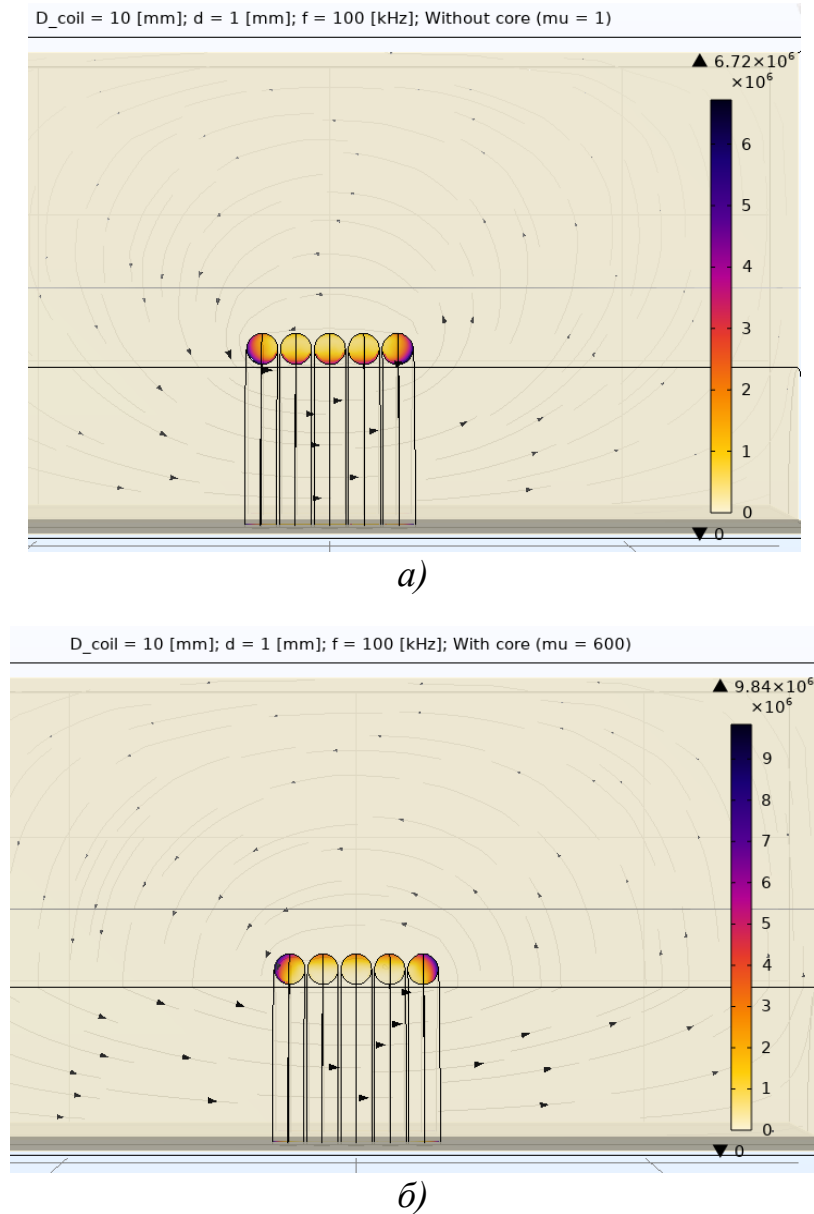


Рисунок 3.3 – Конфігурація силових ліній магнітного поля всередині одношарової обмотки та розподіл її густини струму у її витках за відсутності осердя ( $\mu = 1$ ) (а) та за його наявності ( $\mu = 600$ ) (б)  
(розроблено автором)

Аналізуючи отримані результати, бачимо, що у випадку обмотки без осердя (рис. 3.3 а), силові лінії магнітного поля мають таку конфігурацію, при

якій вони нерівномірно охоплюють внутрішні та крайні (зовнішні) витки обмотки, що призводить до появи крайових ефектів та нерівномірності розподілу струмів у внутрішніх та зовнішніх витках. Таким чином, у зовнішніх витках площа провідної області буде більшою, ніж у внутрішніх.

У випадку обмотки із феромагнітним осердям (рис. 3.3 б), бачимо, що силові лінії магнітного поля відносно однорідні та сконцентровані уздовж осі осердя. Також спостерігаємо витіснення струмопровідної області із внутрішньої частини провідників (яка знаходиться ближче до осердя) на зовнішню. При цьому зберігається нерівномірність розподілу струму у витках – площа провідної області у крайніх витках буде більшою, ніж у внутрішніх. Однак у випадку обмотки з осердям, сумарна площа струмопровідної області візуально буде меншою, ніж в обмотці без осердя. Все це спричиняє зростання величини втрат такої обмотки, що підтверджує і зростання густини струму, що протікає її витками –  $j = 6.72 \times 10^6 \text{ A} / \text{m}^2 = 6.72 \text{ A} / \text{мм}^2$  в обмотці без осердя проти  $j = 9.84 \times 10^6 \text{ A} / \text{m}^2 = 9.84 \text{ A} / \text{мм}^2$  в обмотці з осердям, що відповідає відносному відхиленню в 32%.

Перейдемо до розрахунку та порівняння величини втрат розглянутих ідентичних обмоток без осердя ( $K_{f\_without\_core}$ ) та з осердям ( $K_{f\_with\_core}$ ). Таким чином, розрахована у ході машинного експерименту величина втрат обмотки без осердя становить  $K_{f\_without\_core} = 2.5754$ , а величина втрат обмотки з осердям –  $K_{f\_with\_core} = 4.1521$ , тобто, при введенні осердя в обмотку, величина її втрат зростає у 1.6 разів (приблизно на 38 %). Нагадаємо, що наведені вище результати отримано для п'ятивиткової обмотки, у випадку збільшення кількості витків вказаний приріст величини втрат очікуватиметься ще більшим. Нагадаємо, що у даному дослідженні проаналізовано отримані результати та зроблено відповідні висновки для частоти  $f_3 = 100 \text{ кГц}$ , оскільки в цьому випадку розглянуті явища проявлятимуться найбільш чітко [36].

### Висновки до розділу 3

На основі отриманих результатів при проведенні у даному розділу ряду

досліджень, було зроблено наступні висновки:

1) розрахунковий вираз аналітичної методики розрахунку [22] у тому вигляді, у якому він є, цілком можливо використовувати для розрахунку величини втрат  $K_f$  одношарових обмоток індуктивних елементів, однак за умови, що обмотка без осердя, кількість витків становить  $N \geq 30$ , а кінцевий результат розрахунку скориговано на величину відносного відхилення теоретичних та експериментальних даних (до 20.5% залежно від діаметра провідника та частоти);

2) розрахунок величини втрат одношарових обмоток індуктивних елементів з феромагнітним осердям за аналітичною методикою [22] проводити не можна, оскільки розходження теоретичних обчислень за даною методикою та експериментальними даними дуже суттєве та сягає приблизно 1000% (11 разів), оскільки вплив осердя на величину втрат обмотки у даній методиці не враховано;

3) у ході досліджень виявлено, що можливою причиною даного розходження є вплив зміненої конфігурації силових ліній магнітного поля всередині обмотки на розподіл струму у її провідниках при введенні феромагнітного осердя. Визначено, що втрати в осерді, у даному випадку, майже не впливають на загальну величину втрат обмотки (зміна величини втрат в осерді у 50 разів спричиняє приріст величини втрат обмотки  $K_f$  лише на 3%), тому ними можна знехтувати;

4) визначено, що розрахунковий вираз аналітичної методики розрахунку [22] потребує уточнення та доповнення рядом геометричних параметрів одношарової обмотки, що напряму впливають на величину втрат обмотки, у тому числі тими, що описують вплив кількості витків на величину втрат. Вказані доповнення виконаємо у наступному розділі.

## РОЗДІЛ 4

### МОДИФІКАЦІЯ ВИРАЗУ АНАЛІТИЧНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВЕЛИЧИНИ ВТРАТ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА

#### 4.1 Постановка задачі

Нагадаємо, що передумовою початку дослідження в межах даної дисертації стала невідповідність результатів теоретичного розрахунку одношарової обмотки індуктивного елемента за аналітичною методикою [22] та експериментальних (практичних) результатів в ультразвуковому діапазоні частот. У ході аналізу розрахункового виразу вказаної методики, проведеного у *Розділі 1*, висунуто припущення, що можливою причиною появи даної невідповідності може бути нехтування впливом на величину втрат ряду геометричних параметрів одношарової обмотки без осердя. Тому, відповідно до поставлених завдань, у *Розділі 2* та *Розділі 3* виконано дослідження впливу на величину втрат обмотки таких геометричних параметрів як діаметра обмотки  $D_{coil}$ , міжвиткової відстані  $h$  та кількості витків  $N$ . У ході вказаних досліджень виявлено, що для випадків найбільш практично застосовуваних параметрів обмотки та робочих частот, вплив на величину втрат вказаних геометричних параметрів обмотки суттєвий, тому висунуте раніше припущення про значний їх плив на величину втрат підтверджено.

Виходячи з результатів проведених досліджень, зроблено висновок, що розрахунковий вираз аналітичної методики розрахунку [22] потребує уточнення та доповнення згаданими вище геометричними параметрами, що напряду впливають на величину втрат для випадку одношарової обмотки без осердя. Оскільки вирішити дану задачу аналітичним шляхом важко, запропоновано вирішити її емпірично, із визначенням доповнюючих виразів, у які входитимуть знехтувані геометричні параметри обмотки, та подальшим розрахунком поправочних коефіцієнтів для конкретних практичних випадків.

Завданням дослідження в межах даного розділу стане аналіз можливих шляхів доповнення розрахункового виразу методики [22] вказаними

геометричними параметрами, проведення модифікації даного виразу шляхом внесення у нього знехтуваних раніше геометричних параметрів обмотки та розрахунку відповідних поправочних коефіцієнтів для найбільш застосовуваних на практиці робочих частот та геометричних параметрів обмотки без осердя. Виконати порівняння результатів теоретичних розрахунків за методикою [22] до модифікації та після з відповідними результатами експериментальних досліджень, зробити висновки щодо підвищення точності модифікованого виразу порівняно із початковим.

У даному розділі буде виконано модифікацію (доповнення) розрахункового виразу вказаними параметрами та розраховано відповідні поправочні коефіцієнти для найбільш практично використовуваних параметрів одношарових обмоток силових індуктивних елементів, що працюють на трьох найчастіше застосовуваних частотах ультразвукового діапазону. Вирішення поставлених завдань виконаємо емпіричним способом.

#### 4.2. Виконання досліджень. Експериментальна частина

Розпочнемо із проведення ряду експериментальних вимірювань для одношарових обмоток без феромагнітних осердь. Їх зміст полягатиме у проведенні машинних експериментів з подальшим розрахунком величин втрат обмотки  $K_f$ , величин опору втрат  $R_{AC}$  та індуктивності  $L$  обмоток вказаних індуктивних елементів. Вимірювання виконаємо для обмоток з параметрами, які широко застосовуються на практиці та обґрунтовані у *Розділі 2* дисертації. Експериментальні вимірювання проведемо для одношарових обмоток діаметрами:  $D_{coil1} = 3 \text{ мм}$ ,  $D_{coil2} = 5 \text{ мм}$ ,  $D_{coil3} = 7 \text{ мм}$ ,  $D_{coil4} = 9 \text{ мм}$ ,  $D_{coil5} = 11 \text{ мм}$ ,  $D_{coil6} = 13 \text{ мм}$ ,  $D_{coil7} = 15 \text{ мм}$ . Обмотку виконаємо провідником типу ПЕВ-1 щільним намотуванням, без кроку, (міжвиткову відстань обрано фіксованою та рівною подвійній товщині ізоляції провідника). Діаметри провідників обмоток приймемо рівними:  $d_1 = 0.25 \text{ мм}$ ,  $d_2 = 0.5 \text{ мм}$ ,  $d_3 = 0.75 \text{ мм}$ ,  $d_4 = 1 \text{ мм}$ . Кількість витків обмотки приймемо:  $N_1 = 1$ ,  $N_2 = 2$ ,  $N_3 = 5$ ,  $N_4 = 10$ ,  $N_5 = 15$ ,  $N_6 = 20$ ,  $N_7 = 25$ . Зауважимо, що проведення дослідження для обмотки з кількістю витків, що

не перевищує  $N = 25$  зумовлено, *по-перше*, обмеженнями за максимально можливою кількістю витків обмотки для машинного експерименту (у даному випадку це саме  $N = 25$  витків); *по-друге*, починаючи з даної кількості витків, ріст величини втрат обмотки різко сповільнюватиметься та мало залежатиме від подальшого росту кількості витків, тобто вийде на плато. Тому найбільший інтерес становитиме дослідження саме того діапазону кількості витків, за якого найбільш яскраво виражена залежність величини втрат від кількості витків обмотки. Експериментальні вимірювання виконаємо на частотах:  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц. Зауважимо, що вказані значення частот входять в ультразвуковий діапазон та є робочими частотами у тому числі й для УФ ультразвукових пристроїв великої потужності.

Результати вимірювань зведено у таблиці та представлено у Додатку Є.

#### **4.2.1 Аналіз можливих шляхів внесення доповнень у розрахунковий вираз методики**

Першим кроком до модифікації розрахункового виразу аналітичної методики [22] є аналіз можливих шляхів внесення у даний вираз ряду доповнень у вигляді геометричних параметрів, не врахованих у початковому виразі методики.

Дослідження почнемо із аналізу розрахункового виразу методики [22] (1.23), переписаного із заміною доданків, що описують втрати від скін-ефекту (лівий доданок) та ефекту близькості (правий доданок), на безрозмірні величини із зазначенням тих геометричних параметрів, від яких вони залежать. Останні виражені у вигляді їх відношення, з метою отримання безрозмірних величин. Для випадку одношарової обмотки, переписаний вираз (1.23) матиме вигляд:

$$K_f = K_{skin} \left( \frac{d}{\delta} \right) + K_{prox} \left( \frac{d}{D_{coil}}, \frac{d}{D_{wire}}, N \right) \quad (4.1)$$

де  $K_f$  – величина втрат одношарової обмотки;

$K_{skin}$  – величина, що описує вплив скін-ефекту на загальну величину втрат



обмотки;

$d$  – діаметр провідника (без ізоляції), мм;

$\delta$  – товщина скін-шару, мм;

$K_{prox}$  – величина, що описує загальний вплив ефекту близькості (без розділення на самоєфект близькості та міжвитковий ефект близькості);

$D_{coil}$  – діаметр обмотки, мм;

$D_{wire}$  – зовнішній діаметр провідника (з ізоляцією), мм;

$N$  – кількість витків одношарової обмотки.

Врахуємо, що у випадку одношарової обмотки, вплив ефекту близькості ( $K_{prox}$ ) на величину втрат обмотки  $K_f$  складається із впливу самоєфекту близькості ( $K_{prox\_circle}$ ) та міжвиткового ефекту близькості ( $K_{prox\_multiturn}$ ), тому перепишемо вираз (4.1) із врахуванням цього уточнення:

$$K_f = K_{skin} \left( \frac{d}{\delta} \right) + \left( K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right) \cdot N + K_{prox\_multiturn} \left( \frac{d}{D_{wire}}, N \right) \right) \quad (4.2)$$

де  $K_f$  – величина втрат одношарової обмотки;

$K_{skin}$  – величина, що описує вплив скін-ефекту на загальну величину втрат обмотки;

$d$  – діаметр провідника (без ізоляції), мм;

$\delta$  – товщина скін-шару, мм;

$K_{prox\_circle}$  – величина, що описує вплив самоєфекту близькості (кільцевого ефекту);

$D_{coil}$  – діаметр обмотки, мм;

$N$  – кількість витків одношарової обмотки;

$K_{prox\_multiturn}$  – величина, що описує вплив міжвиткового ефекту близькості;

$D_{wire}$  – зовнішній діаметр провідника (з ізоляцією), мм.

Проаналізуємо отриманий вираз. Як було згадано вище, лівий доданок виразу (4.2) описує вплив поверхневого ефекту (скін-ефекту)  $K_{skin}$  на загальну величину втрат одношарової обмотки  $K_f$ . Ступінь прояву та впливу даного

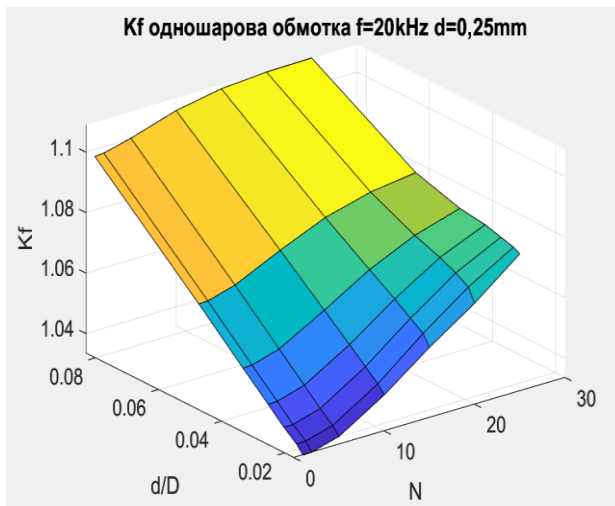
ефекту залежить від співвідношення діаметра провідника без ізоляції  $d$ , до товщини скін-шару  $\delta$ , яка, у свою чергу, залежить від частоти  $f$  та розраховується за виразом (1.11). У ході виконання досліджень виявлено, що вплив скін-ефекту на загальну величину втрат обмотки враховано відносно адекватно, тому основну увагу зосередимо на дослідженні коректності впливу ефекту близькості  $K_{prox}$  (4.1), описаного правим доданком виразу (4.2). Зауважимо, що саме у коректності впливу ефекту близькості на загальну величину втрат обмотки виникають сумніви, оскільки, нагадаємо, у ході проведеного вище аналізу розрахункового виразу методики було встановлено, що причиною значної розбіжності результатів розрахунків та експериментальних (практичних) результатів є нехтування рядом геометричних параметрів обмотки, від яких і залежить прояв як самоефекту близькості, так і міжвиткового ефекту близькості (4.2). Розглянемо правий доданок детальніше.

Вплив загального ефекту близькості  $K_{prox}$  у випадку одношарової обмотки можна розділити окремо на вплив самоефекту близькості  $K_{prox\_circle}$  та вплив міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn}$ . Зауважимо, що у правому доданку виразу (4.2) загальний коефіцієнт близькості представлено у вигляді суми величин  $K_{prox\_circle}$  та  $K_{prox\_multiturn}$ , що є досить умовним припущенням, оскільки поки невідомо реального співвідношення даних складових. Цілком ймовірно, що величина  $K_{prox\_circle}$  буде доданком до  $K_{prox\_multiturn}$ , як у даному випадку  $(K_{prox\_circle} + K_{prox\_multiturn})$ , множителем  $(K_{prox\_circle} \cdot K_{prox\_multiturn})$  чи показником степеня:  $(K_{prox\_multiturn}^{K_{prox\_circle}})$ . Тому на даному етапі розглядатимемо випадок суми цих двох безрозмірних величин.

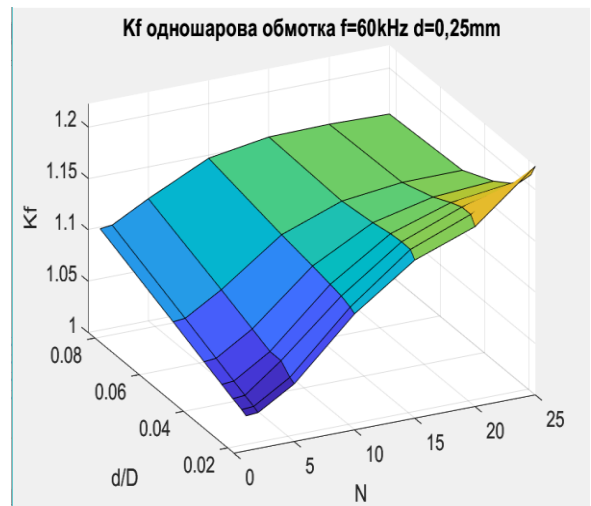
Перейдемо до аналізу кожного з них. Розпочнемо із величини, що описує вплив самоефекту близькості  $K_{prox\_circle}$ . Як було визначено у *Розділі 1*, при скручуванні одиночного провідника у виток, на розподіл струму у провіднику (відповідно, і величину втрат), окрім скін-ефекту, починає впливати діаметрально-протилежна частина того ж витка, тобто проявляється вплив самоефекту близькості. У ході досліджень, проведених у *Розділі 2*, виявлено, що на вплив даного ефекту на величину втрат значно впливає як діаметр витка

$D_{coil}$ , так і діаметр провідника  $d$ . Таким чином, припустимо, що величина впливу самоєфекту близькості для одиночного витка  $K_{prox\_circle}$  буде залежати від відношення діаметра провідника  $d$  до діаметра витка  $D_{coil}$ :  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ . При масштабуванні даного одиночного витка із заданими параметрами до багатовиткової одношарової обмотки з кількістю витків  $N$ , поки що припустимо, що і величина втрат від самоєфекту близькості  $K_{prox\_circle}$  буде зростати прямо пропорційно збільшенню кількості витків  $N$ . Тому у випадку багатовиткової обмотки величина втрат від самоєфекту близькості виражатиметься наступним чином:  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right) \cdot N$  (4.2). Зауважимо, що під поняттям діаметра витка  $D_{coil}$  маємо на увазі діаметр витка, що виконаний провідником в ізоляції, товщиною  $t$  (2.2). Однак, у даному випадку, вплив товщини ізоляції на величину втрат витка внаслідок збільшення його діаметра, мізерний, тому ним знехтуємо.

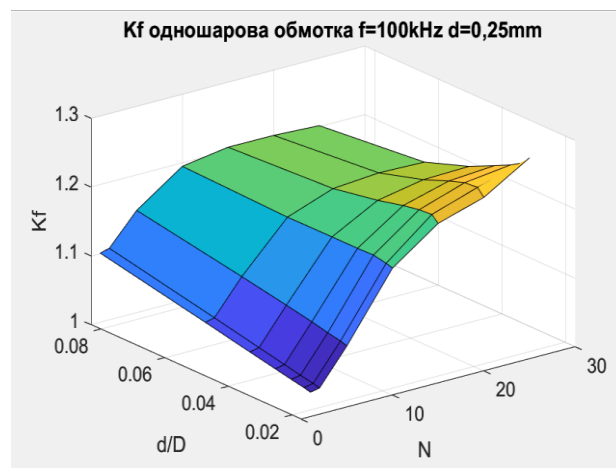
Для загального розуміння тенденції поведінки загальної величини втрат обмотки від наведених вище параметрів, побудовано графік залежності  $K_f = f \left( \frac{d}{D_{coil}}, N \right)$  на трьох частотах, з використанням експериментальних даних, отриманих у п.4.2. Відмітимо, що представлення залежності загальної величини втрат обмотки  $K_f$  як функції від двох змінних (у вигляді тривимірного графіка) дозволяє більш повно дослідити поведінку кривої  $K_f$  при одночасному впливі двох параметрів – кількості витків  $N$  та, фактично, діаметра обмотки  $D_{coil}$  (оскільки у відношенні  $d/D_{coil}$  діаметр провідника  $d$  фіксований у кожному з наведених графіків). Результати для провідника діаметром  $d_1 = 0.25$  мм представлено на рис. 4.1 а, б, в.



а)



б)



в)

Рисунок 4.1 – Графік залежності загальної величини втрат одношарової обмотки  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}, N\right)$  для провідника з  $d_1 = 0.25$  мм на частотах:

а)  $f_1 = 20$  кГц; б)  $f_2 = 60$  кГц; в)  $f_3 = 100$  кГц

(розроблено автором)

Розглянемо окремо тенденцію кривої залежності  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$ , зафіксувавши спочатку кількість витків на рівні  $N=1$ . Дослідження впливу діаметра витка  $D_{coil}$  на величину втрат обмотки  $K_f$  для різних діаметрів провідників  $d$  і частот  $f$  виконано у Розділі 2, з якого визначено, що вплив самоєфекту близькості для одновиткової обмотки зростає зі зменшенням діаметра витка  $D_{coil}$ , що проявляється у відповідному збільшенні величини втрат

$K_f$ . У даному випадку, при зменшенні значення відношення  $d/D_{coil}$  (збільшенні діаметра витка  $D_{coil}$ ) величина  $K_f$  спадає, що цілком узгоджується із теорією та отриманими раніше результатами. Однак зауважимо, що дана тенденція не буде стабільною у випадку збільшення кількості витків  $N$  та частоти  $f$ . Бачимо, що на частоті  $f_1 = 20 \text{ кГц}$  при збільшенні кількості витків  $N$  (при одночасному зменшенні величини  $d/D_{coil}$ ) крутизна спаду кривої  $K_f$  зменшується, що пояснюється можливим переважанням впливу міжвиткового ефекту близькості на загальну величину втрат обмотки.

У випадку збільшення частоти (до  $f_2 = 60 \text{ кГц}$  та  $f_3 = 100 \text{ кГц}$  відповідно) тенденція зменшення крутизни спаду кривої  $K_f$  зберігається зі збільшенням  $N$ . Однак, починаючи з певної кількості витків, при зменшенні значення  $d/D_{coil}$  величина  $K_f$  змінює свою тенденцію зі спаду на зростання. Можлива причина – переважання впливу міжвиткового ефекту близькості на загальну величину втрат обмотки та скін-ефекту.

Щодо залежності загальної величини втрат обмотки  $K_f$  від кількості витків, то отримана тенденція кривої  $K_f = f(N)$  відповідає результатам, отриманим у ході досліджень у *Розділі 3* дисертації – тобто, при збільшенні кількості витків обмотки  $N$ , величина втрат  $K_f$  нелінійно зростає, однак починаючи із певної кількості витків (за даних умов приблизно  $N \geq 30$ ) крива практично припиняє свій ріст та виходить на певне відносно постійне значення (плато), що спостерігаємо і в цьому випадку. Дана тенденція зберігається і для обмоток з різним значенням  $d/D_{coil}$ . При збільшенні частоти та зменшенні вказаного відношення (тобто, збільшенні діаметра витка  $D_{coil}$ ) відбуватиметься лише збільшення крутизни наростання кривої  $K_f = f(N)$ .

Розглянемо результати для провідника діаметром  $d_2 = 0.5 \text{ мм}$ , представлених на рис. 4.2 а, б, в.

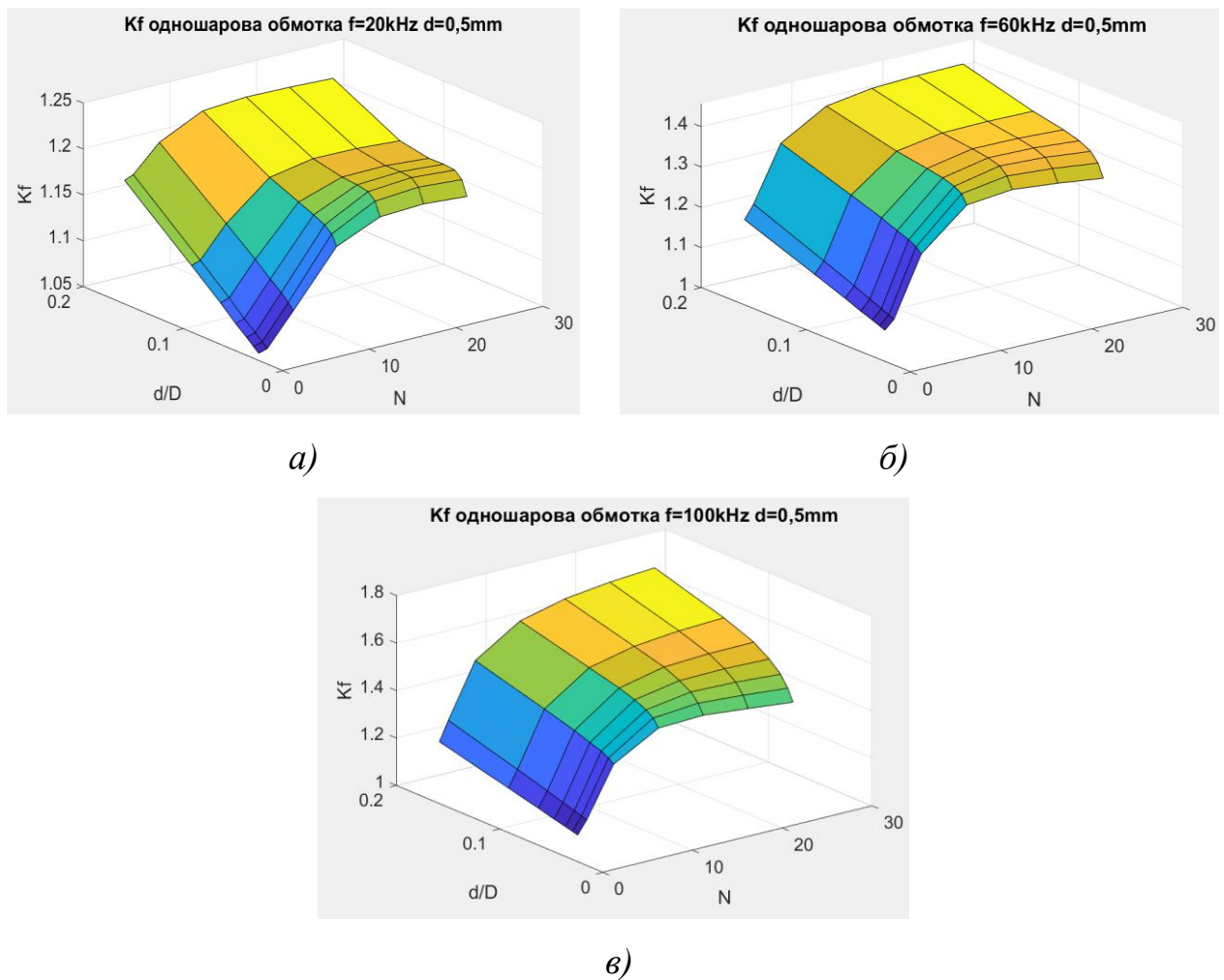


Рисунок 4.2 – Графік залежності загальної величини втрат одношарової

обмотки  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}, N\right)$  для провідника з  $d_2 = 0.5$  мм на частотах:

а)  $f_1 = 20$  кГц; б)  $f_2 = 60$  кГц; в)  $f_3 = 100$  кГц

(розроблено автором)

У випадку збільшення діаметра провідника, основні тенденції поведінки кривих  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  та  $K_f = f(N)$ , в цілому, залишаються без особливих змін та відповідають описаним для провідника з  $d_1 = 0.25$  мм. Однак є певні відмінності, спричинені можливим збільшенням впливу скін-ефекту при збільшенні діаметра провідника. Загалом, в даному випадку (на усіх трьох частотах) спостерігаємо певне збільшення величини втрат обмотки  $K_f$  порівняно із попереднім випадком (рис. 4.1 а, б, в), збільшення крутості наростання кривої залежності  $K_f = f(N)$  при збільшенні кількості витків  $N$  та

більш швидкий її вихід на плато, незначне збільшення крутості спаду кривої

$K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  у випадку зменшення відношення  $d/D_{coil}$ , однак, зі збільшенням

кількості витків  $N$ , спостерігаємо, що крива  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$ , не змінюючи

тенденції спадання, за невеликих значень відношення  $d/D_{coil}$  різко збільшує

крутість спаду. Теоретично це пояснюється переважання впливу міжвиткового

ефекту близькості над самоефектом близькості на загальну величину втрат обмотки. Розглянемо результати для провідника діаметром  $d_3 = 0.75$  мм, представлених на рис. 4.3 а, б, в.

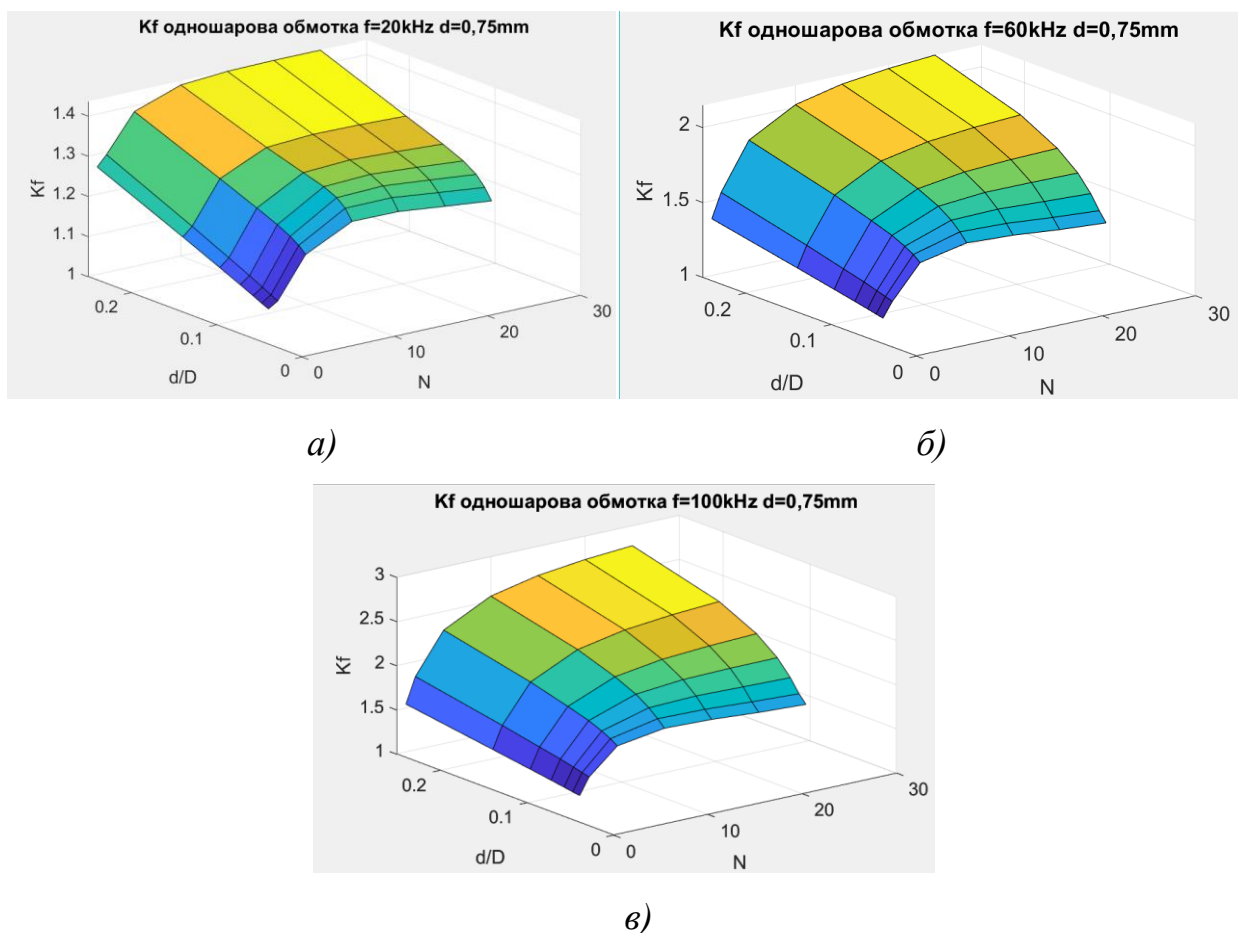
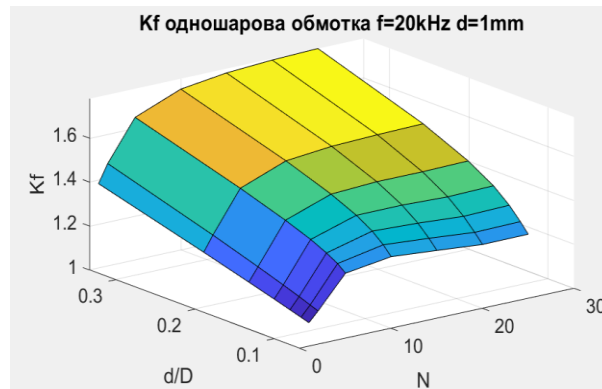


Рисунок 4.3 – Графік залежності загальної величини втрат одношарової обмотки  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}, N\right)$  для провідника з  $d_3 = 0.75$  мм на частотах:

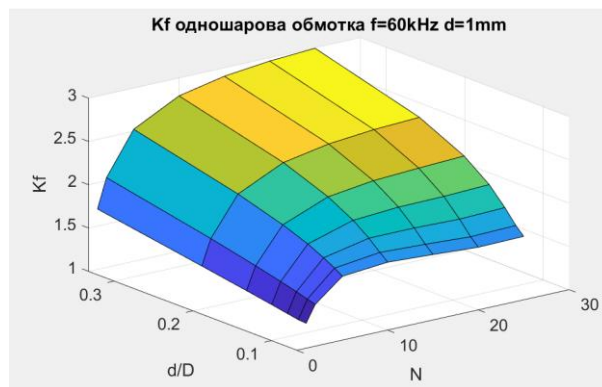
а)  $f_1 = 20$  кГц; б)  $f_2 = 60$  кГц; в)  $f_3 = 100$  кГц

(розроблено автором)

У випадку подальшого збільшення діаметра провідника, основні тенденції поведінки кривих  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  та  $K_f = f(N)$ , в цілому, залишаються без особливих змін та відповідають описаним для провідника з  $d_1 = 0.25$  мм та  $d_2 = 0.5$  мм. Однак є певні відмінності, спричинені можливим збільшенням впливу скін-ефекту при подальшому збільшенні діаметра провідника. У даному випадку (на усіх трьох частотах) спостерігаємо збільшення величини втрат обмотки  $K_f$ , порівняно із попередніми випадками (рис. 4.1 а, б, в та рис. 4.2 а, б, в), тенденції кривих  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  та  $K_f = f(N)$  відповідають описаним для провідника  $d_2 = 0.5$  мм з тією невеликою відмінністю, що для випадку частоти  $f_1 = 20$  кГц крива  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  при збільшенні кількості витків  $N$  має більшу плавність спаду. Розглянемо результати для провідника діаметром  $d_4 = 1$  мм, представлених на рис. 4.4 а, б, в.

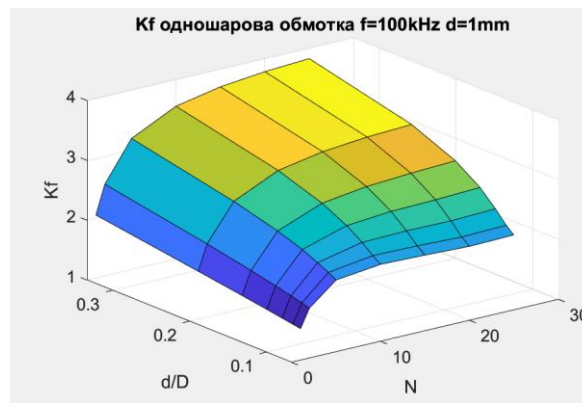


а)



б)





в)

Рисунок 4.4 – Графік залежності загальної величини втрат одношарової

обмотки  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}, N\right)$  для провідника з  $d_4 = 1$  мм на частотах:

а)  $f_1 = 20$  кГц; б)  $f_2 = 60$  кГц; в)  $f_3 = 100$  кГц

(розроблено автором)

При збільшенні діаметра провідника до  $d_4 = 1$  мм, основні тенденції поведінки кривих  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  та  $K_f = f(N)$ , в цілому, залишаються без особливих змін та відповідають описаним для провідника з  $d_1 = 0.25$  мм,  $d_2 = 0.5$  мм та  $d_3 = 0.75$  мм. У даному випадку (на усіх трьох частотах) спостерігаємо подальше збільшення величини втрат обмотки  $K_f$ , порівняно із попередніми випадками (рис. 4.1 а, б, в, рис. 4.2 а, б, в та рис. 4.3 а, б, в), тенденції та крутість кривих  $K_f = f\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  та  $K_f = f(N)$  відповідають описаним для провідника  $d_2 = 0.5$  мм та  $d_3 = 0.75$  мм.

Перейдемо до розгляду коефіцієнта, що описує вплив міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn}$  для випадку багатовиткової одношарової обмотки. У Розділі 1 визначено, що при масштабуванні обмотки до багатовиткової, на розподіл струму у провіднику (величину втрат) окрім скін-ефекту та самоефекту близькості почне впливати додатково міжвитковий ефект близькості. У результаті проведених у Розділі 2 досліджень визначено, що на ступінь прояву міжвиткового ефекту близькості впливає відстань між витками

$h''$ , яка, у свою чергу, визначається подвійним значенням товщини ізоляції  $a$  провідника та введеного примусового кроку намотування  $h$  (2.2). Іншим способом опису впливу товщини ізоляції для конкретного діаметра провідника на міжвиткову відстань при щільному намотуванні без кроку є використання поняття зовнішнього діаметра провідника (з ізоляцією)  $D_{wire}$  (2.2) (зауважимо, що на практиці товщина ізоляції не однакова для різних діаметрів провідників). Таким чином, припустимо, що величина впливу міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn}$  для багатовиткової одношарової обмотки буде залежати від відношення діаметра провідника  $d$  до зовнішнього діаметра провідника (діаметра провідника в ізоляції)  $D_{wire}$ :  $K_{prox\_multiturn} \left( \frac{d}{D_{wire}} \right)$ . Зазначимо, що у розрахунковому виразі методики [22] вплив міжвиткової відстані впринципі враховано (1.25), оскільки перед правим доданком, що відповідає за вплив ефекту близькості, введено множник  $\eta$  (1.26), який якраз дорівнює  $\eta = \frac{d}{D_{wire}}$ .

Додамо, що при введенні примусового кроку намотування  $h$ , останній додає до величини  $D_{wire}$ .

У результаті проведення подальших досліджень у *Розділі 2* виявлено, що у методиці знехтувано нерівномірністю розподілу струму у крайніх та внутрішніх витках, що суттєво впливає на коректність врахування міжвиткового ефекту близькості. Тому, необхідно певним чином врахувати дане явище. Враховуючи, що вказана нерівномірність починає проявлятися (та взагалі має сенс) за кількості витків  $N \geq 3$  цілком логічно припустити, що прояв міжвиткового ефекту близькості з урахуванням виявленої нерівномірності розподілу струмів залежатиме ще й від кількості витків. У даному випадку величина, що описує кількість витків  $N$ , входить у склад величини  $K_{prox\_multiturn}$ . Яким чином – розглянемо далі.

У ході виконання досліджень залежності величини втрат одношарової обмотки від кількості витків, проведеного у *Розділі 3*, встановлено, що при збільшенні кількості витків  $N$  величина втрат обмотки також зростає. За

прийнятих у дослідженні геометричних параметрах обмоток, зростання величини втрат спостерігалось приблизно до  $N = 25$  витків, далі ріст різко сповільнювався та при подальшому збільшенні числа витків величина втрат майже не змінювалася. Таким чином, у діапазоні кількості витків  $N = 2...25$  необхідно визначити поправку на вплив кількості витків на величину втрат обмотки (а точніше, на міжвитковий ефект близькості), що і виконаємо далі. За кількості витків у діапазоні  $N = 30...50$ , коли відносне відхилення теоретичних та експериментальних значень величини втрат відносно стабільне, для визначених геометричних параметрів одношарової обмотки без осердя у Додатку Д визначено конкретні значення корекції результатів розрахунку для методики [22].

У розглянутих вище поясненнях впливу кількості витків на міжвитковий ефект близькості (нерівномірності розподілу струму у витках при  $N \geq 3$  та залежності величини втрат обмотки від кількості витків у діапазоні  $N = 2...25$ ) фігурує величина кількості витків  $N$ . Хоч в обох випадках наявний даний параметр, визначати його як змінну, від якого залежить загальне значення міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn}$  не можна, оскільки і в першому, і в другому випадку описуються дещо різні процеси. Тому, враховуючи наведені вище викладки, для спрощення подальшого аналізу пропонуємо додатково диференціювати коефіцієнт  $K_{prox\_multiturn}$ , що описує загальний вплив міжвиткового ефекту близькості, на три складові – коефіцієнт, що описує вплив на міжвитковий ефект близькості міжвиткової відстані (від відношення діаметра провідника  $d$  до зовнішнього діаметра провідника  $D_{wire}$ ) –  $K_{prox\_multiturn\_d/D}$ ; – коефіцієнт, що описує вплив на міжвитковий ефект близькості нерівномірності розподілу струмів у крайніх та внутрішніх витках (при  $N \geq 3$ ) –  $K_{prox\_multiturn\_ext-int}$ ; – коефіцієнт, що описує вплив на міжвитковий ефект близькості кількості витків  $N$  (при  $N = 2...25$ ) –  $K_{prox\_multiturn\_N}$ .

Для зручності подальшого аналізу перепишемо вираз (4.2) із урахуванням вказаних уточнень.

$$K_f = K_{skin} \left( \frac{d}{\delta} \right) + \left( K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right) \cdot N + \dots \right. \\ \left. \dots + K_{prox\_multiturn\_d/D} \left( \frac{d}{D_{wire}} \right) + K_{prox\_multiturn\_ext-int}(N) \cdot a' + K_{prox\_multiturn\_N}(N) \cdot b \right) \cdot c \quad (4.3)$$

де  $K_f$  – величина втрат одношарової обмотки;

$K_{skin}$  – коефіцієнт, що описує вплив скін-ефекту на загальну величину втрат обмотки;

$d$  – діаметр провідника (без ізоляції), мм;

$\delta$  – товщина скін-шару, мм;

$K_{prox\_circle}$  – коефіцієнт, що описує вплив самоефекту близькості (кільцевого ефекту);

$D_{coil}$  – діаметр обмотки, мм;

$N$  – кількість витків одношарової обмотки;

$K_{prox\_multiturn\_d/D}$  – коефіцієнт, що описує вплив на міжвитковий ефект близькості відстані між витками;

$D_{wire}$  – зовнішній діаметр провідника (з ізоляцією), мм;

$K_{prox\_multiturn\_ext-int}$  – коефіцієнт, що описує вплив на міжвитковий ефект близькості нерівномірності розподілу струму у зовнішніх та внутрішніх витках;

$a'$  – множник, що визначає необхідність врахування коефіцієнта  $K_{prox\_multiturn\_ext-int}$ ;

$K_{prox\_multiturn\_N}$  – коефіцієнт, що описує вплив на міжвитковий ефект близькості кількості витків;

$b$  – множник, що визначає необхідність врахування коефіцієнта  $K_{prox\_multiturn\_N}$ ;

$c$  – множник, що визначає необхідність врахування міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn}$ .

Одразу пояснимо призначення множників  $a'$ ,  $b$  та  $c$ , введених у виразі

(4.3). Як було визначено раніше, вплив тієї чи іншої величини на ефект близькості матиме сенс лише за певної кількості витків обмотки. Наприклад, коефіцієнт  $K_{prox\_multiturn\_ext-int}$ , що описує вплив на міжвитковий ефект близькості нерівномірності розподілу струму у зовнішніх та внутрішніх витках, матиме сенс лише за кількості витків  $N \geq 3$ . Тому для вказаної кількості витків, множник  $a'$  дорівнюватиме одиниці. За кількості витків  $N < 3$ , втрачається сам сенс поняття крайніх та внутрішніх витків, тому множник  $a'$  дорівнюватиме нулю, відповідно і коефіцієнт  $K_{prox\_multiturn\_ext-int}$  перестав враховуватися.

Аналогічним чином працює і множник  $b$ . Коефіцієнт  $K_{prox\_multiturn\_N}$ , що описує вплив на міжвитковий ефект близькості кількості витків  $N$ , та виведений для конкретної тенденції залежності  $K_f = f(N)$ , матиме сенс лише за кількості витків  $2 \leq N \leq 25$ . Тому для вказаного діапазону кількості витків, множник  $b$  дорівнюватиме  $b = 1$ . За кількості витків  $N > 25$  множник  $a'$  дорівнюватиме нулю, оскільки за даної кількості витків  $K_f \neq f(N)$ , відповідно і коефіцієнт  $K_{prox\_multiturn\_N}$ , виведений під певну тенденцію залежності, перестав враховуватися.

Щодо множника  $c$ , то він виконує ту ж саму роль, що і попередні. Коефіцієнт  $K_{prox\_multiturn}$ , що описує загальний вплив на міжвитковий ефект близькості міжвиткового ефекту близькості, матиме сенс лише за кількості витків  $N > 1$ , тобто для багатовиткової обмотки, що цілком логічно. Відповідно, для обмотки, з кількістю витків  $N \geq 2$  множник  $c$  дорівнюватиме одиниці. У випадку одновиткової обмотки, втрачається сенс поняття міжвиткового ефекту близькості, тому множник  $c$  дорівнюватиме нулю, відповідно, і коефіцієнт  $K_{prox\_multiturn}$  перестав враховуватися.

Після проведеного вище аналізу можливих способів внесення уточнень у розрахунковий вираз методики [22] та визначенні ряду безрозмірних величин, що описують вплив на величину  $K_f$  частотних ефектів (скін-ефекту ( $K_{skin}$ ) та різновидів ефекту близькості ( $K_{prox\_circle}$ ,  $K_{prox\_multiturn\_ext-int}$ ,  $K_{prox\_multiturn\_N}$ )), які залежать від знехтуваних у початковому виразі методики геометричних параметрів обмотки, перейдемо до побудови ряду кривих, що описуватимуть

вказані узагальнені безрозмірні величини з метою подальшого переходу до більш конкретного математичного їх опису залежно від тих чи інших геометричних параметрів обмотки.

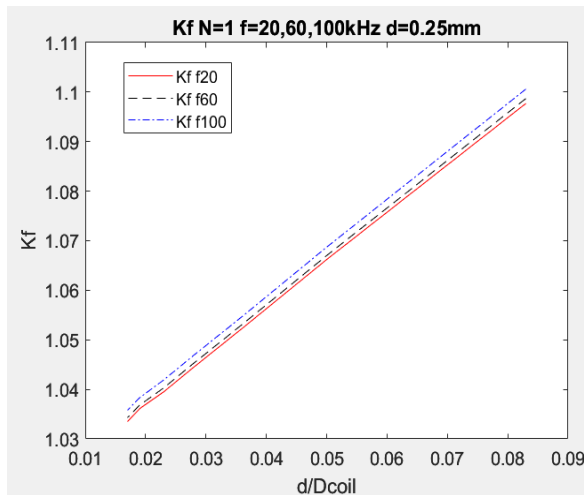
Розпочнемо одразу із розгляду тих безрозмірних величин, що описують вплив ефекту близькості (його складових частин) на величину втрат обмотки  $K_f$ , оскільки, як було зазначено раніше, вплив скін-ефекту в аналітичній методиці [22] враховано відносно коректно.

Розглянемо величину  $K_{prox\_circle}$ , що описує вплив самоефекту близькості на загальну величину втрат одношарової обмотки  $K_f$ . Оскільки, теоретично, величина впливу даного ефекту залежить від взаємного впливу діаметрально протилежних частин одного й того ж витка, задачу знаходження величини  $K_{prox\_circle}$  можна спростити шляхом її вирішення для одновиткової обмотки ( $N = 1$ ). Величина впливу самоефекту близькості  $K_{prox\_circle}$  для одиночного витка залежатиме від відношення діаметра провідника  $d$  до діаметра витка  $D_{coil}$ :

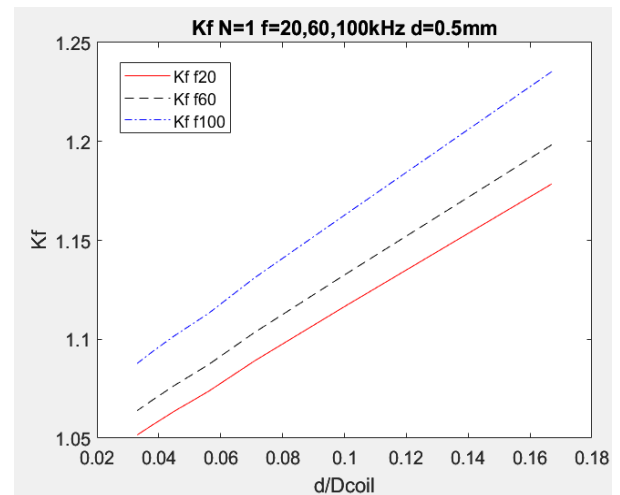
$K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ . Виконаємо побудову графіків залежності загальної величини

втрат  $K_f$  одиночного витка від самоефекту близькості (відношення  $\frac{d}{D_{coil}}$ ). Виток

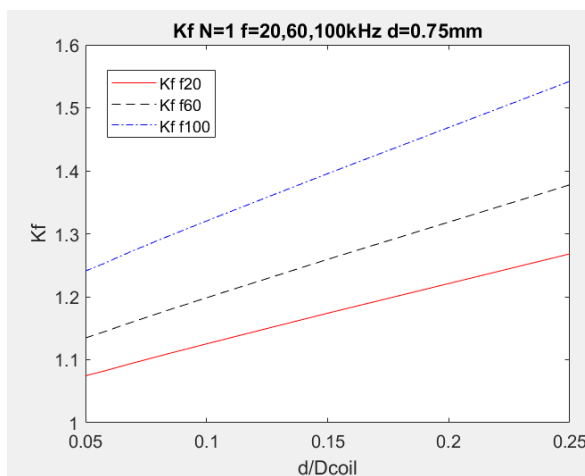
виконано провідником з діаметрами  $d_1 = 0.25$  мм,  $d_2 = 0.5$  мм,  $d_3 = 0.75$  мм,  $d_4 = 1$  мм. Діаметр витка встановимо рівним:  $D_{coil1} = 3$  мм,  $D_{coil2} = 5$  мм,  $D_{coil3} = 7$  мм,  $D_{coil4} = 9$  мм,  $D_{coil5} = 11$  мм,  $D_{coil6} = 13$  мм,  $D_{coil7} = 15$  мм. Побудову виконаємо для частот:  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц. Результати представлено на рис. 4.5 а, б, в, г.



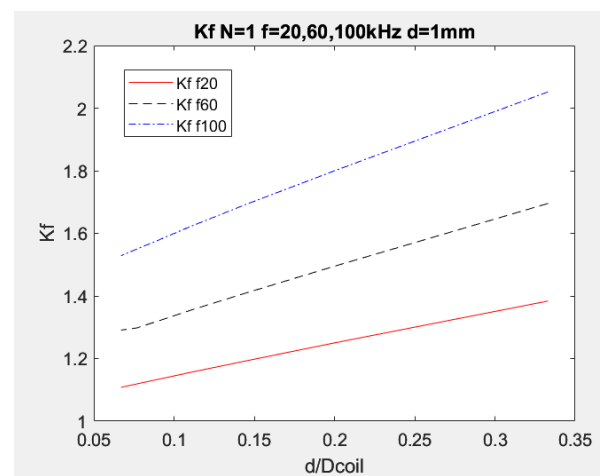
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.5 – Вплив на величину втрат  $K_f$  одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  явища самоєфекту близькості  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  на частотах  $f$  для провідників

діаметром: а)  $d_1 = 0.25$  мм; б)  $d_2 = 0.5$  мм; в)  $d_3 = 0.75$  мм; г)  $d_4 = 1$  мм

(розроблено автором)

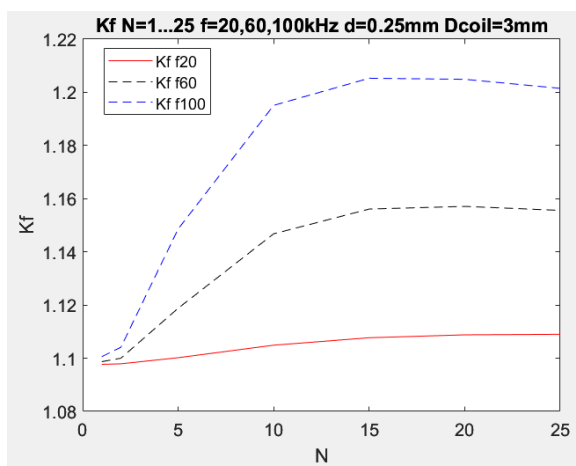
Як бачимо, для одновиткової обмотки залежність величини втрат  $K_f$  від впливу самоєфекту близькості  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  є лінійною, причому, дана тенденція зберігається для усіх розглянутих діаметрів провідників та частот – зі збільшенням відношення  $d/D_{coil}$  (фактично зі зменшенням діаметра витка  $D_{coil}$ ) величина втрат  $K_f$  лінійно зростає, що цілком відповідає теоретичним викладкам у Розділі 2.

У випадку витка, виконаного з провідника діаметром  $d_1 = 0.25$  мм на усіх трьох частотах крутизна прямих залишається однаковою, незначним чином зростає лише їх зміщення при збільшенні частоти. Пояснюється це, очевидно, слабким впливом скін-ефекту для даного діаметра провідника.

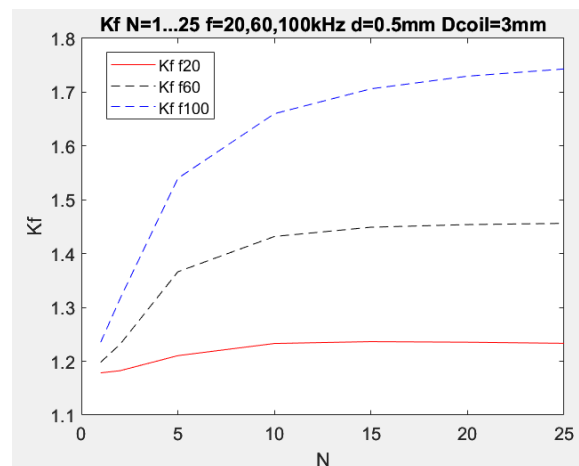
У випадку витка, виконаного з провідників діаметром  $d_2 = 0.5$  мм,  $d_3 = 0.75$  мм та  $d_4 = 1$  мм крутизна прямих починає помітно зростати з ростом частоти, окрім того, зростатиме і зміщення для відповідних прямих. Однак, при збільшенні діаметра провідника, загальна крутизна усіх прямих буде зменшуватися, максимальна величина втрат витка  $K_f$  – зростатиме. Теоретично, пояснюється це зростанням впливу скін-ефекту зі збільшенням діаметра провідника.

Розглянемо величину  $K_{prox\_multiturn\_N}$ , що описує вплив міжвиткового ефекту близькості (залежно від кількості витків  $N$ ) на загальну величину втрат обмотки  $K_f$  виконаної провідниками з діаметрами  $d_1 = 0.25$  мм,  $d_2 = 0.5$  мм,  $d_3 = 0.75$  мм та  $d_4 = 1$  мм для випадку трьох діаметрів каркасів:  $D_{coil1} = 3$  мм,  $D_{coil4} = 9$  мм та  $D_{coil7} = 15$  мм на трьох частотах  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц.

На рис. 4.6 а, б, в, г представлені відповідні графічні залежності для діаметра обмотки  $D_{coil1} = 3$  мм.

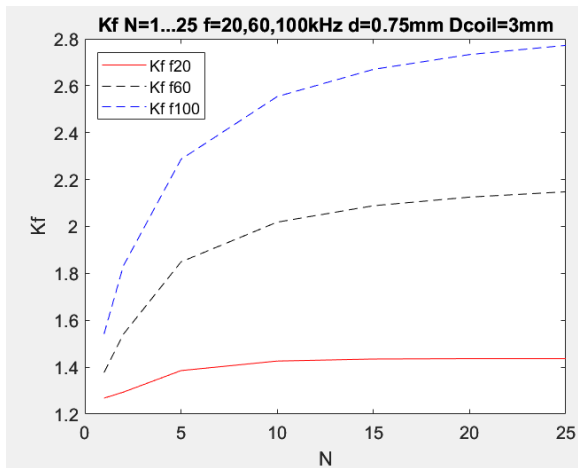


а)

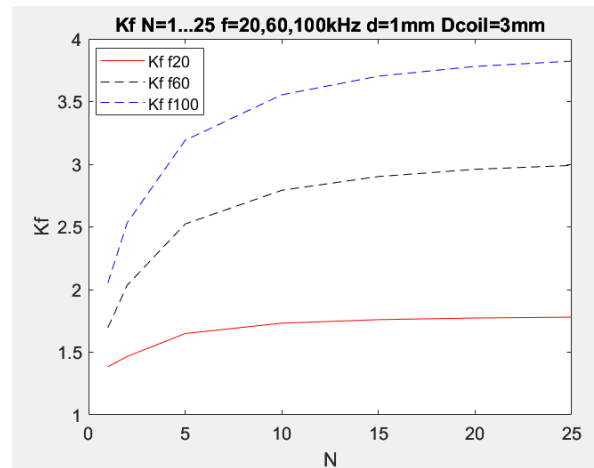


б)





б)



г)

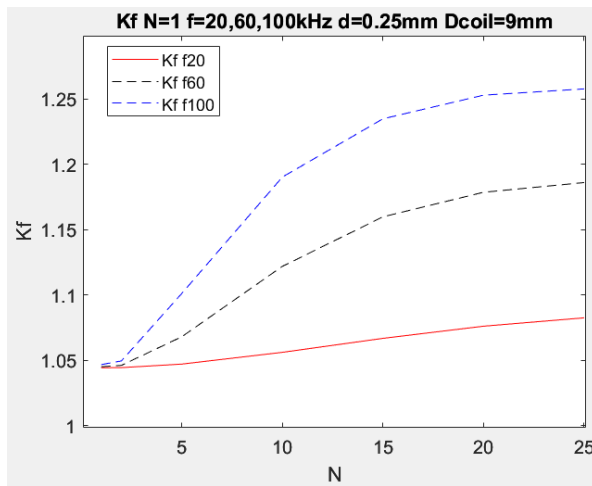
Рисунок 4.6 – Вплив міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$ , (залежно від кількості витків  $N$ ) на загальну величину втрат обмотки  $K_f$ , для обмотки діаметром  $D_{coil1} = 3$  мм на частотах  $f$ , для діаметрів провідників:

а)  $d_1 = 0.25$  мм; б)  $d_2 = 0.5$  мм; в)  $d_3 = 0.75$  мм; г)  $d_4 = 1$  мм

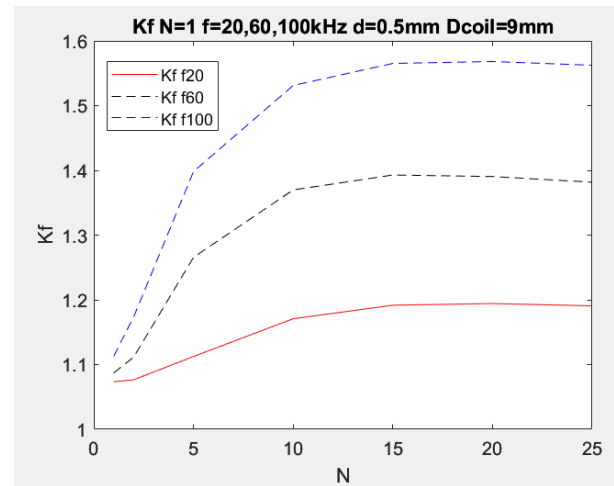
(розроблено автором)

Як бачимо, для усіх випадків (діаметрів провідників), тенденції кривих  $K_f = f(N)$  відносно однакові, (різке наростання величини втрат для малих значень кількості витків з подальшим сповільненням росту та виходом на плато при подальшому збільшенні кількості витків). Спостерігаємо лише збільшення крутизни даних кривих з ростом частоти та відповідне зростання величини загальних втрат  $K_f$  в межах кожного з розглянутих діаметрів провідників очевидно через посилення впливу скін-ефекту при збільшенні діаметра провідника.

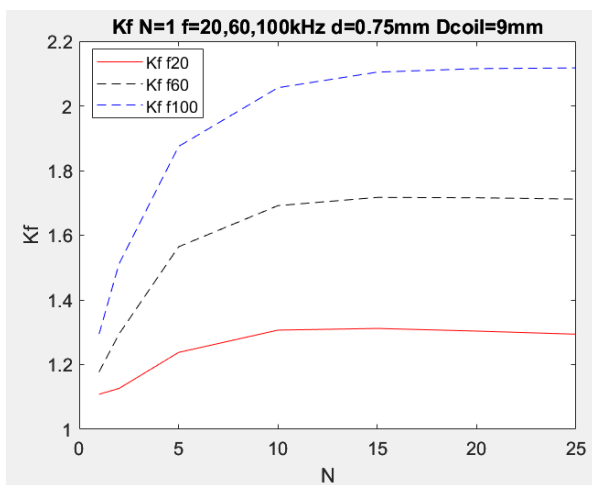
На рис. 4.7 а, б, в, г представлені відповідні графічні залежності для діаметра обмотки  $D_{coil4} = 9$  мм.



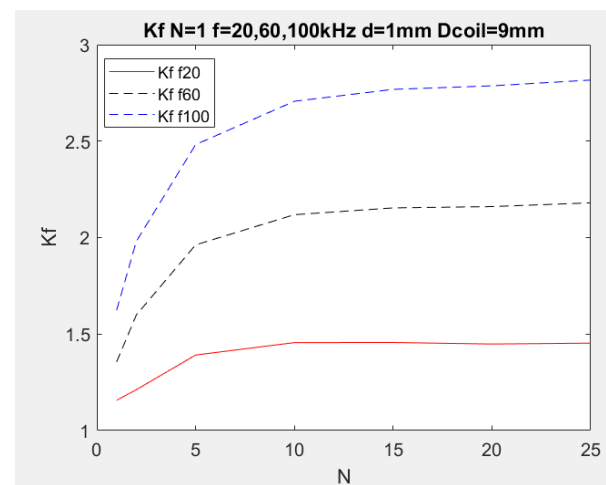
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.7 – Вплив міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$ , (залежно від кількості витків  $N$ ) на загальну величину втрат обмотки  $K_f$ , для обмотки діаметром  $D_{coil4} = 9$  мм на частотах  $f$ , для діаметрів провідників:

а)  $d_1 = 0.25$  мм; б)  $d_2 = 0.5$  мм; в)  $d_3 = 0.75$  мм; г)  $d_4 = 1$  мм

(розроблено автором)

Як бачимо, тенденція наведених вище кривих для розглянутих частот та діаметрів провідників аналогічна попередньому випадку. Однак варто відмітити, що в загальному випадку, максимальні значення величин втрат для кожного випадку діаметра провідника та частоти будуть менші, ніж для обмоток з діаметром  $D_{coil1} = 3$  мм, що цілком пояснюється зменшенням впливу самоефекту близькості при збільшенні діаметра обмотки.

На рис. 4.8 а, б, в, г представлені відповідні графічні залежності для

діаметра обмотки  $D_{coil7} = 15 \text{ мм}$ .

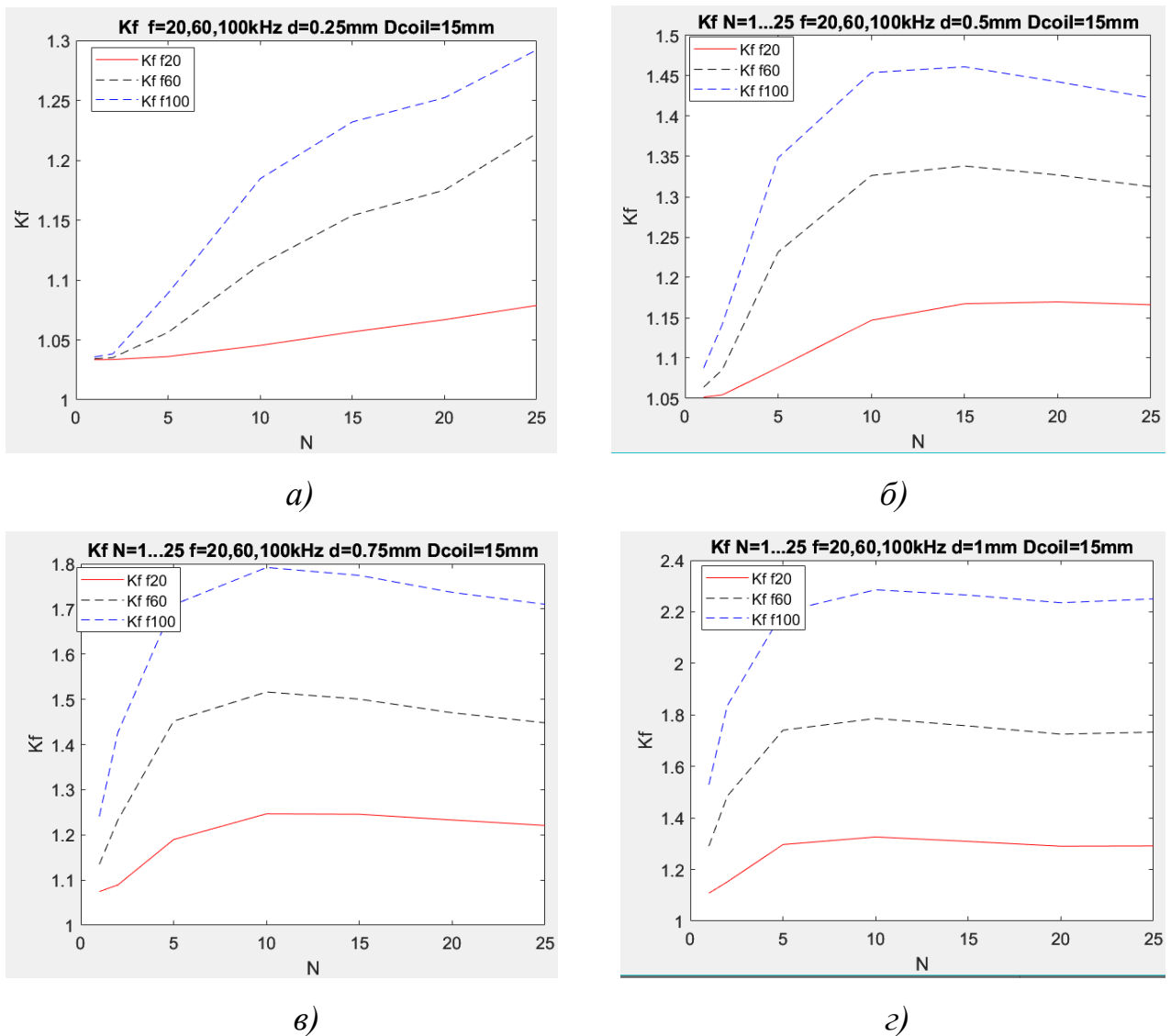


Рисунок 4.8 – Вплив міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$ , (залежно від кількості витків  $N$ ) на загальну величину втрат обмотки  $K_f$ , для обмотки діаметром  $D_{coil7} = 15 \text{ мм}$  на частотах  $f$ , для діаметрів провідників:

а)  $d_1 = 0.25 \text{ мм}$ ; б)  $d_2 = 0.5 \text{ мм}$ ; в)  $d_3 = 0.75 \text{ мм}$ ; г)  $d_4 = 1 \text{ мм}$

(розроблено автором)

Як бачимо, тенденція наведених вище кривих для розглянутих частот та діаметрів провідників аналогічна попереднім випадкам. Також, максимальні значення величин втрат для кожного випадку діаметра провідника та частоти будуть менші, ніж для обмоток з діаметром  $D_{coil1} = 3 \text{ мм}$  та  $D_{coil4} = 9 \text{ мм}$ , що, як і в попередньому випадку, пояснюється зменшенням впливу самоефекту

близькості при збільшенні діаметра обмотки.

Вище було розглянуто криві залежності  $K_f = f(N)$  лише для трьох значень діаметрів обмоток, оскільки основні тенденції поведінки кривих аналогічні і для інших значень діаметрів. Для апроксимації, яку проведемо далі, використаємо дані для усіх обраних діаметрів обмоток  $D_{coil}$ .

Отже, отримавши ряд кривих залежностей величини втрат  $K_f$  від впливу самоєфекту близькості  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  та міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для визначених геометричних параметрів обмоток, перейдемо до конкретного математичного опису вказаних вище безрозмірних величин та розрахунків коефіцієнтів для вказаних геометричних параметрів обмотки шляхом апроксимації вказаних кривих.

#### **4.2.2 Апроксимація експериментальних кривих. Вибір апроксимуючої функції. Розрахунок коефіцієнтів апроксимації для найбільш поширених практичних випадків**

Апроксимацію у межах даного підрозділу проведемо за допомогою спеціалізованого математичного пакету, що дозволяє в ручному режимі вибирати найбільш оптимальну апроксимуючу функцію для отримання найвищої точності апроксимації з розрахунком відповідних апроксимуючих коефіцієнтів.

Однак спочатку визначимо загальні принципи вибору найбільш оптимальної апроксимуючої функції. Отже, до вказаної функції висуваються наступні вимоги:

- функція повинна достатньо точно передавати характеристику кривої, що апроксимується;
- отриманий вираз повинен бути зручним та простим як для практичного використання, так і для подальших можливих досліджень;
- апроксимуюча функція повинна бути бажано одного виду як для

величини, що описує вплив самоефекту близькості  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ , так і для величини, що описує міжвитковий ефект близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$ .

Перейдемо до апроксимації кривих, що описують вплив самоефекту близькості  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  для одиночного витка на загальну величину втрат  $K_f$ , представлених на рис. 4.5. а, б, в, г. На рис. 4.9 наведемо приклад проведення апроксимації у додатку Curve Fitter математичного пакету MatLAB R2022b [38].

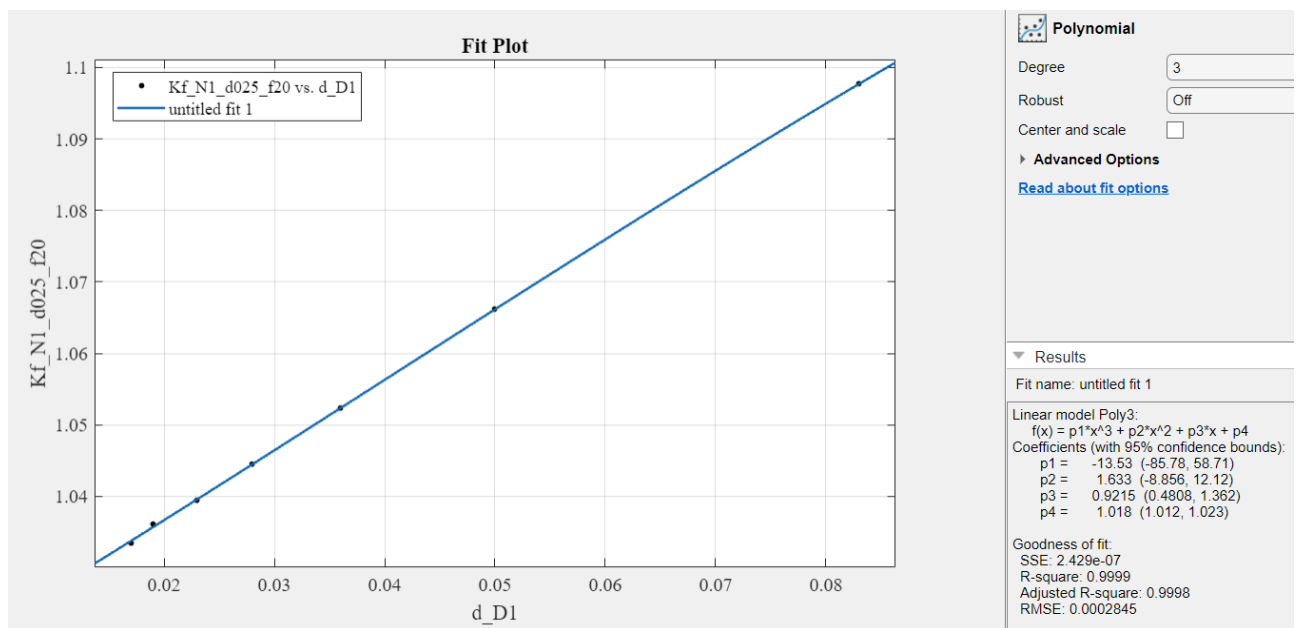


Рисунок 4.9 – Апроксимація експериментально отриманої кривої, що описує вплив самоефекту близькості  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  на величину втрат  $K_f$  для одиночного витка з провідника діаметром  $d_l = 0.25$  мм на частоті  $f = 20$  кГц (розроблено автором)

Особливих утруднень із підбором апроксимуючої функції для величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  у випадку одного витка не виникає – експериментальна крива має практично лінійний характер та досить точно може апроксимуватися поліноміальною функцією першого порядку. Однак, враховуючи, що у подальших дослідженнях для більшої кількості витків крива матиме нелінійний

характер (рис. 4.1 – 4.4), було вирішено використовувати апроксимуючий поліном одного порядку на усьому діапазоні кількості витків обмотки, тому для випадку одновиткової обмотки апроксимуючий поліном оберемо третього порядку. На рис. 4.9 зазначено вигляд апроксимувальної функції  $f(x)$  та розраховано відповідні апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$ , що відповідають вказаним геометричним параметрам даної обмотки. Таким чином, у випадку одновиткової обмотки, величина  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  буде описуватися поліномом:

$$K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right) = p_1 \cdot \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^3 + p_2 \cdot \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^2 + p_3 \cdot \frac{d}{D_{coil}} + p_4 \cdot$$

Виконаємо аналогічним чином апроксимацію та розрахунок апроксимуючих коефіцієнтів для інших геометричних параметрів одновиткової обмотки – діаметрів провідників  $d$ , діаметрів витків  $D_{coil}$  та частот  $f$ . Результати представлено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$

для  $N=1$ , діаметра провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	-13.53	1.633	0.921	1.018
	$f = 60 \text{ кГц}$	-10.63	1.268	0.936	1.018
	$f = 100 \text{ кГц}$	-8.393	0.946	0.955	1.021
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	-1.367	0.076	0.978	1.019
	$f = 60 \text{ кГц}$	-1.513	0.133	1.028	1.031
	$f = 100 \text{ кГц}$	-1.257	0.111	1.121	1.051
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	1.299	-0.852	1.123	1.021
	$f = 60 \text{ кГц}$	1.997	-1.219	1.426	1.066
	$f = 100 \text{ кГц}$	3.871	-2.145	1.851	1.153
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	0.651	-0.628	1.198	1.031
	$f = 60 \text{ кГц}$	-3.384	1.767	1.294	1.194
	$f = 100 \text{ кГц}$	3.005	-2.363	2.499	1.371

Розроблено автором

Аналогічним чином розраховуються апроксимуючі коефіцієнти для випадків більшої кількості витків  $N$ . Результати даного розрахунку винесено у Додаток 3. Перейдемо до апроксимації кривих, що описують вплив міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для багатовиткової обмотки трьох різних діаметрів на загальну величину втрат  $K_f$ , представлених на рис.

4.6. а, б, в, г, рис. 4.7. а, б, в, г та рис. 4.8. а, б, в, г. На рис. 4.10 наведемо приклад проведення апроксимації у тому ж додатку математичного пакета.

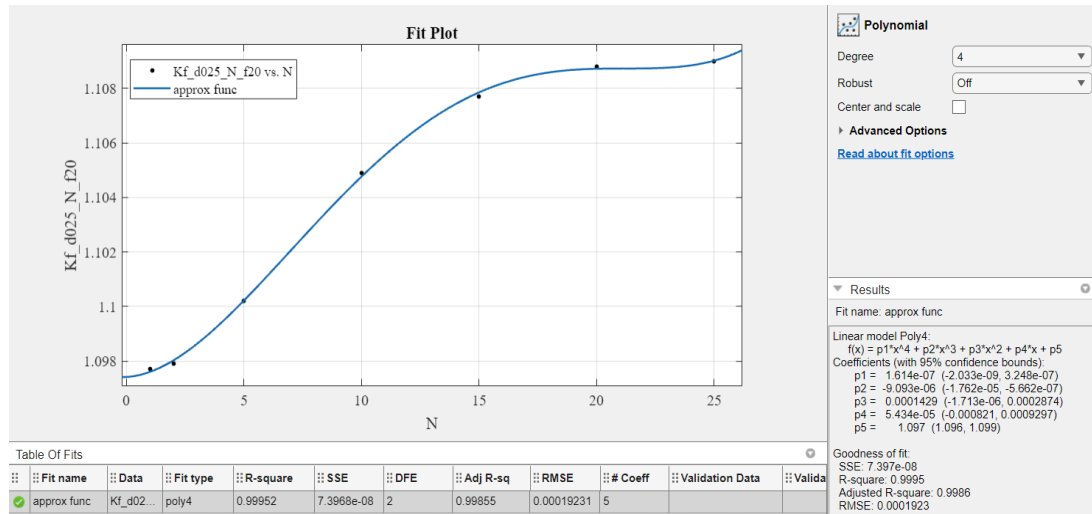


Рисунок 4.10 – Приклад апроксимації експериментально отриманої кривої, що описує вплив міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  на загальну величину втрат  $K_f$  для багатовиткової обмотки з  $D_{coil1} = 3$  мм з провідника діаметром  $d_1 = 0.25$  мм на частоті  $f = 20$  кГц (розроблено автором)

У данному випадку необхідно ретельніше підійти до підбору апроксимуючої функції для величини  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  – експериментальна крива має нелінійний характер. Найбільш точно наведена крива апроксимується також поліноміальною функцією, однак уже четвертого порядку. На рис. 4.10 зазначено вигляд апроксимувальної функції  $f(x)$  та розраховано відповідні апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$ , що відповідають вказаним геометричним параметрам даної обмотки. Таким чином, у випадку багатовиткової одношарової обмотки, величина  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  буде описуватися поліномом:  $K_{prox\_multiturn\_N}(N) = p_1 \cdot N^4 + p_2 \cdot N^3 + p_3 \cdot N^2 + p_4 \cdot N + p_5$ . Виконаємо аналогічним чином апроксимацію та розрахунок апроксимуючих коефіцієнтів для інших геометричних параметрів одновиткової обмотки – діаметрів провідників  $d$ , діаметрів витків  $D_{coil}$  та частот  $f$ . Результати для обмотки діаметром  $D_{coil1} = 3$  мм представлено в табл. 4.2, для обмотки діаметром  $D_{coil4} = 9$  мм представлено в табл. 4.3, для обмотки діаметром  $D_{coil7} = 15$  мм представлено в табл. 4.4.

Таблиця 4.2 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  величини  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметра провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil} = 3 \text{ мм}$ , на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$1.614 \cdot 10^{-7}$	$-9.093 \cdot 10^{-6}$	$0.142 \cdot 10^{-6}$	$5.43 \cdot 10^{-5}$	1.097
	$f = 60 \text{ кГц}$	$1.032 \cdot 10^{-6}$	$-5.17 \cdot 10^{-5}$	$0.624 \cdot 10^{-3}$	$3.067 \cdot 10^{-3}$	1.094
	$f = 100 \text{ кГц}$	$1.225 \cdot 10^{-6}$	$-5.099 \cdot 10^{-5}$	$0.177 \cdot 10^{-3}$	$13.02 \cdot 10^{-3}$	1.083
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$2.505 \cdot 10^{-7}$	$-2.098 \cdot 10^{-6}$	$-0.43 \cdot 10^{-3}$	$10.9 \cdot 10^{-3}$	1.166
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-2.962 \cdot 10^{-6}$	$0.217 \cdot 10^{-3}$	$-5.9 \cdot 10^{-3}$	0.071	1.124
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-6.583 \cdot 10^{-6}$	$0.449 \cdot 10^{-3}$	-0.011	0.1308	1.108
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-2.443 \cdot 10^{-6}$	$0.173 \cdot 10^{-3}$	-0.0045	0.0514	1.216
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.245 \cdot 10^{-5}$	$0.813 \cdot 10^{-3}$	-0.019	0.2087	1.191
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-2.095 \cdot 10^{-5}$	0.0013	-0.031	0.33	1.258
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-7.291 \cdot 10^{-6}$	$0.479 \cdot 10^{-3}$	$-11.41 \cdot 10^{-3}$	0.1201	1.273
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-2.539 \cdot 10^{-5}$	$1.616 \cdot 10^{-3}$	-0.037	0.377	1.379
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-3.582 \cdot 10^{-5}$	$2.26 \cdot 10^{-3}$	-0.051	0.5226	1.619

Розроблено автором

Таблиця 4.3 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  величини  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметра провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil} = 9 \text{ мм}$ , на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$1.117 \cdot 10^{-7}$	$-9.756 \cdot 10^{-6}$	$0.257 \cdot 10^{-3}$	$-0.55 \cdot 10^{-3}$	1.045
	$f = 60 \text{ кГц}$	$1.867 \cdot 10^{-6}$	$-0.109 \cdot 10^{-3}$	$1.896 \cdot 10^{-3}$	$-2.26 \cdot 10^{-3}$	1.045
	$f = 100 \text{ кГц}$	$3.021 \cdot 10^{-6}$	$-0.161 \cdot 10^{-3}$	$2.306 \cdot 10^{-3}$	$5.165 \cdot 10^{-3}$	1.036
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$2.206 \cdot 10^{-6}$	$-0.113 \cdot 10^{-3}$	$1.457 \cdot 10^{-3}$	$4.814 \cdot 10^{-3}$	1.065
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-3.099 \cdot 10^{-7}$	$7.658 \cdot 10^{-5}$	$-3.7 \cdot 10^{-3}$	0.0651	1.013
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-3.62 \cdot 10^{-6}$	$0.289 \cdot 10^{-3}$	$-8.6 \cdot 10^{-3}$	0.1153	0.994
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-3.608 \cdot 10^{-7}$	$6.87 \cdot 10^{-5}$	$-3.092 \cdot 10^{-3}$	0.049	1.053
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-9.205 \cdot 10^{-6}$	$0.63 \cdot 10^{-3}$	-0.0152	0.1723	1.016
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-1.628 \cdot 10^{-5}$	$-1.068 \cdot 10^{-3}$	-0.0254	0.264	1.064
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-5.253 \cdot 10^{-6}$	$0.3788 \cdot 10^{-3}$	$-9.796 \cdot 10^{-3}$	0.1063	1.051
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.899 \cdot 10^{-5}$	$1.236 \cdot 10^{-3}$	-0.0281	0.2847	1.114
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-2.755 \cdot 10^{-5}$	$1.776 \cdot 10^{-3}$	-0.0408	0.4029	1.287

Розроблено автором



Таблиця 4.4 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  величини  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  діаметра провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil7} = 15$  мм, на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25$ мм	$f = 20$ кГц	$2.7 \cdot 10^{-7}$	$-1.63 \cdot 10^{-5}$	$0.35 \cdot 10^{-3}$	$-1.02 \cdot 10^{-3}$	1.034
	$f = 60$ кГц	$3.335 \cdot 10^{-6}$	$-0.1721 \cdot 10^{-3}$	$2.76 \cdot 10^{-3}$	$-6.26 \cdot 10^{-3}$	1.038
	$f = 100$ кГц	$4.602 \cdot 10^{-6}$	$-0.232 \cdot 10^{-3}$	$3.33 \cdot 10^{-3}$	$0.529 \cdot 10^{-3}$	1.029
$d_2 = 0.5$ мм	$f = 20$ кГц	$2.319 \cdot 10^{-6}$	$-0.119 \cdot 10^{-3}$	$1.591 \cdot 10^{-3}$	$3.68 \cdot 10^{-3}$	1.044
	$f = 60$ кГц	$-6.115 \cdot 10^{-8}$	$6.449 \cdot 10^{-5}$	$-3.55 \cdot 10^{-3}$	0.062	0.993
	$f = 100$ кГц	$-3.446 \cdot 10^{-6}$	$0.2829 \cdot 10^{-3}$	$-8.55 \cdot 10^{-3}$	0.1088	0.975
$d_3 = 0.75$ мм	$f = 20$ кГц	$-3.678 \cdot 10^{-7}$	$6.645 \cdot 10^{-5}$	$-2.919 \cdot 10^{-3}$	0.045	1.024
	$f = 60$ кГц	$-9.058 \cdot 10^{-6}$	$0.6144 \cdot 10^{-3}$	-0.015	0.1505	0.994
	$f = 100$ кГц	$-1.577 \cdot 10^{-5}$	$-1.028 \cdot 10^{-3}$	-0.023	0.228	1.046
$d_4 = 1$ мм	$f = 20$ кГц	$-5.026 \cdot 10^{-6}$	$0.3582 \cdot 10^{-3}$	$-8.997 \cdot 10^{-3}$	0.0905	1.018
	$f = 60$ кГц	$-1.709 \cdot 10^{-5}$	$1.109 \cdot 10^{-3}$	-0.025	0.2278	1.102
	$f = 100$ кГц	$-2.599 \cdot 10^{-5}$	$1.664 \cdot 10^{-3}$	-0.0373	0.3379	1.256

Розроблено автором

Вище для прикладу наведено апроксимуючі коефіцієнти для випадку трьох діаметрів обмоток (каркасів). Аналогічним чином розраховано апроксимуючі коефіцієнти для інших діаметрів обмоток, які представлені у Додатку 3.

Спробуємо внести у розрахунковий вираз методики [22] знехтувані раніше параметри кількості витків обмотки  $N$  та діаметра обмотки  $D_{coil}$ , безпосередньо, з розрахунком оптимальних поправочних коефіцієнтів для отримання мінімально можливого відхилення експериментальних кривих та кривих, отриманих для модифікованого виразу вказаної методики для залежностей  $K_f = f(d/D_{coil})$  та  $K_f = f(N)$ .

Для вибору можливого способу внесення доповнюючих виразів до аналітичного виразу методики [22] проведемо аналогію з відомими виразами для розрахунку величини індуктивності одношарових обмоток, оскільки, теоретично, і на величину опору втрат обмотки, і на її індуктивність впливає розподіл струму у провіднику, який, у свою чергу, визначається конфігурацією

силових ліній магнітного поля обмотки. Тому врахування певних геометричних параметрів обмотки і для розрахунку величини втрат, і для індуктивності обмотки може бути схожим. Аналізуючи вирази для розрахунку індуктивності одношарових обмоток, описаних, зокрема, у [17, с.271] та в [14, с.156–159] бачимо, що такі геометричні параметри обмотки як кількість витків  $N$  та відношення діаметра провідника до діаметра обмотки  $d/D_{coil}$  входять у вказані вираз як множники. Відповідно, робимо припущення, що і у випадку розрахунку величини втрат обмотки найбільш коректно вносити доповнення до аналітичного виразу методики шляхом домножування початкового виразу на відповідні множники, що описують окремо самоэффект близькості  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  та міжвитковий ефект близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  з подальшим експериментальним підбором найбільш оптимальних поправочних коефіцієнтів. Таким чином, доповнений (модифікований) вираз матиме наступний вигляд:

$$K_{f\_Ferrera\_mod} \left( \frac{d}{D_{coil}}, N \right) = K_{f\_Ferrera} \cdot K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right) \cdot K_{prox\_multiturn\_N}(N) \quad (4.4)$$

де  $K_{f\_Ferrera\_mod}$  – величина втрат одношарової обмотки, розрахована за доповненим (модифікованим) виразом методики [22];

$d$  – діаметр провідника (без ізоляції), мм;

$D_{coil}$  – діаметр обмотки, мм;

$N$  – кількість витків одношарової обмотки;

$K_{f\_Ferrera}$  – величина втрат одношарової обмотки, розрахована за початковим виразом методики [22];

$K_{prox\_circle}$  – величина, що описує вплив самоэффекту близькості на величину втрат обмотки;

$K_{prox\_multiturn\_N}$  – величина, що описує вплив міжвиткового ефекту близькості на величину втрат обмотки.

Перейдемо до опису уточнюючого множника, що описує вплив

міжвиткового ефекту близькості  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$ . Виходячи із рис. 4.6 – рис. 4.8 бачимо, що форма кривої залежності  $K_f = f(N)$  теоретично може описуватися експоненційною функцією. Тому припустимо, що в даному випадку доповнюючий множник  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  матиме наступний вигляд:

$$K_{prox\_multiturn\_N}(N) = \frac{(1 - e^{-N/2})}{a''} \quad (4.5)$$

де  $K_{prox\_multiturn\_N}$  – величина, що описує вплив міжвиткового ефекту близькості на величину втрат обмотки;

$N$  – кількість витків одношарової обмотки;

$a''$  – поправочний коефіцієнт.

Визначимо вид уточнюючого множника, що описує вплив самоефекту близькості  $K_{prox\_circle}\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$ . Виходячи із рис. 4.5 (для одновиткової обмотки) бачимо, що форма кривої залежності  $K_f = f(d/D_{coil})$  теоретично може описуватися лінійною функцією. Тому припустимо, що в даному випадку доповнюючий множник  $K_{prox\_circle}\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  матиме наступний вигляд:

$$K_{prox\_circle}\left(\frac{d}{D_{coil}}\right) = \frac{d}{D_{coil}} \cdot b + c \quad (4.6)$$

де  $K_{prox\_circle}$  – величина, що описує вплив самоефекту близькості на величину втрат обмотки;

$d$  – діаметр провідника (без ізоляції), мм;

$D_{coil}$  – діаметр обмотки, мм;

$b, c$  – поправочні коефіцієнти.

Для випадку багатовиткової обмотки доповнюючий множник  $K_{prox\_circle}\left(\frac{d}{D_{coil}}\right)$  матиме наступний вигляд:

$$K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right) = \frac{d \cdot N}{D_{coil}} \cdot b + c \quad (4.7)$$

де  $K_{prox\_circle}$  – величина, що описує вплив самоєфекту близькості на величину втрат обмотки;

$d$  – діаметр провідника (без ізоляції), мм;

$D_{coil}$  – діаметр обмотки, мм;

$N$  – кількість витків одношарової обмотки;

$b, c$  – поправочні коефіцієнти.

У ході досліджень було визначено значення найбільш оптимальних значень поправочних коефіцієнтів  $a''$ ,  $b$ ,  $c$ , за яких отримано мінімальну розбіжність між експериментальними даними (кривими) та даними за уточненим (модифікованим) виразом методики [22]. Для визначених у дисертації геометричних параметрів одношарових обмоток значення поправочних коефіцієнтів будуть наступні:  $a''=1.3$ ;  $b=0.5$ ;  $c=0.4$ .

Таким чином, вираз (4.4) із урахуванням розрахованих коефіцієнтів та розрахунковим виразом зазначеної методики у випадку одношарової обмотки матиме наступний кінцевий вигляд:

$$K_{f\_Ferrera\_mod} = \left( \frac{\xi}{2} \cdot \frac{\sinh(\xi) + \sin(\xi)}{\cosh(\xi) - \cos(\xi)} + \frac{\xi}{2} \cdot \left( \frac{d}{D_{wire}} \right)^2 \cdot \frac{\sinh(\xi) - \sin(\xi)}{\cosh(\xi) + \cos(\xi)} \right) \times \dots$$

$$\dots \times \left( \frac{d \cdot N}{D_{coil}} \cdot 0.5 + 0.4 \right) \cdot \left( \frac{(1 - e^{-N/2})}{1.3} \right) \quad (4.8)$$

де  $K_{f\_Ferrera\_mod}$  – величина втрат одношарової обмотки, розрахована за доповненим виразом методики [22];

$\xi$  – допоміжний коефіцієнт (1.24);

$d$  – діаметр провідників без ізоляції, мм;

$D_{wire}$  – діаметр провідників в ізоляції, мм;

$N$  – кількість витків обмотки.

### 4.2.3 Порівняння експериментальних результатів та теоретичних результатів розрахунку за уточненим та початковим виразом

Для оцінки точності розрахунків за уточненим виразом (4.4) побудуємо порівняльні графіки для експериментальних даних  $K_{f\_exp}$ , розрахунків за початковою методикою  $K_{f\_Ferrera\_theor}$ , розрахунків за уточненим виразом  $K_{f\_Ferrera\_mod}$ . Порівняння виконаємо для залежностей  $K_f = f(d/D_{coil})$  та  $K_f = f(N)$ . На рис. 4.11 а, б, в, г представлено результати порівняння для  $K_f = f(N)$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4} = 9$  мм для провідника діаметром  $d_4 = 1$  мм (за даного діаметра провідника - максимальна розбіжність між результатами експериментальних вимірювань та теоретичних розрахунків за [22]).

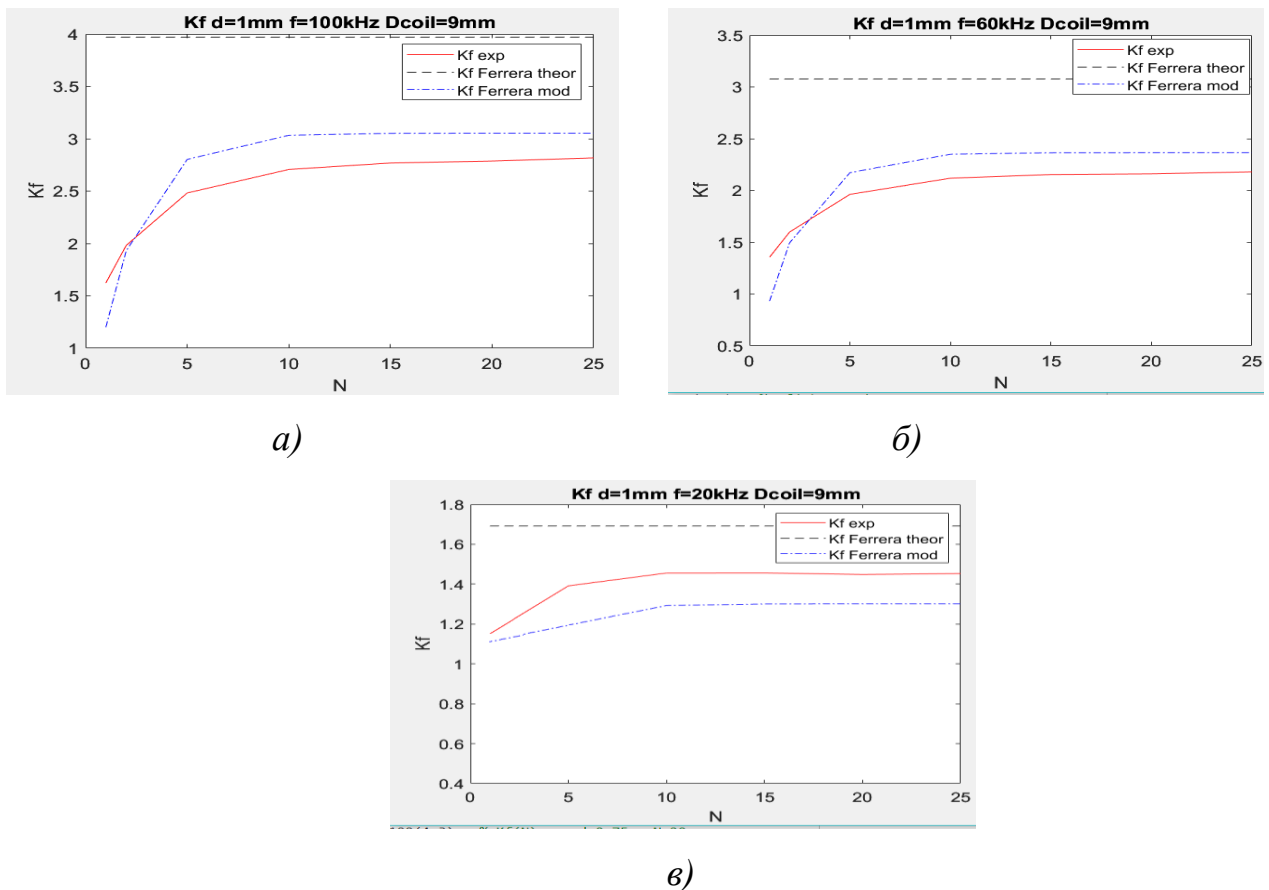
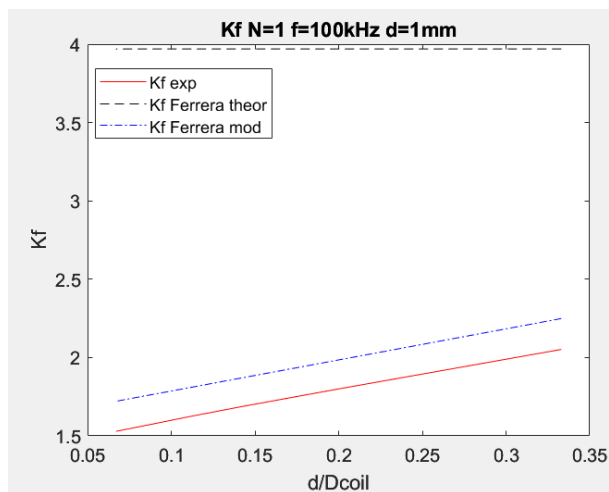


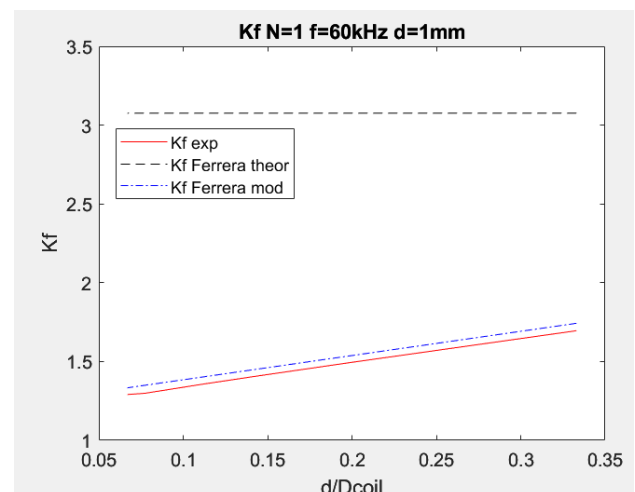
Рисунок 4.11 Порівняння експериментальних результатів  $K_{f\_exp}$  з результатами розрахунків за початковою методикою [22]  $K_{f\_Ferrera\_theor}$  та результатами розрахунків за уточненою методикою  $K_{f\_Ferrera\_mod}$  у випадку залежності  $K_f = f(N)$  для провідників діаметром  $d_4 = 1$  мм на частотах: а)  $f = 100$  кГц; б)  $f = 60$  кГц; в)  $f = 20$  кГц (розроблено автором)

Як бачимо, характер кривої  $K_{f\_Ferrera\_theor}$ , що ілюструє результати теоретичних розрахунків за початковим виразом методики [22], жодним чином не змінюється при збільшенні кількості витків обмотки, що очевидно, оскільки у методиці було знехтувано впливом даного геометричного параметра на величину втрат  $K_f$ . Більше того, результати теоретичних розрахунків будуть завищені, відносно даних експериментальних вимірювань. Максимальне відхилення результатів експериментальних та теоретичних розрахунків для вказаних параметрів обмотки складатимуть від 32% до 59.5% (залежно від частоти). Після проведеного уточнення розрахункового виразу аналітичної методики [22], бачимо, що характер кривої  $K_{f\_Ferrera\_mod}$  змінився та в цілому повторює тенденцію експериментальної кривої  $K_{f\_exp}$ . Окрім того, відхилення вказаних кривих скоротилося до 11% ... 15% (залежно від частоти), що є вагомим підвищенням точності розрахунків за уточненим виразом.

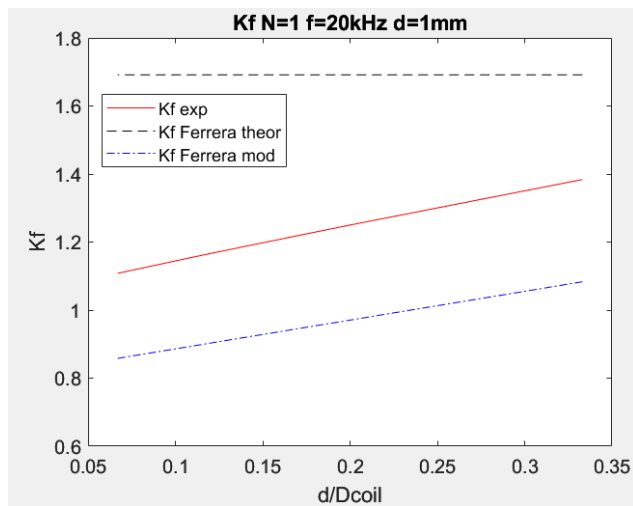
На рис. 4.12 а, б, в, г представлено результати порівняння для залежності  $K_f = f(d/D_{coil})$  у випадку одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4} = 9$  мм виконаної провідником діаметром  $d_4 = 1$  мм.



а)



б)



в)

Рисунок 4.12 Порівняння експериментальних результатів  $K_{f\_exp}$  з результатами розрахунків за початковою методикою [22]  $K_{f\_Ferrera\_theor}$  та з результатами розрахунків за уточненим виразом  $K_{f\_Ferrera\_mod}$  для залежності  $K_f = f(d/D_{coil})$  для провідників діаметром  $d_4 = 1$  мм на частотах:

а)  $f = 100$  кГц; б)  $f = 60$  кГц; в)  $f = 20$  кГц

(розроблено автором)

Бачимо, що у випадку залежності  $K_f = f(d/D_{coil})$  крива, що ілюструє результати теоретичних розрахунків за початковим виразом методики [22], жодним чином не змінюється при зміні співвідношення  $d/D_{coil}$ , що очевидно, оскільки у методиці було знехтувано впливом діаметра обмотки  $D_{coil}$  на величину втрат  $K_f$ . Як і в попередньому випадку, результати теоретичних розрахунків будуть завищені, відносно даних експериментальних вимірювань. Максимальне відхилення результатів експериментальних та теоретичних розрахунків для вказаних параметрів обмотки складатимуть від 35% до 63% (залежно від частоти). Після розрахунку за уточненим виразом аналітичної методики, бачимо, що характер кривої  $K_{f\_Ferrera\_mod}$  змінився та в цілому повторює тенденцію експериментальної кривої  $K_{f\_exp}$ . Окрім того, відхилення вказаних кривих скоротилося до 4% ... 19% (залежно від частоти), що також є вагомим підвищенням точності розрахунків за уточненим виразом.

## Висновки до розділу 4

У ході виконання досліджень у рамках даного розділу отримано наступні результати:

1) На основі проведених експериментальних вимірювань одношарової обмотки з різними геометричними параметрами, запропоновано ряд уточнень розрахункового виразу методики *Ferreira*, які дозволили врахувати вплив тих геометричних параметрів, якими було знехтувано у початковому виразі;

2) Виконано апроксимацію кривих відповідних залежностей з подальшим розрахунком поправочних коефіцієнтів для найбільш поширених на практиці випадків (робочих частот, діаметрів провідників, кількості витків, діаметрів обмоток);

3) Здійснено спробу безпосереднього введення у вираз знехтованих параметрів для кількості витків та діаметра витка у вигляді уточнюючих множників, розраховано поправочні коефіцієнти. В результаті збільшено точність отриманих результатів за уточненим виразом (зменшено розбіжність між експериментальними та теоретичними результатами з 59.5% (максимальне значення) до 11% (для  $K_f = f(N)$ ) та з 63% (максимальне значення) до 4% (для  $K_f = f(d/D_{coil})$ ), що є суттєвим показником підвищення точності.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

При виконанні досліджень отримано нові наукові та практичні результати, а саме:

1) У ході критичного аналізу існуючих аналітичних методик розрахунку величини втрат в обмотках індуктивних елементів (*Dowell, Ferreira*) визначено, що розглянуті методики потребують додаткового дослідження впливу знехтуваних у них геометричних параметрів на розподіл струму у провідниках обмотки (величину їх втрат), з метою подальшого удосконалення розрахункових виразів;

2) У процесі дослідження ступеня впливу геометричних параметрів одношарових обмоток індуктивних елементів на розподіл струму у витках (та величину втрат) визначено наступне:

- похибка в розрахунках за аналітичними методиками (відносно результатів експериментальних досліджень) суттєва та лежить в межах від 20.6% до 39.6% (як наслідок нехтування впливом діаметра витка) та від 17.8% до 65.99% (як наслідок нехтування нерівномірністю розподілу струму у витках при багатовитковій намотці);

- за даних умов дослідження, форма поперечного перерізу провідника (кругла та квадратна) незначним чином (до 4%) впливає на розподіл струму, тому нею можна знехтувати;

- аналітичну методику розрахунку *Ferreira* можливо використовувати для розрахунку величини втрат  $K_f$  одношарових обмоток індуктивних елементів за умови, що обмотка без осердя, кількість витків становить  $N \geq 30$ , а кінцевий результат розрахунку скориговано на величину відносного відхилення теоретичних та експериментальних даних до 20.5% залежно від діаметра провідника та частоти для обмотки діаметром  $D_{coil} = 10 \text{ мм}$  (ETD-29);

- розрахунок величини втрат одношарових обмоток індуктивних елементів з феромагнітним осердям за аналітичною методикою *Ferreira* проводити не можна, оскільки розходження теоретичних обчислень за даною методикою та експериментальними даними сягає приблизно 1000% (11 разів),

оскільки вплив осердя на величину втрат обмотки у даній методиці не враховано;

- можливою причиною вказаного розходження є вплив зміни конфігурації силових ліній магнітного поля всередині обмотки на розподіл струму у її провідниках при введенні феромагнітного осердя. Втрати в осерді, у даному випадку, майже не впливають на загальну величину втрат обмотки (зміна величини втрат в осерді у 50 разів спричиняє приріст величини втрат обмотки  $K_f$  лише на 3%), тому ними можна знехтувати;

3) У ході аналізу можливих шляхів уточнення наявних розрахункових виразів визначено, що найбільш коректним буде домножування початкового виразу аналітичної методики *Ferreira* на уточнюючі множники, що містять знехтувані геометричні параметри обмотки;

4) На основі даних, отриманих у ході попередніх досліджень, а також результатів експериментального дослідження обмоток без осердя з різними геометричними параметрами:

- запропоновано ряд уточнень розрахункового виразу методики *Ferreira*, які дозволили врахувати вплив знехтуваних у початковому виразі геометричних параметрів. В результаті модифікації розрахункових виразів зменшено розбіжність між експериментальними та теоретичними результатами з 59.5% до 11% (для  $K_f = f(N)$ ) та з 63% до 4% (для  $K_f = f(d/D_{coil})$ );

- виконано апроксимацію кривих залежностей величини втрат обмотки від вказаних геометричних параметрів з подальшим розрахунком апроксимуючих коефіцієнтів для найбільш поширених на практиці випадків (робочих частот, діаметрів провідників, кількості витків, діаметрів обмоток), що дозволяє провести розрахунок для конкретних геометричних параметрів обмоток та робочих частот.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] C. Alexander, M. Sadiku. «Fundamentals of electric circuits». 3-d edition. *McGraw-Hill*, 2007, p. 211;
- [2] Marian K. Kazimierczuk. «High-frequency magnetic components». 2-d edition. *John Wiley & Sons, Ltd*, 2014, p. 729;
- [3] Gary Bocock. «Essential guide to power supplies». 1-d edition. *XP Power*, 2014, p. 163;
- [4] C. W. T. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, 3rd Ed., *New York: Marcel Dekker*, 2004;
- [5] Kyle Jensen. «Liz wire: Practical design consideration for today`s high frequency application». *Power Magnetics & High Frequency Workshop*, May 12, 2020, p. 30;
- [6] Сифоров В.И. «Радиоприемные устройства: Учебное пособие». - 5-е вид., перероб. - М.: *Военное издательство Министерства обороны Союза ССР*, 1954. - с. 162;
- [7] A. I. Pressman, K. Billings, T. Morey, *Switching Power Supplies*, 3rd Ed., New York: The McGraw-Hill Companies, 2009;
- [8] Hojong Choi. «Pre-Matching circuit for high-frequency ultrasonic transducers». *MDPI. Sensors*. vol.22, no.22, 2022, pp.1 – 15, doi: 10.3390/s22228861;
- [9] A.P. Seredin, A.V. Movchaniuk, «Influence of Single Layer Winding Geometry of Inductive Element on Loss Resistance», *Radioelectronics an Communication Systems*, 2022, Vol. 65. No. 10 p.p. 551–561. doi: 10.3103/S073527272301003X;
- [10] Kotic S. Ultrasonic measurement and technologies/ S. Kotic, Z. Figura. — London: *Chapmann and Hall*, 1996, p. 356;
- [11] Котенёв С. В. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов и дросселей/Котенёв С. В., Евсеев А. Н. — М.: *Горячая линия - Телеком*, 2013. 360 с;
- [12] W.G. Hurley, W.H. Wolfle. «Transformers and inductors for power electronics. Theory, design and applications». *John Wiley & Sons, Ltd*, 2013, p. 831;

- [13] W. Jackson. «Dielectric loss in single layer coils at radio frequencies». *Expl Wireless*, 5, 1928, p. 255 – 258;
- [14] Сифоров В.И. «Радиоприемные устройства: Учебное пособие». - 5-е вид., перероб. - М.: *Военное издательство Министерства обороны Союза ССР*, 1954. – 162 с;
- [15] Narinder Kumar. «Comprehensive Physics for Class XII». *New Delhi: Laxmi Publications*, 2003, p. 282;
- [16] А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Аналіз впливу радіуса витка індуктивного елемента на розподіл струму у провіднику. Кільцевий ефект», *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2022» (РТПСАС-2022)*, м. Київ, 22-24 листопада 2022 р., с.119-121;
- [17] Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей/Л.А. Возненко, П.Л. Калантаров; – Л.: *Энергоатомиздат*, 1986. 488 с;
- [18] Dowell P.L., Effects of eddy currents in transformer winding, *Proc. IEE.*, vol. 113, no.8, pp.1387-1394, August 1966;
- [19] Фок В.А. Скин-эффект в кольце круглого сечения. *Журнал русского физико-химического общества. Часть физическая*. 1930. Том LXII. № .3. с. 281-297.
- [20] А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, Я.Ф. Карашук, «Аналіз методик розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та кругового витка зі струмом», *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2021» (РТПСАС-2021)*, м. Київ, 9-11 листопада 2021 р.;
- [21] G. Haobijam, R.P. Palanthinkal, Design and analysis of spiral inductors, *New Delhi: Springer India*, 2014, p. 116;
- [22] J. Ferreira, «Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components», *IEEE Transactions on power electronics*, vol.9, no.1, 1994, pp.127-134;

- [23] F. Tourkhani and P. Viarouge, "Accurate analytical model of winding losses in round Litz wire windings," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 1, pp. 538-543, Jan 2001, doi: 10.1109/20.914375;
- [24] Xi Nan; C. Sullivan. «An improved calculation of proximity-effect loss in high-frequency windings of round conductors», *IEEE Power Electronic Specialists Conference*, June 2003, pp.853-860;
- [25] Ammanambakkam Nagarajan, Dhivya. M.S.Egr, Department of Electrical Engineering, Wright State University, 2010. *Design of HF Forward Transformer Including Harmonic Eddy Current Losses*, p.91.
- [26] Carstensen, Christian. M.S.Egr, Fakultat für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2007. *Eddy Currents in Windings of Switched Reluctance Machines*, p.179.
- [27] W. Frelin, L. Berthet, M. Petit and J. C. Vannier, "Transformer winding losses evaluation when supplying non linear load," *44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Glasgow, UK, 2009, pp. 1-5.
- [28] А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Аналіз методик та модифікація існуючих виразів для розрахунку опору втрат дроселів на ультразвукових частотах», *Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2020» (РТПСАС-2020)*, м. Київ, 16-22 листопада 2020 р., с. 52–54;
- [29] H. Johnson, M. Graham, «To understand skin effect, you must first understand how eddy currents operate...». *High-Speed Signal propagation Advanced Black Magic (3rd ed.)*. Prentice Hall, 2003, p. 766;
- [30] A. Ducluzaux, «Extra losses caused in high current conductors by skin and proximity effects», *Cahier technique no. 83, Schneider Electric*, 1983, p.20;
- [31] H. Y. Chung and M. H. Pong, "Effect of switching frequency and number of winding layers on copper loss of an inductor," *Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE*

- Cat. No.00EX435*), Beijing, China, 2000, pp. 1312-1317 vol.3, doi: 10.1109/IPEMC.2000.883037.
- [32] A. Van den Bossche, V. C. Valchev and S. T. Barudov, "Practical Wide Frequency Approach for Calculating Eddy Current Losses in Transformer Windings," *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Montreal, QC, Canada, 2006, pp. 1070-1074, doi: 10.1109/ISIE.2006.295785.
- [33] Xi Nan and C. R. Sullivan, "Simplified high-accuracy calculation of eddy-current loss in round-wire windings," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, Aachen, Germany, 2004, pp. 873-879 Vol.2, doi: 10.1109/PESC.2004.1355533.
- [34] ETD - сердечники Ш-образные с круглым сечением центрального стержня. *CoreTech*. URL: <https://coretech.com.ua/coretypes/-etd>;
- [35] Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. «Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справочник радиолюбителя» – 3-є вид., перероб. і доп. Київ: Наукова думка, 1987, 800 с.;
- [36] А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Вплив кількості витків одношарової обмотки індуктивного елемента на опір втрат», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4, с. 25–32, 2023. doi: 10.31649/1997-9266-2020-169-4-25-32 (фахове видання категорії Б);
- [37] Synthesized In-Circuit LCR/ESR Meter Models 885 & 886. Data Sheet. *EU Mouser*. URL: [https://eu.mouser.com/datasheet/2/43/885\\_886\\_datasheet-1076312.pdf](https://eu.mouser.com/datasheet/2/43/885_886_datasheet-1076312.pdf).
- [38] Curve Fitting Toolbox. For use with MatLAB. User`s guide. Version 1. *The MathWorks*. URL: [http://cda.psych.uiuc.edu/matlab\\_pdf/curvefit.pdf](http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/curvefit.pdf).

## **ДОДАТОК А**

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА  
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

**Статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:**

A.P. Seredin, A.V. Movchaniuk, «Influence of Single Layer Winding Geometry of Inductive Element on Loss Resistance», *Radioelectronics and Communication Systems*, 2022, Vol. 65. No. 10 p.p. 551–561. doi: 10.3103/S073527272301003X (**фахове видання категорії А, Scopus, Q3**).

### **Статті у наукових фахових виданнях України:**

А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Вплив кількості витків одношарової обмотки індуктивного елемента на опір втрат», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4, с. 25–32, 2023. doi: 10.31649/1997-9266-2020-169-4-25-32 (**фахове видання категорії Б**).

### 2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Аналіз методик та модифікація існуючих виразів для розрахунку опору втрат дроселів на ультразвукових частотах», *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2020» (РТПСАС-2020)*, м. Київ, 16-22 листопада 2020 р., с. 52–54 (**матеріали конференції**).

2. А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, Я.Ф. Каращук, «Аналіз методик розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та кругового витка зі струмом», *X Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2021» (РТПСАС-2021)*, м. Київ, 9-11 листопада 2021 р., с. 108–110 (**матеріали конференції**);



3. А.П. Середін, А.В. Мовчанюк, «Аналіз впливу радіуса витка індуктивного елемента на розподіл струму у провіднику. Кільцевий ефект», *XI Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2022» (РТПСАС-2022)*, м. Київ, 22-24 листопада 2022 р., с.119-121 (матеріали конференції).

Таблиця А.1 – Апробація результатів дослідження

№ з/п	Тип конференції	Назва конференції	Місце і дата проведення	Тип участі
1.	Міжнародна науково-технічна конференція	Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2020 (РТПСАС-2020)	м. Київ 16–22 листопада 2020 р.	Очна
2.	Міжнародна науково-технічна конференція	Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2021 (РТПСАС-2021)	м. Київ 9–11 листопада 2021 р.	Очна
3.	Міжнародна науково-технічна конференція	Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2022 (РТПСАС-2022)	м. Київ 22–24 листопада 2022 р.	Очна

*Розроблено автором*

## **ДОДАТОК Б**

**ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАШИННОЇ МОДЕЛІ ОБМОТКИ У  
СЕРЕДОВИЩІ КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ.  
РОЗРАХУНКОВІ ВИРАЗИ, РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

Оскільки у *Розділі 2* дисертації натурні експерименти замінені відповідними машинними у середовищі кінцево-елементного аналізу, необхідно бути впевненими в адекватності та коректності результатів машинного моделювання. Для цього виконано перевірку, суть якої, полягала у порівнянні величини втрат  $K_f$  прямого одиночного циліндричного провідника, розрахованої за відомими теоретичними виразами ( $K_{f\_method}$ ) з величиною втрат, розрахованої для машинної моделі аналогічного провідника у середовищі кінцево-елементного аналізу ( $K_{f\_model}$ ).

Метою даного додатку стане більш детальне представлення теоретичного розрахунку величини втрат  $K_{f\_method}$  для прямого циліндричного одиночного провідника за відомими теоретичними виразами, а також отриманих у процесі теоретичного розрахунку та машинного моделювання даних, використаних для побудови графічних залежностей у п. 2.2.2.

Як відомо із *Розділу 1* (вираз (1.22)), для розрахунку величини  $K_f$  (зокрема  $K_{f\_method}$  та  $K_{f\_model}$ ), необхідно визначити опір провідника постійному струму, опір того ж провідника змінному струму на заданій частоті, та розрахувати їх відношення:

$$K_f = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} \quad (\text{Б.1})$$

де  $K_f$  – безрозмірна величина, що характеризує величину втрат обмотки;

$R_{AC}$  – опір обмотки змінному струму (дійсна частина комплексного опору) на частоті  $f$ , Ом;

$R_{DC}$  – опір обмотки постійному струму, Ом.

Теоретичний розрахунок опору провідника постійному струму  $R_{DC}$  виконується за загальновідомим виразом (Б.2), описаним в ряді джерел, зокрема у [15], [2, с. 164-167] та у *Розділі 1* (1.7).

Продовження додатку Б

$$R_{DC} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\text{Б.2})$$

де  $R_{DC}$  – опір провідників постійному струму, Ом;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$l$  – довжина провідника, м;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника, м<sup>2</sup>.

Для розрахунку опору постійному струму циліндричного провідника  $R_{DC\_round}$ , врахуємо, що площа його поперечного перерізу  $S_{round}$  розраховується як (1.8):

$$S_{round} = \pi \cdot r_0^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (\text{Б.3})$$

де  $S_{round}$  – площа поперечного перерізу циліндричного провідника, м<sup>2</sup>;

$r_0$  – радіус циліндричного провідника, м;

$d$  – діаметр циліндричного провідника, м.

Таким чином, підставивши вираз (Б.3) в (Б.2), отримаємо вираз для розрахунку опору постійному струму циліндричного провідника  $R_{DC\_round}$  (1.9):

$$R_{DC\_round} = \rho \cdot \frac{l}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \rho \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d^2} = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot r_0^2} \quad (\text{Б.4})$$

де  $R_{DC\_round}$  – опір циліндричного провідника постійному струму, Ом;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$d$  – діаметр циліндричного провідника, м;

$l$  – довжина провідника, м;

$r_0$  – радіус циліндричного провідника, м.

Методика розрахунку опору прямого циліндричного одиночного провідника змінному струму  $R_{AC}$  на заданій частоті  $f$  теж є загальновідомою та описана, зокрема, у [2, с.184-185]. Згідно із нею, комплексний опір (імпеданс)

*Продовження додатку Б*

$Z_{round}$  даного провідника, з урахуванням впливу скін-ефекту, розраховується через параметри поля наступним чином (1.11), (1.12):

$$Z_{round} = R_{AC\_round} + jX_L = \rho \cdot l \cdot \frac{k}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \frac{J_0(k \cdot r_0)}{J_1(k \cdot r_0)} \quad (Б.5)$$

$$k = \sqrt{-j} \cdot \sqrt{\omega \cdot \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0} = \sqrt{-j} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}{\rho}} \quad (Б.6)$$

де  $Z_{round}$  – комплексний опір (імпеданс) прямого циліндричного одиночного провідника, Ом;

$R_{AC\_round}$  – активний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

$X_L$  – реактивний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$l$  – довжина провідника, м;

$k$  – комплексне хвильове число,  $m^{-1}$ ;

$r_0$  – радіус провідника (струмопровідної жили), м;

$J_0(z)$  – функція Бесселя нульового порядку;

$J_1(z)$  – функція Бесселя першого порядку;

$\omega$  – кругова частота, рад/с;

$\sigma$  – питома електрична провідність матеріалу провідника, См/м;

$\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу провідника;

$\mu_0$  – магнітна стала, Гн/м;

$f$  – циклічна частота, Гц.

Значення опору провідника змінному струму (або опору втрат)  $R_{AC\_round}$  визначається як дійсна частина комплексного опору (імпедансу)  $Z_{round}$  даного провідника, розрахованого за виразом (Б.5) (1.13):

$$R_{AC\_round} = \operatorname{Re}\{Z_{round}\} = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r_0} \cdot \operatorname{Re}\left\{k \cdot \frac{J_0(k \cdot r_0)}{J_1(k \cdot r_0)}\right\} = \frac{\rho \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \operatorname{Re}\left\{k \cdot \frac{J_0(k \cdot r_0)}{J_1(k \cdot r_0)}\right\} \quad (Б.7)$$

де  $R_{AC\_round}$  – активний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

### Продовження додатку Б

$Z_{round}$  – комплексний опір (імпеданс) прямого циліндричного одиночного провідника, Ом;

$l$  – довжина провідника, м;

$\sigma$  – питома електрична провідність матеріалу провідника, См/м;

$r_0$  – радіус провідника (струмопровідної жили), м;

$k$  – комплексне хвильове число,  $m^{-1}$  (1.12);

$J_0(z)$  – функція Бесселя нульового порядку;

$J_1(z)$  – функція Бесселя першого порядку;

$\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м.

Визначивши вирази, за якими здійснюватимуться теоретичні обчислення величини втрат  $K_{f\_method}$  циліндричних прямих одиночних провідників, задамо необхідні для розрахунків значення їх геометричних параметрів:

- довжина:  $l = 50$  мм;

- діаметри жили:  $d_1 = 0.3$  мм,  $d_2 = 0.6$  мм,  $d_3 = 1$  мм,  $d_4 = 1.5$  мм;

Розрахунки виконаємо на частотах:  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц.

Вкажемо значення допоміжних (довідкових) величин:

- питомий опір матеріалу провідника (міді):  $\rho_{\_midi} = 1.8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;

- питома електрична провідність матеріалу провідника (міді):  
 $\sigma_{\_midi} = 5.556 \cdot 10^7$  См/м;

- відносна магнітна проникність матеріалу провідника (міді):  $\mu_{cooper} = 1$ ;

- магнітна стала:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Виконаємо теоретичні розрахунки величини опору постійному струму  $R_{DC\_round}$ , опору змінному струму  $R_{AC\_round}$  для провідників із вказаними параметрами на трьох частотах та теоретично розрахуємо величину втрат провідників  $K_{f\_method}$  за виразом (Б.1). Результати розрахунків на кожній з вказаних частот зведемо у табл. Б.1 – Б.3.

## Продовження додатку Б

Таблиця Б.1 – Результати теоретичних розрахунків  $R_{DC\_round}$ ,  $R_{AC\_round}$ ,  $K_{f\_method}(f_1 = 20 \text{ кГц})$ 

$d$	$d_1=0.3 \text{ мм}$	$d_2=0.6 \text{ мм}$	$d_3=1 \text{ мм}$	$d_4=1.5 \text{ мм}$
$R_{DC\_rounds} [\text{МОм}]$	12.7314	3.1828	1.1458	0.5093
$R_{AC\_rounds} [\text{МОм}]$	12.7340	3.1931	1.1739	0.5679
$K_{f\_method}$	<b>1.0002</b>	<b>1.0032</b>	<b>1.0245</b>	<b>1.1152</b>

Розроблено автором

Таблиця Б.2 – Результати теоретичних розрахунків  $R_{DC\_round}$ ,  $R_{AC\_round}$ ,  $K_{f\_method}(f_2 = 60 \text{ кГц})$ 

$d$	$d_1=0.3 \text{ мм}$	$d_2=0.6 \text{ мм}$	$d_3=1 \text{ мм}$	$d_4=1.5 \text{ мм}$
$R_{DC\_rounds} [\text{МОм}]$	12.7314	3.1828	1.1458	0.5093
$R_{AC\_rounds} [\text{МОм}]$	12.7546	3.2737	1.3653	0.8255
$K_{f\_method}$	<b>1.0018</b>	<b>1.0286</b>	<b>1.1916</b>	<b>1.6210</b>

Розроблено автором

Таблиця Б.3 – Результати теоретичних розрахунків  $R_{DC\_round}$ ,  $R_{AC\_round}$ ,  $K_{f\_method}(f_3 = 100 \text{ кГц})$ 

$d$	$d_1=0.3 \text{ мм}$	$d_2=0.6 \text{ мм}$	$d_3=1 \text{ мм}$	$d_4=1.5 \text{ мм}$
$R_{DC\_rounds} [\text{МОм}]$	12.7314	3.1828	1.1458	0.5093
$R_{AC\_rounds} [\text{МОм}]$	12.7957	3.4255	1.6317	1.0343
$K_{f\_method}$	<b>1.0051</b>	<b>1.0763</b>	<b>1.4241</b>	<b>2.0312</b>

Розроблено автором

Наступним кроком стане виконання машинного експерименту для аналогічних провідників у середовищі кінцево-елементного аналізу, у ході якого розрахуємо значення величин  $R_{DC\_round}$ ,  $R_{AC\_round}$  (на трьох частотах),  $K_{f\_model}$  (за виразом (Б.1)) за тих самих умов, що й теоретичні. Результати машинних розрахунків на кожній з вказаних частот зведено у табл. Б.4 – Б.6.

## Продовження додатку Б

Таблиця Б.4 – Результати машинних розрахунків  $R_{DC\_round}$ ,  $R_{AC\_round}$ ,  $K_{f\_model}$  ( $f_1 = 20$  кГц)

$d$	$d_1=0.3$ мм	$d_2=0.6$ мм	$d_3=1$ мм	$d_4=1.5$ мм
$R_{DC\_rounds}$ [МОм]	12.7314	3.1828	1.1458	0.5093
$R_{AC\_rounds}$ [МОм]	12.9460	3.2457	1.1918	0.5745
$K_{f\_model}$	<b>1.0169</b>	<b>1.0197</b>	<b>1.0401</b>	<b>1.1282</b>

Розроблено автором

Таблиця Б.5 – Результати машинних розрахунків  $R_{DC\_round}$ ,  $R_{AC\_round}$ ,  $K_{f\_model}$  ( $f_2 = 60$  кГц)

$d$	$d_1=0.3$ мм	$d_2=0.6$ мм	$d_3=1$ мм	$d_4=1.5$ мм
$R_{DC\_rounds}$ [МОм]	12.7314	3.1828	1.1458	0.5093
$R_{AC\_rounds}$ [МОм]	12.9660	3.3233	1.3788	0.8346
$K_{f\_model}$	<b>1.0184</b>	<b>1.0441</b>	<b>1.2033</b>	<b>1.6390</b>

Розроблено автором

Таблиця Б.6 – Результати машинних розрахунків  $R_{DC\_round}$ ,  $R_{AC\_round}$ ,  $K_{f\_model}$  ( $f_3 = 100$  кГц)

$d$	$d_1=0.3$ мм	$d_2=0.6$ мм	$d_3=1$ мм	$d_4=1.5$ мм
$R_{DC\_rounds}$ [МОм]	12.7314	3.1828	1.1458	0.5093
$R_{AC\_rounds}$ [МОм]	13.0050	3.4704	1.6448	1.0478
$K_{f\_model}$	<b>1.0215</b>	<b>1.0903</b>	<b>1.4355</b>	<b>2.0575</b>

Розроблено автором

Отримані у ході теоретичних розрахунків та машинного експерименту величини втрат циліндричного прямого одиночного провідника  $K_{f\_method}$  та  $K_{f\_model}$  відповідно, у подальшому візуалізовано у вигляді кривих на графіках залежності  $K_f(d)$ , представлених на рис. 2.2 (а, б, в). Окрім аналізу кривих, представленого у розділі, було виконано візуальне порівняння двох зазначених кривих. Виходячи із побудованих графіків на якісному рівні визначено, що



### Продовження додатку Б

результати теоретичних розрахунків незначним чином розходяться із результатами машинного експерименту. Для визначення ступеня розбіжності результатів теоретичних та експериментальних розрахунків на кількісному рівні виконаємо розрахунок відносного відхилення  $\Delta K_f$  величини  $K_{f\_method}$  та величини  $K_{f\_model}$  для кожного діаметра провідника на трьох частотах за наступним виразом:

$$\Delta K_f = \frac{K_{f\_model} - K_{f\_method}}{K_{f\_model}} \cdot 100\% \quad (\text{Б.8})$$

де  $\Delta K_f$  – відносне відхилення даних експериментальних та теоретичних розрахунків;

$K_{f\_model}$  – величина втрат одиночного циліндричного прямого провідника, розрахована у середовищі кінцево-елементного аналізу;

$K_{f\_method}$  – величина втрат того ж провідника, розрахованого за відомим теоретичними виразами.

Результати розрахунку величини  $\Delta K_f$  зведено у табл. Б.7.

Таблиця Б.7 – Результати розрахунків відносного відхилення  $\Delta K_f$

$d$	$d_1=0.3 \text{ мм}$	$d_2=0.6 \text{ мм}$	$d_3=1 \text{ мм}$	$d_4=1.5 \text{ мм}$
$\Delta K_f, \% (f_1 = 20 \text{ кГц})$	1.63	1.61	1.49	1.14
$\Delta K_f, \% (f_2 = 60 \text{ кГц})$	1.63	1.49	0.97	1.10
$\Delta K_f, \% (f_3 = 100 \text{ кГц})$	1.60	1.29	0.79	1.28

Розроблено автором

Отже, відносне відхилення результатів теоретичних та машинних розрахунків величини втрат циліндричного прямого одиночного провідника незначне (від 0.97% до 1.63%), тому робимо висновок, що машинна модель адекватна, дає коректні результати розрахунків та з достатньою точністю описує вплив скін-ефекту на величину втрат провідника.

## **ДОДАТОК В**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ  
ГЕОМЕТРІЇ (ДІАМЕТРА) ОБМОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ  $K_f$**

У Розділі 2 дисертації (п. 2.2.3) представлено результати дослідження впливу діаметра обмотки  $D_{coil}$  на її величину втрат  $K_f$ .

*Мета додатку* – детальне представлення результатів дослідження (машинного експерименту), проведеного у середовищі кінцево-елементного аналізу, на основі якого побудовано графічні залежності та зроблено відповідні висновки. Результати представлено у табличному вигляді.

У ході даного дослідження проведено машинний експеримент (моделювання) прямого циліндричного провідника діаметром  $d$ , довжиною  $l_{direct}$  та згорнутого з нього одиночного круглого витка діаметром  $D_{coil}$ . Довжина прямого провідника  $l_{direct}$  розраховувалася як довжина витка (кільця) діаметром  $D_{coil} = 5, 10, 15, 20$  мм (впливом товщини ізоляції провідника знехтувано) за загальновідомим виразом:

$$l_{direct} = 2\pi \cdot R_{coil} = \pi \cdot D_{coil} \quad (B.1)$$

де  $l_{direct}$  – довжина прямого циліндричного провідника, м;

$R_{coil}$  – радіус витка, м;

$D_{coil}$  – діаметр витка, м.

Підставивши вказані вище величини діаметра витка  $D_{coil}$  у вираз (B.1), було отримано довжини еквівалентних прямих провідників  $l_{direct}$  рівних, відповідно,  $l_{direct1} = 15.7$  мм (при  $D_{coil1} = 5$  мм);  $l_{direct2} = 31.41$  мм (при  $D_{coil2} = 10$  мм);  $l_{direct3} = 47.12$  мм (при  $D_{coil3} = 15$  мм);  $l_{direct4} = 62.83$  мм (при  $D_{coil4} = 20$  мм). Діаметри провідників (струмопровідних жил) обрано рівними  $d=0.3, 0.6, 1, 1.5$  мм. Дослідження проведено на частотах  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц.

Дослідження розпочато з машинного експерименту (моделювання) для прямих провідників, у ході якого для кожного значення параметрів  $l_{direct}$  та  $d$  розраховано величину втрат прямого циліндричного провідника  $K_{f\_direct}$  на трьох вказаних частотах  $f$ . Для розрахунку величини втрат  $K_{f\_direct}$  попередньо було розраховано опір провідника постійному струму  $R_{DC\_direct}$  та опір того ж провідника змінному струму  $R_{AC\_direct}$  на частотах  $f$ . Величину  $R_{DC\_direct}$  розрахо-

## Продовження додатку В

вано за виразом (Б.4), а значення величини  $R_{AC\_direct}$  отримано у ході машинного експерименту. Отримані результати на частоті  $f_1 = 20 \text{ кГц}$  наведено у табл. В.1 – В.4.

Таблиця В.1 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 0.3 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	3.9977	7.9979	11.9980	15.9982
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	4.0670	8.1340	12.2030	16.2670
$K_{f\_direct}$	<b>1.0173</b>	<b>1.0170</b>	<b>1.0171</b>	<b>1.0168</b>

Розроблено автором

Таблиця В.2 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 0.6 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.9994	1.9995	2.9995	3.9996
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	1.0197	2.0393	3.0590	4.0787
$K_{f\_direct}$	<b>1.0203</b>	<b>1.0199</b>	<b>1.0198</b>	<b>1.0198</b>

Розроблено автором

Таблиця В.3 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 1 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.3598	0.7198	1.0798	1.4398
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.3744	0.7489	1.1234	1.4978
$K_{f\_direct}$	<b>1.0407</b>	<b>1.0405</b>	<b>1.0404</b>	<b>1.0403</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку В

Таблиця В.4 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 1.5 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.1599	0.3199	0.4799	0.6399
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.1805	0.3612	0.5418	0.7224
$K_{f\_direct}$	<b>1.1291</b>	<b>1.1291</b>	<b>1.1290</b>	<b>1.1289</b>

Розроблено автором

Результати дослідження на частоті  $f_2 = 60 \text{ кГц}$  наведено у табл. В.5–В.8.

Таблиця В.5 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 0.3 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	3.9977	7.9979	11.9980	15.9982
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	4.0732	8.1464	12.2200	16.2930
$K_{f\_direct}$	<b>1.0189</b>	<b>1.0185</b>	<b>1.0185</b>	<b>1.0184</b>

Розроблено автором

Таблиця В.6 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 0.6 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.9994	1.9995	2.9995	3.9996
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	1.0440	2.0879	3.1324	4.1763
$K_{f\_direct}$	<b>1.0446</b>	<b>1.0442</b>	<b>1.0443</b>	<b>1.0442</b>

Розроблено автором

Таблиця В.7 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 1 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.3598	0.7198	1.0798	1.4398
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.4328	0.8658	1.2973	1.7310
$K_{f\_direct}$	<b>1.2029</b>	<b>1.2029</b>	<b>1.2014</b>	<b>1.2022</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку В

Таблиця В.8 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 1.5 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.1599	0.3199	0.4799	0.6399
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.2621	0.5242	0.7862	1.0485
$K_{f\_direct}$	<b>1.6391</b>	<b>1.6387</b>	<b>1.6383</b>	<b>1.6385</b>

Розроблено автором

Результати дослідження на частоті  $f_3 = 100 \text{ кГц}$  наведено у табл. В.9–В.12.

Таблиця В.9 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 0.3 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	3.9977	7.9979	11.9980	15.9982
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	4.0857	8.1713	12.2570	16.3430
$K_{f\_direct}$	<b>1.0220</b>	<b>1.0217</b>	<b>1.0216</b>	<b>1.0215</b>

Розроблено автором

Таблиця В.10 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 0.6 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.9994	1.9995	2.9995	3.9996
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	1.0896	2.1808	3.2709	4.3617
$K_{f\_direct}$	<b>1.0902</b>	<b>1.0907</b>	<b>1.0905</b>	<b>1.0905</b>

Розроблено автором

Таблиця В.11 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 1 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.3598	0.7198	1.0798	1.4398
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.5167	1.0337	1.5510	2.0676
$K_{f\_direct}$	<b>1.4364</b>	<b>1.4361</b>	<b>1.4363</b>	<b>1.4360</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку В

Таблиця В.12 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_direct}$ ,  $R_{AC\_direct}$  та  $K_{f\_direct}$  для циліндричного прямого провідника довжиною  $l_{direct}$ , діаметром  $d = 1.5 \text{ мм}$

$l_{direct}$	$l_{direct1}=15.7 \text{ мм}$	$l_{direct2}=31.41 \text{ мм}$	$l_{direct3}=47.15 \text{ мм}$	$l_{direct4}=62.83 \text{ мм}$
$R_{DC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.1599	0.3199	0.4799	0.6399
$R_{AC\_direct}, [\text{МОм}]$	0.3292	0.6583	0.9875	1.3167
$K_{f\_direct}$	<b>2.0587</b>	<b>2.0579</b>	<b>2.0578</b>	<b>2.0576</b>

Розроблено автором

Зауважу, що величина втрат прямого одиночного циліндричного провідника  $K_{f\_direct}$  не залежатиме від його довжини  $l_{direct}$ , що і бачимо з вище наведених таблиць (незначною розбіжністю результатів у таблицях ( $<0.001\%$ ), яка знаходиться на межі точності розрахунку середовища кінцево-елементного аналізу, можна знехтувати). Тобто розрахунки виконано правильно.

Наступним кроком дослідження стало проведення машинного експерименту для одиночних витків діаметром  $D_{coil}$ , згорнутих з розглянутих прямих провідників довжиною  $l_{direct}$ . Так само, як і у дослідженні прямих провідників, у ході даного експерименту для кожного значення діаметра витка  $D_{coil}$  та діаметра провідника  $d$  розраховано величину втрат одиночного круглого витка  $K_{f\_circle}$  на трьох вказаних частотах  $f$ . Аналогічно попередньому дослідженню, для визначення величини втрат  $K_{f\_circle}$  розраховано опір провідника витка постійному струму  $R_{DC\_circle}$  (рівне величині  $R_{DC\_direct}$ , оскільки на опір постійному струму практично не впливає згортання прямого провідника у кільце) та опір провідника витка змінному струму  $R_{AC\_circle}$  на частотах  $f$ . Величину  $R_{DC\_circle} = R_{DC\_direct}$  розраховано за виразом (Б.4), а значення величини  $R_{AC\_circle}$  отримано у ході машинного експерименту. Відповідні результати дослідження на частоті  $f_1 = 20 \text{ кГц}$  наведено у табл. В.13–В.16.

## Продовження додатку В

Таблиця В.13 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 0.3$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	3.9977	7.9979	11.9980	15.9982
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	4.3076	8.3761	12.4440	16.5110
$K_{f\_circle}$	<b>1.0775</b>	<b>1.0473</b>	<b>1.0372</b>	<b>1.0321</b>

Розроблено автором

Таблиця В.14 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d = 0.6$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	0.9994	1.9995	2.9995	3.9996
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	1.1399	2.1607	3.1805	4.2001
$K_{f\_circle}$	<b>1.1406</b>	<b>1.0806</b>	<b>1.0603</b>	<b>1.0501</b>

Розроблено автором

Таблиця В.15 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 1$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	0.3598	0.7198	1.0798	1.4398
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	0.4517	0.8261	1.1994	1.5725
$K_{f\_circle}$	<b>1.2555</b>	<b>1.1477</b>	<b>1.1107</b>	<b>1.0921</b>

Розроблено автором

Таблиця В.16 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 1.5$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	0.1599	0.3199	0.4799	0.6399
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	0.2453	0.4237	0.6008	0.7769
$K_{f\_circle}$	<b>1.5346</b>	<b>1.3245</b>	<b>1.2520</b>	<b>1.2142</b>

Розроблено автором



## Продовження додатку В

Результати дослідження на частоті  $f_2 = 60 \text{ кГц}$  наведено у табл. В.17–В.20.

Таблиця В.17 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 0.3 \text{ мм}$

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5 \text{ мм}$	$D_{coil2}=10 \text{ мм}$	$D_{coil3}=15 \text{ мм}$	$D_{coil4}=20 \text{ мм}$
$R_{DC\_circle}, [\text{МОм}]$	3.9977	7.9979	11.9980	15.9982
$R_{AC\_circle}, [\text{МОм}]$	4.3150	8.3892	12.4620	16.5370
$K_{f\_circle}$	<b>1.0794</b>	<b>1.0489</b>	<b>1.0387</b>	<b>1.0337</b>

Розроблено автором

Таблиця В.18 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 0.6 \text{ мм}$

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5 \text{ мм}$	$D_{coil2}=10 \text{ мм}$	$D_{coil3}=15 \text{ мм}$	$D_{coil4}=20 \text{ мм}$
$R_{DC\_circle}, [\text{МОм}]$	0.9994	1.9995	2.9995	3.9996
$R_{AC\_circle}, [\text{МОм}]$	1.1746	2.2167	3.2588	4.3006
$K_{f\_circle}$	<b>1.1753</b>	<b>1.1086</b>	<b>1.0864</b>	<b>1.0753</b>

Розроблено автором

Таблиця В.19 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 1 \text{ мм}$

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5 \text{ мм}$	$D_{coil2}=10 \text{ мм}$	$D_{coil3}=15 \text{ мм}$	$D_{coil4}=20 \text{ мм}$
$R_{DC\_circle}, [\text{МОм}]$	0.3598	0.7198	1.0798	1.4398
$R_{AC\_circle}, [\text{МОм}]$	0.5416	0.9691	1.3959	1.8207
$K_{f\_circle}$	<b>1.5054</b>	<b>1.3464</b>	<b>1.2927</b>	<b>1.2645</b>

Розроблено автором

Таблиця В.20 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 1.5 \text{ мм}$

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5 \text{ мм}$	$D_{coil2}=10 \text{ мм}$	$D_{coil3}=15 \text{ мм}$	$D_{coil4}=20 \text{ мм}$
$R_{DC\_circle}, [\text{МОм}]$	0.1599	0.3199	0.4799	0.6399
$R_{AC\_circle}, [\text{МОм}]$	0.3658	0.6231	0.8771	1.1292
$K_{f\_circle}$	<b>2.2881</b>	<b>1.9479</b>	<b>1.8277</b>	<b>1.7646</b>

Розроблено автором

### Продовження додатку В

Результати дослідження на частоті  $f_3 = 100$  кГц наведено у табл. В.21–В.24.

Таблиця В.21 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 0.3$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	3.9977	7.9979	11.9980	15.9982
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	4.3297	8.4156	12.5010	16.5880
$K_{f\_circle}$	<b>1.0831</b>	<b>1.0522</b>	<b>1.0419</b>	<b>1.0369</b>

Розроблено автором

Таблиця В.22 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 0.6$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	0.9994	1.9995	2.9995	3.9996
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	1.2366	2.3206	3.4059	4.4908
$K_{f\_circle}$	<b>1.2373</b>	<b>1.1606</b>	<b>1.1355</b>	<b>1.1228</b>

Розроблено автором

Таблиця В.23 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 1$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	0.3598	0.7198	1.0798	1.4398
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	0.6524	1.1618	1.6701	2.1754
$K_{f\_circle}$	<b>1.8135</b>	<b>1.6140</b>	<b>1.5466</b>	<b>1.5109</b>

Розроблено автором

Таблиця В.24 – Результати розрахунків величин  $R_{DC\_circle}$ ,  $R_{AC\_circle}$  та  $K_{f\_circle}$  для одиночного витка діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d = 1.5$  мм

$D_{coil}$	$D_{coil1}=5$ мм	$D_{coil2}=10$ мм	$D_{coil3}=15$ мм	$D_{coil4}=20$ мм
$R_{DC\_circle}$ , [МОм]	0.1599	0.3199	0.4799	0.6399
$R_{AC\_circle}$ , [МОм]	0.4589	0.7827	1.1016	1.4182
$K_{f\_circle}$	<b>2.8701</b>	<b>2.4468</b>	<b>2.2954</b>	<b>2.2162</b>

Розроблено автором

### Продовження додатку В

На відміну від прямого одиночного провідника, величина втрат  $K_{f\_direct}$  в якому не залежить від довжини  $l_{direct}$ , у випадку одиночного витка, згорнутого з такого провідника, величина його втрат  $K_{f\_circle}$  суттєво залежатиме від діаметра  $D_{coil}$ , що вказує на вплив діаметра витка на розподіл струму у провіднику. Це, у свою чергу, пояснюється появою та впливом розглянутого у Розділі 2 самоефекту близькості.

Для кількісної оцінки впливу діаметра витка на розподіл струму у провіднику (та на величину втрат  $K_{f\_circle}$ ) обчислено відносне відхилення величин втрат для одиночного круглого витка  $K_{f\_circle}$  та еквівалентного йому за довжиною прямого провідника  $K_{f\_direct}$  діаметрами  $d$ . Обчислення здійснювалося для кожного із наведених значень діаметрів витка  $D_{coil}$  та еквівалентних їм довжин прямого провідника  $l_{direct}$  на трьох значеннях частот  $f$ . Уточнимо, що відносне відхилення для кожного діаметра провідника  $d$  позначено як  $\Delta\_d$  та розраховується у відсотках за наступним виразом:

$$\Delta\_d = \frac{K_{f\_circle} - K_{f\_direct}}{K_{f\_direct}} \cdot 100\% \quad (B.2)$$

де  $\Delta\_d$  – відносне відхилення величин втрат одиночного круглого витка  $K_{f\_circle}$  та еквівалентного йому за довжиною прямого провідника  $K_{f\_direct}$  діаметрами  $d$ ;

$K_{f\_circle}$  – величина втрат одиночного круглого витка;

$K_{f\_direct}$  – величина втрат еквівалентного за довжиною прямого провідника;

Результати розрахунків величин відносного відхилення  $\Delta\_d$  для діаметрів провідників  $d$  на частоті  $f_1 = 20 \text{ кГц}$  наведено у табл. В.25, на частоті  $f_2 = 60 \text{ кГц}$  – у табл. В.26, на частоті  $f_3 = 100 \text{ кГц}$  – у табл. В.27.

## Продовження додатку В

Таблиця В.25 – Результати розрахунків відносного відхилення  $\Delta_d$  для одиночних витків діаметром  $D_{coil}$  та еквівалентних за довжиною  $l_{direct}$  прямих провідників з діаметрами  $d$  на частоті  $f_1 = 20$  кГц

$\Delta_d$	$\Delta_{0.3}, \%$	$\Delta_{0.6}, \%$	$\Delta_1, \%$	$\Delta_{1.5}, \%$
$D_{coil1}=5$ мм ( $l_{direct1}=15.7$ мм)	5.9159	11.7878	20.6361	35.9125
$D_{coil2}=10$ мм ( $l_{direct2}=31.41$ мм)	2.9764	5.9530	10.2993	17.3080
$D_{coil3}=15$ мм ( $l_{direct3}=47.15$ мм)	1.9749	3.9719	6.7652	10.8950
$D_{coil4}=20$ мм ( $l_{direct4}=62.83$ мм)	1.5000	2.9764	4.9873	7.5539

Розроблено автором

Таблиця В.26 – Результати розрахунків відносного відхилення  $\Delta_d$  для одиночних витків діаметром  $D_{coil}$  та еквівалентних за довжиною  $l_{direct}$  прямих провідників з діаметрами  $d$  на частоті  $f_2 = 60$  кГц

$\Delta_d$	$\Delta_{0.3}, \%$	$\Delta_{0.6}, \%$	$\Delta_1, \%$	$\Delta_{1.5}, \%$
$D_{coil1}=5$ мм ( $l_{direct1}=15.7$ мм)	5.9364	12.5096	25.1433	39.4137
$D_{coil2}=10$ мм ( $l_{direct2}=31.41$ мм)	2.9805	6.1689	11.9305	18.8715
$D_{coil3}=15$ мм ( $l_{direct3}=47.15$ мм)	1.9804	4.0352	7.6004	11.5557
$D_{coil4}=20$ мм ( $l_{direct4}=62.83$ мм)	1.4976	2.9763	5.1820	7.6967

Розроблено автором

Таблиця В.27 – Результати розрахунків відносного відхилення  $\Delta_d$  для одиночних витків діаметром  $D_{coil}$  та еквівалентних за довжиною  $l_{direct}$  прямих провідників з діаметрами  $d$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$\Delta_d$	$\Delta_{0.3}, \%$	$\Delta_{0.6}, \%$	$\Delta_1, \%$	$\Delta_{1.5}, \%$
$D_{coil1}=5$ мм ( $l_{direct1}=15.7$ мм)	5.9720	13.4912	26.2582	39.5956
$D_{coil2}=10$ мм ( $l_{direct2}=31.41$ мм)	2.9897	6.4105	12.3924	18.8954
$D_{coil3}=15$ мм ( $l_{direct3}=47.15$ мм)	1.9907	4.1273	7.6789	11.5454
$D_{coil4}=20$ мм ( $l_{direct4}=62.83$ мм)	1.0369	2.9599	5.2138	7.7087

Розроблено автором

*Продовження додатку В*

Із отриманих результатів бачимо, що найбільший вплив діаметра одиночного витка на величину втрат отримуємо за найменшого діаметра витка ( $D_{coil}=5$  мм). У цьому випадку, залежно від частоти та діаметра провідника, вплив самоєфекту близькості на розподіл струму у провіднику та, відповідно, величину втрат витка, буде знаходитися на рівні від 5.91% до 39.59%. Зауважимо, що у згорнутому у виток прямому провіднику, окрім появи самоєфекту близькості, на величину втрат продовжуватиме вплив скін-ефект (хоч і в меншій степені, ніж самоєфект близькості), вплив якого зростає зі збільшенням діаметра провідника. Виходячи із отриманих результатів, найбільший вплив скін-ефекту та ефекту близькості на величину втрат отримуємо для одиночного витка найменшого діаметра ( $D_{coil}=5$  мм), згорнутого з провідників діаметрами  $d = 1$  мм та  $d = 1.5$  мм. У цьому випадку вплив діаметра витка на величину втрат буде рівним від 20.63% до 26.25% (для  $d = 1$  мм) та від 35.91% до 39.59% (для  $d = 1$  мм) залежно від частоти. Для провідників менших діаметрів ( $d = 0.6$  мм та  $d = 0.3$  мм) вказаним впливом скін-ефекту та самоєфекту близькості на величину втрат можна знехтувати, оскільки він є незначним.

## **ДОДАТОК Г**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ  
МІЖВИТКОВОЇ ВІДСТАНІ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ  $K_f$   
ОДНОШАРОВОЇ БАГАТОВИТКОВОЇ ОБМОТКИ**

У Розділі 2 дисертації (п.2.2.4) представлено результати експериментальних досліджень впливу міжвиткової відстані на величину втрат одношарової багатовиткової обмотки.

*Мета додатку* – детальне представлення результатів даного дослідження (а саме машинного моделювання, проведеного у середовищі кінцево-елементного аналізу та теоретичних розрахунків), на основі яких побудовано графічні залежності та зроблено відповідні висновки. Результати представимо у табличному вигляді.

Нагадаємо, що в рамках даного дослідження проведено машинний експеримент для одношарових багатовиткових обмоток з різними відстанями між витками, з наступним порівнянням отриманих результатів з результатами теоретичних розрахунків аналогічних обмоток за аналітичними методиками [18, 22].

У ході дослідження розглянуто одношарову п'ятивиткову обмотку, виконану провідником з діаметром жили  $d = 1$  мм, різною товщиною ізоляції  $a$  ( $a_1 = 0.034$  мм (ПЕВ-1);  $a_2 = 0.047$  мм (ПЕВ-2)) та з введеним примусовим кроком намотування  $h = 0.1$  мм (рис. 2.1). Сумарно останні два параметри визначатимуть відстань між жилами провідників сусідніх витків  $h'''$  (тобто, міжвиткову відстань)).

Для дослідження вибрано наступні значення міжвиткових відстаней:  $h'''_1 = 0.068$  мм,  $h'''_2 = 0.094$  мм,  $h'''_3 = 0.168$  мм,  $h'''_4 = 0.194$  мм. Вказані вище величини  $h'''_1$  та  $h'''_2$  відповідають подвійній товщині ізоляції провідників ПЕВ-1 та ПЕВ-2 відповідно, укладених щільно. Відстані  $h'''_3$  та  $h'''_4$  відповідають подвійній товщині ізоляції вказаних провідників та додатково введеного примусового кроку намотування  $h = 0.1$  мм. Дослідження проведено для максимального ( $D_{coil4}=20$  мм) та мінімального діаметра обмотки ( $D_{coil1}=5$  мм) на трьох частотах:  $f_1 = 20$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц.

Проведено машинний експеримент для обмотки із найбільшим діаметром ( $D_{coil4}=20$  мм), з міжвитковими відстанями  $h'''_1 - h'''_4$ , на трьох частотах  $f$ . У ході експерименту розраховано відповідні значення величини втрат  $K_{f\_model\_multiturn}$ .

### Продовження додатку Г

Далі виконано теоретичний розрахунок величини втрат  $K_f$  аналогічної обмотки за розрахунковими виразами аналітичних методик [18, 22] ( $K_{f\_dowel\_multiturn}$  та  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  відповідно). Результати розрахунків, проведених на частоті  $f_1 = 20$  кГц, представлено у табл. Г.1, на частоті  $f_2 = 60$  кГц – у табл. Г.2, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Г.3 відповідно.

Таблиця Г.1 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_model\_multiturn}$ ,  $K_{f\_dowel\_multiturn}$ ,  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4}=20$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_1 = 20$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$K_{f\_model\_multiturn}$	1.3360	1.3270	1.3090	1.3010
$K_{f\_dowel\_multiturn}$	1.7323	1.7323	1.7323	1.7323
$K_{f\_ferera\_multiturn}$	1.6499	1.6224	1.5539	1.5328

Розроблено автором

Таблиця Г.2 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_model\_multiturn}$ ,  $K_{f\_dowel\_multiturn}$ ,  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4}=20$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_2 = 60$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$K_{f\_model\_multiturn}$	1.8428	1.8151	1.7658	1.7470
$K_{f\_dowel\_multiturn}$	3.2245	3.2245	3.2245	3.2245
$K_{f\_ferera\_multiturn}$	3.0086	2.9365	2.7571	2.7018

Розроблено автором

Таблиця Г.3 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_model\_multiturn}$ ,  $K_{f\_dowel\_multiturn}$ ,  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4}=20$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$K_{f\_model\_multiturn}$	2.3400	2.3080	2.2300	2.2000
$K_{f\_dowel\_multiturn}$	4.1485	4.1485	4.1485	4.1485
$K_{f\_ferera\_multiturn}$	3.8843	3.7951	3.5731	3.5047

Розроблено автором



Продовження додатку Г

Повторимо аналогічні вимірювання для обмотки мінімального діаметра ( $D_{coil}=5$  мм). В іншому умови проведення досліджень ідентичні попереднім. Результати розрахунків на частоті  $f_1 = 20$  кГц представлено у табл. Г.4, на частоті  $f_2 = 60$  кГц – у табл. Г.5, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Г.6.

Таблиця Г.4 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_model\_multiturn}$ ,  $K_{f\_dowel\_multiturn}$ ,  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}=5$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_1 = 20$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$K_{f\_model\_multiturn}$	1.5270	1.5137	1.4918	1.4806
$K_{f\_dowel\_multiturn}$	1.7323	1.7323	1.7323	1.7323
$K_{f\_ferera\_multiturn}$	1.6499	1.6224	1.5539	1.5328

Розроблено автором

Таблиця Г.5 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_model\_multiturn}$ ,  $K_{f\_dowel\_multiturn}$ ,  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}=5$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_2 = 60$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$K_{f\_model\_multiturn}$	2.2976	2.2660	2.2120	2.1845
$K_{f\_dowel\_multiturn}$	3.2245	3.2245	3.2245	3.2245
$K_{f\_ferera\_multiturn}$	3.0086	2.9365	2.7571	2.7018

Розроблено автором

Таблиця Г.6 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_model\_multiturn}$ ,  $K_{f\_dowel\_multiturn}$ ,  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}=5$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$K_{f\_model\_multiturn}$	2.9118	2.8688	2.7900	2.7585
$K_{f\_dowel\_multiturn}$	4.1485	4.1485	4.1485	4.1485
$K_{f\_ferera\_multiturn}$	3.8843	3.7951	3.5731	3.5047

Розроблено автором

### Продовження додатку Г

Як у випадку з максимальним, так і у випадку з мінімальним діаметром обмотки  $D_{coil}$ , бачимо, що при збільшенні міжвиткової відстані  $h'''$ , величина втрат обмотки  $K_f$  зменшується (для машинного експерименту ( $K_{f\_model\_multiturn}$ ) та теоретичного розрахунку за методикою [22] ( $K_{f\_ferera\_multiturn}$ )). Пояснюється це впливом на розподіл струму у витках міжвиткового ефекту близькості, вплив якого, як визначено, зменшується зі збільшенням міжвиткової відстані  $h'''$ . Однак, у випадку теоретичного розрахунку за методикою [18], величина втрат  $K_{f\_dowel\_multiturn}$  не змінюється зі зменшенням міжвиткової відстані. Пояснюється це тим, що, як визначено у Розділі 1, у розрахунковому виразі аналітичної методики [18] було повністю знехтувано впливом на величину втрат одношарової обмотки ефекту близькості, тому розраховане значення описує виключно вплив скін-ефекту на величину втрат одношарової обмотки, яке, очевидно, не залежить від міжвиткової відстані.

Для кількісної оцінки врахування міжвиткового ефекту близькості у аналітичних методиках розрахунку [18, 22], наступним кроком стане розрахунок відносного відхилення величин втрат  $K_f$  обмотки, отриманих у ході машинного експерименту ( $K_{f\_model\_multiturn}$ ) та величин втрат  $K_f$ , отриманих у ході теоретичних розрахунків аналогічної обмотки за вказаними методиками ( $K_{f\_dowel\_multiturn}$  та  $K_{f\_ferera\_multiturn}$  відповідно). Відносні відхилення позначимо як  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  та розрахуємо їх у відсотках за наступними виразами:

$$\Delta_{model\_Dowel} = \frac{K_{f\_Dowel\_multiturn} - K_{f\_model\_multiturn}}{K_{f\_model\_multiturn}} \cdot 100\% \quad (Г.1)$$

де  $\Delta_{model\_Dowell}$  – відносне відхилення результатів машинного експерименту та результатів теоретичних розрахунків за методикою [18];

$K_{f\_Dowel\_multiturn}$  – величина втрат багатовиткової одношарової обмотки, розрахована за методикою [18];

$K_{f\_model\_multiturn}$  – величина втрат багатовиткової одношарової обмотки, розрахована у ході машинного експерименту.

## Продовження додатку Г

$$\Delta_{model\_Ferrera} = \frac{K_{f\_Ferrera\_multiturn} - K_{f\_model\_multiturn}}{K_{f\_model\_multiturn}} \cdot 100\% \quad (\text{Г.2})$$

де  $\Delta_{model\_Ferrera}$  – відносне відхилення результатів машинного експерименту та результатів теоретичних розрахунків за методикою [22];

$K_{f\_Ferrera\_multiturn}$  – величина втрат багатовиткової одношарової обмотки, розрахована за методикою [22];

$K_{f\_model\_multiturn}$  – величина втрат багатовиткової одношарової обмотки, розрахована у ході машинного експерименту.

Результати обчислення відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для обмотки діаметром  $D_{coil4}=20$  мм на частоті  $f_1 = 20$  кГц представлені у табл. Г.7, на частоті  $f_2 = 60$  кГц – у табл. Г.8, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Г.9.

Таблиця Г.7 – Результати розрахунків величин відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4}=20$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_1 = 20$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$\Delta_{model\_Dowel}, \%$	29.6632	30.5426	32.3377	33.1514
$\Delta_{model\_Ferrera}, \%$	23.4955	22.2607	18.7089	17.8171

Розроблено автором

Таблиця Г.8 – Результати розрахунків величин відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4}=20$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_2 = 60$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$\Delta_{model\_Dowel}, \%$	74.9783	77.6486	82.6084	84.5736
$\Delta_{model\_Ferrera}, \%$	63.2624	61.7817	56.1389	54.6537

Розроблено автором

Продовження додатку Г

Таблиця Г.9 – Результати розрахунків величин відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil4}=20$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$\Delta_{model\_Dowell}$ %	77.2863	79.7444	86.0314	88.5682
$\Delta_{model\_Ferrera}$ %	65.9957	64.4324	60.2287	59.3045

Розроблено автором

Виконаємо аналогічні обчислення відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для обмотки діаметром  $D_{coil1}=5$  мм на частоті  $f_1 = 20$  кГц. Результати розрахунків на частоті  $f_1 = 20$  кГц представлені у табл. Г.10, на частоті  $f_2 = 60$  кГц – у табл. Г.11, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Г.12.

Таблиця Г.10 – Результати розрахунків величин відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil1}=5$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_1 = 20$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$\Delta_{model\_Dowell}$ %	13.4447	14.4414	16.1215	16.9999
$\Delta_{model\_Ferrera}$ %	8.0485	7.1811	4.1628	3.5256

Розроблено автором

Таблиця Г.11 – Результати розрахунків величин відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil1}=5$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_2 = 60$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$\Delta_{model\_Dowell}$ %	40.3421	42.2992	45.7731	47.6081
$\Delta_{model\_Ferrera}$ %	30.9453	29.5896	24.6429	23.6805

Розроблено автором

*Продовження додатку Г*

Таблиця Г.12 – Результати розрахунків величин відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  для п'ятивиткової одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}=5$  мм для різних міжвиткових відстаней  $h'''$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$h'''$	$h'''_1=0.068$ мм	$h'''_2=0.094$ мм	$h'''_3=0.168$ мм	$h'''_4=0.194$ мм
$\Delta_{model\_Dowell}$ %	42.4720	44.6075	48.6918	50.3897
$\Delta_{model\_Ferrera}$ %	33.3986	32.2888	28.0681	27.0509

*Розроблено автором*

Теоретично, якби у розрахункових виразах методик було б коректно враховано вплив ефекту близькості (у т.ч. міжвиткового) на розподіл струму у провідниках обмоток (відповідно, і на величину втрат), то розходження результатів розрахунків було б незначним, що проявлялося б у мінімальному значенні відносного відхилення  $\Delta$ . Однак, бачимо, що отримані величини відносного відхилення результатів машинного експерименту та теоретичних розрахунків досить суттєві, що підтверджує припущення про некоректне врахування розглянутими аналітичними методиками розрахунку впливу міжвиткової відстані (міжвиткового ефекту близькості) на величину втрат одношарової багатовиткової обмотки.

Звернемо увагу на тенденцію зміни величини відносного відхилення  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  залежно від міжвиткової відстані  $h'''$ . У випадку величини  $\Delta_{model\_Dowell}$ , бачимо, що зі збільшенням відстані між витками розбіжність між результатами машинного експерименту та розрахунками за методикою [18] зростає, що проявляється у збільшенні величини  $\Delta_{model\_Dowell}$ . Причому, дана тенденція не змінюється від діаметра обмотки  $D_{coil}$  та частоти вимірювання  $f$ . Пояснення цьому наведено вище, та, нагадаємо, полягає у неврахуванні ефекту близькості для одношарової обмотки взагалі.

У випадку величини  $\Delta_{model\_Ferrera}$ , бачимо, що зі збільшенням відстані між витками  $h'''$  розбіжність між результатами машинного експерименту та розрахунками за методикою [22] зменшується, тобто тенденція зміни величини

### Продовження додатку Г

втрат обмотки для машинного експерименту  $K_{f\_model\_multiturn}$  залежно від міжвиткової відстані приблизно співпадає із тенденцією зміни розрахованої за методикою [22] величиною втрат тієї ж обмотки  $K_{f\_ferera\_multiturn}$ . Пояснюється це тим, що, на відміну від методики [18], у даній методиці враховано вплив міжвиткової відстані (міжвиткового ефекту близькості) на величину втрат обмотки через товщину ізоляції. Однак наявна розбіжність, хоч і значно менша, пояснюється неврахуванням особливостей розподілу струму у крайніх та внутрішніх витках, що впливає на величину втрат обмотки  $K_{f\_ferera\_multiturn}$ .

Далі оцінімо вплив зміни діаметра обмотки  $D_{coil}$  на величину відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  (залежно від міжвиткової відстані  $h''$ ). Визначено, що на розподіл струму у провідниках багатовиткової одношарової обмотки впливатиме не лише міжвитковий ефект близькості, вплив якого залежатиме від відстані між витками, а й самоефект близькості, який визначатиме розподіл струму у конкретному витку залежно від його діаметра.

Розглянемо випадок найменшого діаметра обмотки ( $D_{coil1}=5$  мм). У цьому разі вплив самоефекту близькості на розподіл струму у провідниках обмотки буде найбільшим, що при мінімальній відстані між витками ( $h''_1=0.068$  мм) та, відповідно, максимальному впливу міжвиткового ефекту близькості дасть найбільше значення величини втрат обмотки на заданій частоті –  $K_{f\_model\_multiturn} = 2.9118$  (на частоті  $f_3 = 100$  кГц) (табл. Г.4–Г.6).

У випадку найбільшого діаметра обмотки ( $D_{coil4}=20$  мм) вплив самоефекту близькості буде мінімальним, що при максимальній міжвитковій відстані ( $h''_4=0.194$  мм) і найменшому впливу міжвиткового ефекту близькості дасть найменше значення величини втрат такої обмотки на заданій частоті –  $K_{f\_model\_multiturn} = 2.2$  (на частоті  $f_3 = 100$  кГц) (табл. Г.1–Г.3), що цілком передбачувано.

Однак щодо тенденції відносних відхилень  $\Delta_{model\_Dowell}$  та  $\Delta_{model\_Ferrera}$  залежно від діаметра витка, спостерігаємо, що для найменшого діаметра витка (максимального впливу самоефекту близькості), вказані відносні відхилення

*Продовження додатку Г*

матимуть менші значення, ніж для найбільшого діаметра витка (і мінімального впливу самоєфекту близькості відповідно). У випадку відносного відхилення  $\Delta_{model\_Ferrera}$  це, знову ж, може пояснюватися неврахуванням впливу діаметра витка (самоєфекту близькості) та особливостей розподілів струму у крайніх та внутрішніх витках обмотки. Відносне відхилення  $\Delta_{model\_Dowell}$  розглядати немає сенсу, з причини нехтування ефектом близькості для одношарової обмотки взагалі.

## **ДОДАТОК Д**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ  
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ВИТКІВ ОДНОШАРОВОЇ  
ОБМОТКИ БЕЗ ОСЕРДЯ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ  $K_f$**



У Розділі 3 дисертації (п.3.2.2), відповідно до одного з поставлених завдань дослідження, представлено результати досліджень впливу кількості витків одношарової обмотки без осердя на величину її втрат.

*Мета додатку* – детальне представлення результатів даного дослідження (а саме машинного експеримент (моделювання), проведеного у середовищі кінцево-елементного аналізу, натурного вимірювання та теоретичних розрахунків), на основі яких побудовано графічні залежності та зроблено відповідні висновки. Результати представимо у табличному вигляді.

В рамках даного дослідження буде проведено порівняння експериментальних результатів, отриманих для одношарової обмотки без осердя з різною кількістю витків  $N$ , з результатами теоретичного розрахунку тієї ж обмотки за методикою [22].

Перед початком проведення експериментальних вимірювань, нагадаємо, що у п. 3.2.1 Розділу 3 було обґрунтовано організацію експериментальних досліджень, виходячи із обмежень за кількістю витків обмотки, яку можливо виміряти у ході машинного та натурного експериментів. Таким чином, для розширення діапазону кількості витків обмотки (до  $N = 70$ ) та отримання максимально інформативних результатів досліджень, експериментальну частину вирішено організувати шляхом введення двох взаємодоповнюючих складових – машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу (для кількості витків обмотки  $N \leq 25$ ) та натурних експериментальних вимірювань (для кількості витків обмотки  $N \geq 20$ ).

Проведення машинного експерименту у середовищі кінцево-елементного аналізу не потребує особливих пояснень, оскільки методика його проведення нескладна та була описана раніше, однак нагадаємо основні положення. Отже, для розрахунку величини втрат досліджуваної обмотки  $K_f$  використовуємо вираз (Б.1), попередньо розрахувавши опір обмотки постійному струму  $R_{DC}$  (за загальновідомим виразом, наприклад (Б.4)) та опір обмотки змінному струму  $R_{AC}$  на частоті  $f$ , (обчислюємо у процесі симуляції трьохвимірної моделі обмотки у середовищі кінцево-елементного аналізу). Шляхом підстановки

### Продовження додатку Д

отриманих результатів у вираз (Б.1), розраховуємо величину втрат обмотки  $K_f$ .

Однак виконання натурного експерименту має свої особливості та потребує додаткового розгляду та пояснення. Суть натурних експериментів полягає у виготовленні ряду зразків обмоток (з осердям та без) з різною кількістю витків  $N$ , виконаних провідниками діаметром  $d$  та подальшому обчисленні величини втрат обмотки  $K_f$  за отриманими результатами вимірювання на вказаних частотах  $f$ .

В якості вимірювального приладу застосуємо  $LCR/ESR$ -метр типу *BK Precision* моделі 886 (рис. Д.1) [36], який дозволяє вимірювати ряд параметрів обмотки на п'яти фіксованих частотах, однак для дослідження оберемо лише три, найближчі до ультразвукового діапазону частот –  $f_1 = 1 \text{ кГц}$ ,  $f_2 = 10 \text{ кГц}$ ,  $f_3 = 100 \text{ кГц}$ . Таким чином, у подальших дослідженнях натурні вимірювання, машинний експеримент та теоретичні розрахунки виконуватимемо на вказаних частотах. Зауважимо, що основні практичні висновки та рекомендації у *Розділі 3* надані для частоти  $f_3 = 100 \text{ кГц}$ , оскільки за такої частоти найбільш чітко простежується вплив кількості витків та феромагнітного осердя на величину втрат обмотки.



Рисунок Д.1 – Загальний вигляд  $LCR/ESR$ -метр типу *BK Precision* моделі 886 (в комплекті – вимірювальні щупи та блок живлення)

(розроблено автором)

### Продовження додатку Д

Розглянемо особливості проведення натурного вимірювання величини втрат обмотки за допомогою згаданого *LCR/ESR*-метра. Даний прилад дозволяє виконувати вимірювання ряду параметрів електронних компонентів, у тому числі, й індуктивних елементів на п'яти фіксованих частотах з досить високою точністю. Серед функцій приладу, необхідних для розрахунку величини втрат обмотки  $K_f$ , є:

- вимірювання величини опору постійному струму (режим «*DCR*» – результат відображається у вигляді величини опору в  $[Ом]$ , точність:  $1\% \pm 1$  (для  $R_{dc}=0.1 \dots 1 Ом$ ). У діапазоні опорів  $R_{dc}=0.01 \dots 0.1 Ом$  визначена точність складала близько  $2\% \pm 1$ ;

- вимірювання величини комплексного імпедансу обмотки на заданій частоті (режим «*Z*» – результат відображається у вигляді комплексного числа у показниковій формі – величини повного опору обмотки  $z$  в  $[Ом]$  та фази комплексного опору  $\theta$  в [град]). Точність вимірювання комплексного імпедансу на частотах  $f=1 кГц$ ,  $10 кГц$  становить  $0.5\% \pm 1$  (для  $Z=1 \dots 10 Ом$ ), на частоті  $f=100 кГц$  точність становить  $2\% \pm 1$  (для  $Z=1 \dots 10 Ом$ ); Точність вимірювання фази на частотах  $f=1 кГц$ ,  $10 кГц$  становить  $\pm 0.261\%$  (для  $Z=1 \dots 10 Ом$ ), на частоті  $f=100 кГц$  точність становить  $1.046\% \pm 1$  (для  $Z=1 \dots 10 Ом$ );

- вимірювання добротності обмотки  $Q$  та величини її паралельної індуктивності  $L_p$  на обраній частоті  $f$  (режим «*L<sub>p</sub>*» – у цьому режимі одночасно відображається значення індуктивності обмотки та її добротності). Точність вимірювання індуктивності  $L_p$  на частотах  $f=1 кГц$ ,  $10 кГц$  становить  $1\% \pm 1$  (для  $L=1.59 мкГн \dots 15.91 мкГн$ ), на частоті  $f=100 кГц$  точність становить  $2\% \pm 1$  (для  $L=1.59 мкГн \dots 15.91 мкГн$ ); точність вимірювання індуктивності  $L_p$  на частоті  $f=1 кГц$  становить  $1\% \pm 1$  (для  $L=15.91 мкГн \dots 1.591 мГн$ ), на частоті  $f=10 кГц$  точність становить  $0.2 \dots 0.5\% \pm 1$  (для  $L=15.91 мкГн \dots 1.591 Гн$ ), на частоті  $f=100 кГц$  точність становить  $0.4\% \pm 1$  (для  $L=15.91 мкГн \dots 159.1 мГн$ ); Точність вимірювання добротності  $Q$  складає до  $3\% \pm 1$  (для  $Q=0.2 \dots 25$ ) та  $2\% \pm 1$  (для  $Q=4.6 \dots 185$ );

### *Продовження додатку Д*

Щодо вимірювання величини опору обмотки постійному струму  $R_{DC}$  в режимі « $DCR$ », то в даному випадку особливих коментарів та пояснень надавати немає потреби.

Однак, вимірювання величини опору змінному струму  $R_{AC}$  потребує деяких пояснень. Використовуючи даний прилад вимірювання вказаної величини можна виконати двома способами.

Перший – у режимі вимірювання імпедансу обмотки (комплексного опору)  $Z$  на заданій частоті  $f$ . При використанні даного режиму вимірювання, як уже вказувалося вище, отримуємо результат у вигляді комплексного числа, представленого у показниковій формі:

$$Z = z \cdot e^{j \cdot \varphi} \quad (Д.1)$$

де  $Z$  – величина комплексного опору обмотки,  $Ом$ ;

$z$  – величина повного опору обмотки,  $Ом$ ;

$\varphi$  – фаза комплексного опору (у приладі використано позначення  $\Theta$ ), *град*.

Виконати розрахунок дійсної частини комплексного опору (тобто, величини активного опору  $R$  (чи опору змінному струму  $R_{AC}$ )) з виразу (Д.1) хоч і можливо, але досить ресурсозатратно, тому таким способом розрахунок величини активного опору провідника змінному струму  $R_{AC}$  проводити не будемо.

Другий – застосовуючи визначення добротності паралельного коливального контуру  $Q$ , який складається з досліджуваного індуктивного елемента та ємності, що входить до складу приладу. Згідно із визначенням, добротність обмотки індуктивного елемента  $Q$  індуктивності  $L$  на частоті  $f$  рівна відношенню реактивного опору обмотки  $X_L$  на вказаній частоті до активного опору втрат  $R_{loss}$  (або опору змінному струму  $R_{AC}$ ):

Продовження додатку Д

$$Q = \frac{X_L}{R_{loss}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{R_{AC}} \quad (\text{Д.2})$$

де  $Q$  – добротність обмотки;

$X_L$  – реактивний опір циліндричного провідника змінному струму, Ом;

$R_{loss}$  – опір втрат обмотки (еквівалентний опору обмотки змінному струму  $R_{AC}$ ), Ом;

$f$  – частота, Гц;

$L$  – індуктивність обмотки, Гн.

З виразу (Д.2) не важко розрахувати величину опору змінному струму  $R_{AC}$  за умови, що інші величини відомі. Для цього виконаємо нескладне перетворення вказаного виразу:

$$R_{AC} = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{Q} \quad (\text{Д.3})$$

де  $R_{AC}$  – опір обмотки змінному струму частотою  $f$ , Ом;

$f$  – частота, Гц;

$L$  – індуктивність обмотки, Гн;

$Q$  – добротність обмотки.

Таким чином, для розрахунку величини опору обмотки змінному струму  $R_{AC}$  на обраній частоті  $f$ , необхідно розрахувати індуктивність обмотки  $L$  та її добротність  $Q$ . Все це дозволяє виконати даний прилад при виборі відповідної частоти вимірювання  $f$  та режиму « $L_p$ ». Далі розраховуємо величину втрат обмотки  $K_f$ , підставивши у вираз (Б.1) розраховані вище величини  $R_{DC}$  та  $R_{AC}$ .

Перейдемо до експериментальних вимірювань з розрахунком величини втрат  $K_{f\_exp}$  для одношарової обмотки без осердя та діаметром  $D_{coil} = 10$  мм. Обмотка виконана провідниками з діаметрами:  $d_1 = 0.5$  мм,  $d_2 = 0.75$  мм,  $d_3 = 1$  мм, кількість витків  $N = 1 \dots 50$ , міжвиткова відстань  $h'''$  рівна  $h''' = 0.068$  мм.

### Продовження додатку Д

Вимірювання виконаємо на частотах:  $f_1 = 1 \text{ кГц}$ ,  $f_2 = 10 \text{ кГц}$ ,  $f_3 = 100 \text{ кГц}$ .

Далі виконаємо теоретичні розрахунки величини втрат  $K_{f\_Ferrera}$  аналогічної обмотки за аналітичним виразом методики [22]. Результати експериментальних та теоретичних розрахунків для обмотки на частоті  $f_1 = 1 \text{ кГц}$ , виконаної провідником діаметром  $d_1 = 0.5 \text{ мм}$  представлено у табл. Д.1, на частоті  $f_2 = 10 \text{ кГц}$  – у табл. Д.2, на частоті  $f_3 = 100 \text{ кГц}$  – у табл. Д.3.

Таблиця Д.1 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10 \text{ мм}$  з діаметром провідника  $d_1 = 0.5 \text{ мм}$  та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_1 = 1 \text{ кГц}$

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	2.8	5.75	14.39	28.79	43.19	57.0	73.0	86.0	117.0	140.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	2.82	5.79	14.53	29.09	43.68	57.71	73.98	87.21	118.75	145.0
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	2.55	3.36	4.20	6.20	8.0
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	0.27	0.28	0.30	0.33	0.35
$K_{f\_exp}$	<b>1.007</b>	<b>1.008</b>	<b>1.01</b>	<b>1.0105</b>	<b>1.0115</b>	<b>1.0125</b>	<b>1.0135</b>	<b>1.0141</b>	<b>1.015</b>	<b>1.029</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>

Розроблено автором

Таблиця Д.2 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10 \text{ мм}$  з діаметром провідника  $d_1 = 0.5 \text{ мм}$  з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_2 = 10 \text{ кГц}$

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	2.8	5.75	14.39	28.79	43.19	57.0	73.0	86.0	117.0	140.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	2.83	5.82	14.57	29.18	43.81	57.89	74.17	87.42	119.0	145.0
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	2.55	3.36	4.20	6.20	8.0
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	2.7	2.8	3.0	3.2	3.5
$K_{f\_exp}$	<b>1.0129</b>	<b>1.0130</b>	<b>1.0131</b>	<b>1.0135</b>	<b>1.0145</b>	<b>1.0157</b>	<b>1.0161</b>	<b>1.0166</b>	<b>1.0170</b>	<b>1.0360</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>	<b>1.0129</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Д

Таблиця Д.3 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_1 = 0.5$  мм з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	2.8	5.75	14.39	28.79	43.19	57.0	73.0	86.0	117.0	140.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	3.16	6.67	17.26	35.98	55.71	77.0	101.0	122.0	169.0	205.0
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	2.55	3.36	4.20	6.20	8.0
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	20.8	21.0	21.6	23.1	24.5
$K_{f\_exp}$	<b>1.130</b>	<b>1.160</b>	<b>1.20</b>	<b>1.250</b>	<b>1.290</b>	<b>1.330</b>	<b>1.384</b>	<b>1.419</b>	<b>1.444</b>	<b>1.464</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>	<b>1.784</b>

Розроблено автором

Результати експериментальних та теоретичних розрахунків для обмотки без осердя, виконаної провідником діаметром  $d_2 = 0.75$  мм на частоті  $f_1 = 1$  кГц представлено у табл. Д.4, на частоті  $f_2 = 10$  кГц – у табл. Д.5, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Д.6.

Таблиця Д.4 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_2 = 0.75$  мм з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_1 = 1$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	1.27	2.55	6.39	12.79	19.19	23.5	34.0	40.0	53.0	67.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1.39	2.81	7.05	14.15	21.28	26.08	37.77	44.88	61.74	78.25
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	1.95	2.59	3.0	4.35	5.84
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	0.47	0.43	0.42	0.44	0.47
$K_{f\_exp}$	<b>1.1</b>	<b>1.102</b>	<b>1.1045</b>	<b>1.107</b>	<b>1.109</b>	<b>1.110</b>	<b>1.111</b>	<b>1.122</b>	<b>1.165</b>	<b>1.168</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>	<b>1.0007</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Д

Таблиця Д.5 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_2 = 0.75$  мм з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_2 = 10$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	1.27	2.55	6.39	12.79	19.19	23.5	34.0	40.0	53.0	67.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1.40	2.81	7.07	14.17	21.30	26.13	37.91	45.2	62.01	78.65
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	1.95	2.59	3.0	4.35	5.80
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	4.7	4.3	4.2	4.4	4.6
$K_{f\_exp}$	<b>1.103</b>	<b>1.105</b>	<b>1.107</b>	<b>1.108</b>	<b>1.110</b>	<b>1.112</b>	<b>1.115</b>	<b>1.130</b>	<b>1.170</b>	<b>1.174</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>	<b>1.068</b>

Розроблено автором

Таблиця Д.6 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_2 = 0.75$  мм з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	1.27	2.55	6.39	12.79	19.19	23.5	34.0	40.0	53.0	67.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1.63	3.44	9.45	21.74	36.65	49.13	75.5	93.0	129.0	164.15
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	1.91	2.53	2.97	4.24	5.66
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	24.4	21.0	20.0	20.7	21.6
$K_{f\_exp}$	<b>1.290</b>	<b>1.350</b>	<b>1.480</b>	<b>1.700</b>	<b>1.910</b>	<b>2.091</b>	<b>2.222</b>	<b>2.325</b>	<b>2.434</b>	<b>2.450</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>	<b>2.852</b>

Розроблено автором

Результати експериментальних та теоретичних розрахунків для обмотки без осердя, виконаної провідником діаметром  $d_3 = 1$  мм на частоті  $f_1 = 1$  кГц представлено у табл. Д.7, на частоті  $f_2 = 10$  кГц – у табл. Д.8, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Д.9.



## Продовження додатку Д

Таблиця Д.7 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_3 = 1$  мм з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_1 = 1$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [мОм]	0.72	1.43	3.6	7.2	10.8	14.39	18.0	21.0	28.2	37.0
$R_{ACexp}$ , [мОм]	0.73	1.45	3.65	7.31	10.97	14.63	18.57	22.2	33.1	44.8
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	1.72	2.20	2.74	3.78	4.79
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	0.74	0.74	0.77	0.72	0.67
$K_{f\_exp}$	<b>1.0122</b>	<b>1.0134</b>	<b>1.0142</b>	<b>1.0153</b>	<b>1.0161</b>	<b>1.017</b>	<b>1.032</b>	<b>1.057</b>	<b>1.174</b>	<b>1.211</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>	<b>1.002</b>

Розроблено автором

Таблиця Д.8 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_3 = 1$  мм з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_2 = 10$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [мОм]	0.72	1.43	3.6	7.2	10.8	14.39	18.0	21.0	28.2	37.0
$R_{ACexp}$ , [мОм]	0.81	1.63	4.12	8.28	12.48	16.7	21.5	27.0	40.7	54.5
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	1.65	2.1	2.7	3.76	4.7
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	6.2	6.13	6.2	5.8	5.4
$K_{f\_exp}$	<b>1.133</b>	<b>1.140</b>	<b>1.145</b>	<b>1.150</b>	<b>1.156</b>	<b>1.161</b>	<b>1.197</b>	<b>1.286</b>	<b>1.445</b>	<b>1.474</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>	<b>1.222</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Д

Таблиця Д.9 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_l = 1$  мм з кількістю витків  $N$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	0.72	1.43	3.6	7.2	10.8	14.39	18.0	21.0	28.2	37.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1.17	2.37	6.21	14.48	26.04	39.64	56.0	69.0	94.0	123.6
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	1.6	2.08	2.6	3.56	4.52
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	25.3	23.3	23.6	23.8	23
$K_{f\_exp}$	<b>1.625</b>	<b>1.661</b>	<b>1.725</b>	<b>2.012</b>	<b>2.411</b>	<b>2.755</b>	<b>3.111</b>	<b>3.286</b>	<b>3.333</b>	<b>3.342</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>	<b>4.008</b>

Розроблено автором

Бачимо, для усіх наведених випадків при збільшенні кількості витків обмотки  $N$  зростає величина її втрат  $K_{f\_exp}$ . Дана тенденція пояснюється зміною індукції магнітного поля, утвореного при протіканні струму у провідниках обмотки. Але, починаючи з кількості витків приблизно  $N = 30$ , спостерігаємо значне сповільнення росту величини  $K_{f\_exp}$ , яка далі мало залежатиме від подальшого збільшення кількості витків. Причому, найбільш яскраво дане явище спостерігаємо на частоті  $f_3 = 100$  кГц. На графіках, представлених у Розділі 3, це відповідає виходу на плато.

Також у всіх розглянутих випадках, теоретично розрахована величина втрат обмотки  $K_{f\_Ferrera}$  не залежить від числа витків обмотки  $N$ , що очевидно, оскільки у методиці [22] знехтувано впливом кількості витків  $N$  на величину втрат. Як зазначено у Розділі 3, у випадку одношарової обмотки без осердя, з кількістю витків  $N \geq 30$  (а точніше, в діапазоні  $N = 30 \dots 50$ ) відносне відхилення величини  $K_{f\_Ferrera}$  та  $K_{f\_exp}$  майже не змінюється з ростом кількості витків та сягає 20.5%, залежно від обраної частоти  $f$  та діаметра провідника обмотки  $d$ . Тому було зроблено висновок, що аналітичну методику розрахунку [22] можливо використовувати для обчислення величини втрат одношарових

### Продовження додатку Д

обмоток  $K_f$ , однак за умови, що обмотка без осердя, кількість витків складатиме  $N \geq 30$ , а результат розрахунку скореговано на значення відносного відхилення величин втрат обмотки  $K_{f\_Ferrera}$  та  $K_{f\_exp}$  (позначимо його як  $\Delta_{correction}$ ).

У табл. Д.10 наведемо значення величини корекції  $\Delta_{correction}$  (%) для діапазону кількості витків обмотки  $N = 30...50$  з діаметром  $D_{coil} = 10$  мм, залежно від діаметра провідника  $d$  та частоти  $f$ . У випадку, якщо корекція відбуватиметься у бік збільшення розрахованої величини втрат  $K_{f\_exp}$ , то перед кожним значенням величини корекції додамо знак «+», у випадку зменшення (що особливо проявляється на частотах  $f_1 = 1$  кГц,  $f_2 = 10$  кГц) – знак «-».

Таблиця Д.10 – Результати розрахунку значень корекції  $\Delta_{correction}$ , одношарової обмотки без осердя діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідників  $d$ , кількістю витків  $N = 30...50$  на частотах  $f$

$d, [мм]$	$d_1 = 0.5 [мм]$	$d_2 = 0.75 [мм]$	$d_3 = 1 [мм]$
$\Delta_{correction\_1}, \%$ ( $N = 30...50, f = 1$ кГц)	-1.38% ... -2.8%	-10.8% ... -14.32%	-5.2% ... -17.25%
$\Delta_{correction\_10}, \%$ ( $N = 30...50, f = 10$ кГц)	-0.35% ... -2.23%	-5.5% ... -9%	-5% ... -17%
$\Delta_{correction\_100}, \%$ ( $N = 30...50, f = 100$ кГц)	+20.5% ... +18%	+18.5% ... +14.1%	+18% ... +16.6%

Розроблено автором

Як бачимо, діапазон значень величини корекції у кожному конкретному випадку невеликий (до 5%), що закономірно, оскільки за вказаного діапазону кількості витків ( $N = 30...50$ ) величина втрат обмотки виходить на плато та мало залежить від кількості витків. Винятком є лише два випадки на частотах  $f = 1$  кГц та  $f = 10$  кГц для діаметра провідника  $d_3 = 1$  мм, оскільки вихід на плато кривої величини втрат  $K_{f\_exp}$  відбувається за кількості витків уже  $N \geq 40$ . Зауважимо, що найбільше значення величини корекції спостерігаємо на частоті  $f = 100$  кГц, оскільки саме на цій частоті найбільше проявляється вплив кількості витків на величину втрат обмотки  $K_{f\_exp}$  та різниця між експериментальними та теоретичними результатами.

## **ДОДАТОК Е**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ  
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ВИТКІВ ОДНОШАРОВОЇ  
ОБМОТКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ НА ВЕЛИЧИНУ ВТРАТ**  
*K<sub>f</sub>*

У Розділі 3 дисертації (п.3.2.3) представлено результати експериментальних досліджень впливу кількості витків одношарової обмотки з феромагнітним осердям на величину її втрат.

*Мета додатку* – детальне представлення результатів даного дослідження (а саме машинного моделювання, проведеного у середовищі кінцево-елементного аналізу, натурного вимірювання та теоретичних розрахунків), на основі яких побудовано графічні залежності та зроблено відповідні висновки. Результати представимо у табличному вигляді. В рамках даного дослідження проведено порівняння експериментальних результатів, отриманих для одношарової обмотки з феромагнітним осердям та різною кількістю витків  $N$ , з результатами теоретичного розрахунку тієї ж обмотки за методикою [22].

Зазначимо, що детальний розгляд методики та особливостей виконання натурного та машинного експериментів проведено у Додатку Д, а оскільки у даному та попередньому дослідженнях за способом проведення вони ідентичні, тому в даному додатку на цих питаннях зупинятися не станемо. Одразу перейдемо до експериментальних вимірювань, у ході яких виконаємо розрахунок величини втрат  $K_{f\_exp\_core}$  для одношарової обмотки з феромагнітним осердям та фіксованим діаметром  $D_{coil} = 10$  мм. Обмотка виконана провідниками діаметрами:  $d_1 = 0.5$  мм,  $d_2 = 0.75$  мм,  $d_3 = 1$  мм, з кількістю витків  $N = 1 \dots 70$ , міжвиткова відстань  $h'''$  фіксована та рівна подвійній товщині ізоляції провідника ( $h''' = 0.068$  мм). У конструкцію обмотки введено феромагнітне осердя марки 600НН, виконане у вигляді циліндричного стержня діаметром  $D_{core} = 10$  мм та довжиною  $l_{core} = 160$  мм. Вимірювання виконаємо на частотах:  $f_1 = 1$  кГц,  $f_2 = 10$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц. Експериментальний макет та зразок вимірювання представлено на рис. Е.1, рис. Е.2.

Виконаємо теоретичні розрахунки величини втрат ( $K_{f\_Ferrera}$ ) аналогічної обмотки за аналітичним виразом методики [22]. Результати експериментальних ( $K_{f\_exp\_core}$ ) та теоретичних ( $K_{f\_Ferrera}$ ) розрахунків обмотки на частоті  $f_1 = 1$  кГц, виконаної провідником діаметром  $d_1 = 0.5$  мм представлено у табл. Е.1, на частоті  $f_2 = 10$  кГц – у табл. Е.2, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Е.3.

*Продовження додатку Е*



Рисунок Е.1 – Приклад експериментального вимірювання параметрів багатовиткової одношарової обмотки із феромагнітним осердям ( $N=55$  витків,  $D_{coil}=10$  мм,  $d_{wire}=1$  мм,  $f=100$  кГц). На дисплеї приладу представлені виміряні значення паралельної індуктивності  $L_p$  [мкГн] та добротності обмотки  $Q$   
(розроблено автором)



Рисунок Е.2 – Приклад експериментального вимірювання параметрів багатовиткової одношарової обмотки із феромагнітним осердям ( $N=55$  витків,  $D_{coil}=10$  мм,  $d_{wire}=1$  мм). На дисплеї приладу представлено виміряне значення опору обмотки постійному струму  $R_{dc}$  [Ом].  
(розроблено автором)

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.1 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_l = 0.5$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_l = 1$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	2.8	5.75	14.39	28.79	43.19	53.0	69.0	84.0	108.0	139.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	2.8002	5.751	14.397	28.81	43.28	53.16	69.28	84.44	108.66	139.97
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	38.9	58.2	80.5	132.8	192
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	4.6	5.3	6.0	7.6	8.6
$K_{f\_exp}$	<b>1.0001</b>	<b>1.0002</b>	<b>1.0005</b>	<b>1.0010</b>	<b>1.0022</b>	<b>1.0031</b>	<b>1.0042</b>	<b>1.0053</b>	<b>1.0062</b>	<b>1.0070</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.1

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	158.0	173.0	190.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	159.13	174.3	191.48
$L$ , [мкГн]	220.2	272.0	353.2
$Q$	8.7	9.8	11.6
$K_{f\_exp}$	<b>1.0072</b>	<b>1.0075</b>	<b>1.0078</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>	<b>1.0001</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.2 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_l = 0.5$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_2 = 10$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	2.8	5.75	14.39	28.79	43.19	53.0	69.0	84.0	108.0	139.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	2.84	5.83	14.60	29.23	43.85	53.85	70.18	86.01	114.16	155.4
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	38.9	58.2	80.46	132.8	190.0
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	45.4	52.1	58.7	73.1	76.8
$K_{f\_exp}$	<b>1.0145</b>	<b>1.0150</b>	<b>1.0151</b>	<b>1.0153</b>	<b>1.0154</b>	<b>1.0162</b>	<b>1.0171</b>	<b>1.0240</b>	<b>1.0571</b>	<b>1.1180</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.2

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	158.0	173.0	190.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	184.0	207.6	230.0
$L$ , [мкГн]	220.0	271.8	352.7
$Q$	75.13	82.0	96.4
$K_{f\_exp}$	<b>1.1650</b>	<b>1.2000</b>	<b>1.2100</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>.0140</b>	<b>1.0140</b>	<b>1.0140</b>

Розроблено автором



## Продовження додатку Е

Таблиця Е.3 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_l = 0.5$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	2.8	5.75	14.39	28.79	43.19	53.0	69.0	84.0	108.0	139.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	5.32	11.07	29.42	73.15	131.98	188.15	283.03	368.79	534.61	759.06
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	38.9	58.2	80.46	132.8	190.0
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	130.0	129.2	137.08	156.0	157.3
$K_{f\_exp}$	<b>1.9014</b>	<b>1.9252</b>	<b>2.0450</b>	<b>2.5410</b>	<b>3.0560</b>	<b>3.5500</b>	<b>4.1020</b>	<b>4.3904</b>	<b>4.9501</b>	<b>5.4609</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.3

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	158.0	173.0	190.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	921.3	1064.3	1193.2
$L$ , [мкГн]	220.0	271.8	352.7
$Q$	150.0	160.5	185.7
$K_{f\_exp}$	<b>5.8310</b>	<b>6.1521</b>	<b>6.2804</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>	<b>1.7845</b>

Розроблено автором

Результати експериментальних ( $K_{f\_exp\_core}$ ) та теоретичних ( $K_{f\_Ferrera}$ ) розрахунків для обмотки з феромагнітним осердям, виконаної провідником діаметром  $d_2 = 0.75$  мм на частоті  $f_1 = 1$  кГц, представлено у табл. Е.4, на частоті  $f_2 = 10$  кГц – у табл. Е.5, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Е.6.

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.4 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_2 = 0.75$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_1 = 1$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	1.27	2.55	6.39	12.79	19.19	25.6	34.0	38.5	53.0	67.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1.33	2.69	6.8	13.73	21.0	28.55	39.5	46.62	65.1	83.48
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	31.65	47.8	69.4	124.6	193.3
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	6.96	7.6	9.35	12.02	14.54
$K_{f\_exp}$	<b>1.0502</b>	<b>1.0561</b>	<b>1.0653</b>	<b>1.0742</b>	<b>1.0952</b>	<b>1.1153</b>	<b>1.1620</b>	<b>1.2111</b>	<b>1.2283</b>	<b>1.2460</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.4

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	72.0	76.8	89.6
$R_{ACexp}$ , [МОм]	90.24	96.94	113.8
$L$ , [мкГн]	213.6	261.6	318.3
$Q$	14.87	16.95	17.57
$K_{f\_exp}$	<b>1.2534</b>	<b>1.2623</b>	<b>1.2701</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>	<b>1.0008</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.5 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_2 = 0.75$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_2 = 10$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	1.27	2.55	6.39	12.79	19.19	25.6	34.0	38.5	53.0	67.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1.40	2.83	7.15	14.76	22.83	32.08	44.0	51.85	78.61	108.74
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	31.65	47.8	69.4	124.6	193.3
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	62.0	68.2	84.0	99.5	111.7
$K_{f\_exp}$	<b>1.1050</b>	<b>1.1112</b>	<b>1.1203</b>	<b>1.1544</b>	<b>1.1902</b>	<b>1.2535</b>	<b>1.2941</b>	<b>1.3470</b>	<b>1.4833</b>	<b>1.6231</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.5

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	72.0	76.8	89.6
$R_{ACexp}$ , [МОм]	118.02	126.80	150.02
$L$ , [мкГн]	213.6	261.6	318.3
$Q$	113.7	129.6	133.3
$K_{f\_exp}$	<b>1.6392</b>	<b>1.6510</b>	<b>1.6744</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>	<b>1.0740</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.6 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_2 = 0.75$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	1.27	2.55	6.39	12.79	19.19	25.6	34.0	38.5	53.0	67.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	2.66	5.5	22.11	59.02	113.49	205.6	325.05	433.93	718.62	1147.7
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	31.65	47.8	69.4	124.6	193.3
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	96.7	92.4	100.5	108.9	105.8
$K_{f\_exp}$	<b>2.1002</b>	<b>2.1612</b>	<b>3.4604</b>	<b>4.6152</b>	<b>5.9144</b>	<b>8.0312</b>	<b>9.5603</b>	<b>11.271</b>	<b>13.559</b>	<b>17.131</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.6

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	72.0	76.8	89.6
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1272.3	1360.9	1598.8
$L$ , [мкГн]	213.6	261.6	318.3
$Q$	105.5	120.7	125.1
$K_{f\_exp}$	<b>17.671</b>	<b>17.720</b>	<b>17.844</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>	<b>2.9780</b>

Розроблено автором

Результати експериментальних ( $K_{f\_exp\_core}$ ) та теоретичних ( $K_{f\_Ferrera}$ ) розрахунків для обмотки з феромагнітним осердям, виконаної провідником діаметром  $d_3 = 1$  мм на частоті  $f_1 = 1$  кГц, представлено у табл. Е.7, на частоті  $f_2 = 10$  кГц – у табл. Е.8, на частоті  $f_3 = 100$  кГц – у табл. Е.9.

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.7 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_3 = 1$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_1 = 1$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	0.72	1.44	3.6	7.2	10.8	14.39	18.0	21.0	28.2	37.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	0.722	1.445	3.62	7.26	10.92	14.6	18.32	21.46	29.44	42.0
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	34.3	55.5	76.8	120.0	170.1
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	14.8	19.0	22.5	25.6	25.5
$K_{f\_exp}$	<b>1.0031</b>	<b>1.0039</b>	<b>1.0052</b>	<b>1.0091</b>	<b>1.0120</b>	<b>1.0148</b>	<b>1.0181</b>	<b>1.0222</b>	<b>1.0441</b>	<b>1.1354</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.7

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	39.6	43.2	50.4
$R_{ACexp}$ , [МОм]	46.6	51.62	60.74
$L$ , [мкГн]	199.4	222.1	271.3
$Q$	26.8	27.0	28.0
$K_{f\_exp}$	<b>1.1763</b>	<b>1.1950</b>	<b>1.2052</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>	<b>1.0025</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.8 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_3 = 1$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_2 = 10$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	0.72	1.44	3.6	7.2	10.8	14.39	18.0	21.0	28.2	37.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	0.81	1.71	4.48	10.18	16.54	24.19	33.91	44.1	64.78	91.77
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	34.3	55.5	76.8	120.0	170.1
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	89.1	102.8	109.4	116.4	116.46
$K_{f\_exp}$	<b>1.1349</b>	<b>1.1879</b>	<b>1.2461</b>	<b>1.4152</b>	<b>1.5320</b>	<b>1.6811</b>	<b>1.8840</b>	<b>2.1002</b>	<b>2.2974</b>	<b>2.4803</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.8

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	39.6	43.2	50.4
$R_{ACexp}$ , [МОм]	99.47	110.0	130.28
$L$ , [мкГн]	199.4	222.1	271.3
$Q$	125.9	126.8	130.8
$K_{f\_exp}$	<b>2.5121</b>	<b>2.5463</b>	<b>2.5850</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>	<b>1.2220</b>

Розроблено автором

## Продовження додатку Е

Таблиця Е.9 – Результати розрахунків величин  $K_{f\_exp\_core}$ ,  $K_{f\_Ferrera}$ , для одношарової обмотки з феромагнітним осердям діаметром  $D_{coil} = 10$  мм з діаметром провідника  $d_3 = 1$  мм та кількістю витків  $N$  на частоті  $f_3 = 100$  кГц

$N$	$N=1$	$N=2$	$N=5$	$N=10$	$N=15$	$N=20$	$N=25$	$N=30$	$N=40$	$N=50$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	0.72	1.44	3.6	7.2	10.8	14.39	18.0	21.0	28.2	37.0
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1.36	3.88	15.73	67.8	149.58	272.41	451.85	623.53	1040.6	1665.1
$L$ , [мкГн]	-----	-----	-----	-----	-----	34.3	55.5	76.8	120.0	170.1
$Q$	-----	-----	-----	-----	-----	79.1	77.2	77.4	72.5	64.1
$K_{f\_exp}$	<b>1.8902</b>	<b>2.7001</b>	<b>4.3704</b>	<b>9.0000</b>	<b>13.850</b>	<b>18.931</b>	<b>25.103</b>	<b>29.692</b>	<b>36.903</b>	<b>45.002</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>

Розроблено автором

## Продовження Таблиці Е.9

$N$	$N=55$	$N=60$	$N=70$
$R_{DCexp}$ , [МОм]	39.6	43.2	50.4
$R_{ACexp}$ , [МОм]	1856.1	2024.9	2362.5
$L$ , [мкГн]	199.4	222.1	271.3
$Q$	67.5	68.9	72.1
$K_{f\_exp}$	<b>46.871</b>	<b>46.873</b>	<b>46.875</b>
$K_{f\_Ferrera}$	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>	<b>4.0080</b>

Розроблено автором

Коротко проаналізуємо отримані результати. Як і для одношарової обмотки без осердя, у даному випадку так само, при збільшенні кількості витків обмотки  $N$  зростає величина її втрат  $K_{f\_exp\_core}$ . Але, починаючи з кількості витків приблизно  $N = 50$ , спостерігаємо значне сповільнення росту величини  $K_{f\_exp}$ , яка далі мало залежатиме від подальшого збільшення кількості витків. На графіках, представлених у Розділі 3, це відповідає виходу на плато. Зауважимо, що най-

*Продовження додатку Е*

більш яскраво дане явище спостерігаємо на частоті  $f_3 = 100 \text{ кГц}$  та у випадку обмотки із найбільшим діаметром провідника ( $d_3 = 1 \text{ мм}$ ).

Також у всіх розглянутих випадках, теоретично розрахована величина втрат обмотки  $K_{f\_Ferrera}$  не залежить від числа витків обмотки  $N$ , що очевидно, оскільки у методиці [22] знехтувано впливом кількості витків  $N$  на величину втрат.

Як зазначено у Розділі 3, у випадку одношарової обмотки з феромагнітним осердям, з кількістю витків  $N \geq 50$  (а точніше, в діапазоні  $N = 50 \dots 70$ ) відносне відхилення величини  $K_{f\_Ferrera}$  та  $K_{f\_exp}$  майже не змінюється з ростом кількості витків, однак воно набагато більше, порівняно з випадком обмотки без осердя та сягає 1000%, залежно від обраної частоти  $f$  та діаметра провідника обмотки  $d$  (для обмотки без осердя, нагадаємо, ця величина сягала 20.5%). Тому було зроблено висновок, що аналітичну методику розрахунку [22], у тому вигляді, в якому вона є, не можна використовувати для обчислення величини втрат одношарових обмоток  $K_f$ , що мають у своєму складі феромагнітне осердя.



## **ДОДАТОК Є**

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ  
ВЕЛИЧИН  $Kf$ , ОПОРУ ВТРАТ  $R_{ac}$ , ІНДУКТИВНОСТІ  $L$   
ОДНОШАРОВОЇ ОБМОТКИ ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА БЕЗ  
ОСЕРДЯ, ЗАЛЕЖНО ВІД ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
(КІЛЬКОСТІ ВИТКІВ  $N$ , ДІАМЕТРА ПРОВІДНИКА  $d$ , ДІАМЕТРА  
ОБМОТКИ  $D$ ) ТА ЧАСТОТИ  $f$**

Таблиця Є.1 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 20$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.0977	1.1785	1.2681	1.3837
$D_{coil} = 5$ мм	1.0662	1.1165	1.1739	1.2501
$D_{coil} = 7$ мм	1.0523	1.0891	1.1321	1.1906
$D_{coil} = 9$ мм	1.0445	1.0736	1.1084	1.1567
$D_{coil} = 11$ мм	1.0395	1.0636	1.0931	1.1346
$D_{coil} = 13$ мм	1.0361	1.0567	1.0824	1.1192
$D_{coil} = 15$ мм	1.0335	1.0516	1.0745	1.1080

Розроблено автором

Таблиця Є.2 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 20$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	3.8946	1.0453	0.4999	0.3078
$D_{coil} = 5$ мм	6.2390	1.6334	0.7632	0.4581
$D_{coil} = 7$ мм	8.5822	2.2205	1.0258	0.6077
$D_{coil} = 9$ мм	10.925	2.8072	1.2881	0.7569
$D_{coil} = 11$ мм	13.268	3.3939	1.5501	0.9059
$D_{coil} = 13$ мм	15.610	3.9804	1.8121	1.0548
$D_{coil} = 15$ мм	17.953	4.5668	2.0739	1.2037

Розроблено автором

Таблиця Є.3 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$  з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 20$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.0058	0.0050	0.0045	0.0043
$D_{coil} = 5$ мм	0.0107	0.0092	0.0084	0.0078
$D_{coil} = 7$ мм	0.0158	0.0137	0.0124	0.0116
$D_{coil} = 9$ мм	0.0210	0.0182	0.0166	0.0154
$D_{coil} = 11$ мм	0.0259	0.0226	0.0205	0.0190
$D_{coil} = 13$ мм	0.0305	0.0265	0.0239	0.0221
$D_{coil} = 15$ мм	0.0340	0.0295	0.0264	0.0241

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.4 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 60$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.0987	1.1983	1.3777	1.6954
$D_{coil} = 5$ мм	1.0670	1.1325	1.2594	1.4950
$D_{coil} = 7$ мм	1.0531	1.1035	1.2070	1.4065
$D_{coil} = 9$ мм	1.0453	1.0871	1.1774	1.3554
$D_{coil} = 11$ мм	1.0403	1.0766	1.1582	1.3215
$D_{coil} = 13$ мм	1.0368	1.0693	1.1448	1.2980
$D_{coil} = 15$ мм	1.0343	1.0639	1.1347	1.2909

Розроблено автором

Таблиця Є.5 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 60$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	3.8981	1.0629	0.5431	0.3771
$D_{coil} = 5$ мм	6.2440	1.6567	0.8188	0.5478
$D_{coil} = 7$ мм	8.5889	2.2500	1.0937	0.7179
$D_{coil} = 9$ мм	10.933	2.8425	1.3683	0.8870
$D_{coil} = 11$ мм	13.278	3.4353	1.6425	1.0551
$D_{coil} = 13$ мм	15.622	4.0279	1.9164	1.2232
$D_{coil} = 15$ мм	17.966	4.6202	2.1902	1.3915

Розроблено автором

Таблиця Є.6 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 60$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.0058	0.0050	0.0045	0.0042
$D_{coil} = 5$ мм	0.0107	0.0092	0.0083	0.0077
$D_{coil} = 7$ мм	0.0158	0.0137	0.0124	0.0115
$D_{coil} = 9$ мм	0.0210	0.0182	0.0165	0.0153
$D_{coil} = 11$ мм	0.0259	0.0226	0.0204	0.0189
$D_{coil} = 13$ мм	0.0304	0.0265	0.0239	0.0219
$D_{coil} = 15$ мм	0.0340	0.0295	0.0263	0.0239

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.7 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$Kf$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	1.1006	1.2353	1.5421	2.0518
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	1.0687	1.1627	1.3955	1.7998
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	1.0547	1.1311	1.3310	1.6888
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	1.0469	1.1130	1.2943	1.6234
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	1.0419	1.1017	1.2705	1.5799
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	1.0383	1.0938	1.2534	1.5501
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	1.0358	1.0878	1.2409	1.5289

Розроблено автором

Таблиця Є.8 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$Rac, [\text{МОм}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	3.9048	1.0956	0.6079	0.4564
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	6.2539	1.7009	0.9073	0.6595
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	8.6020	2.3063	1.2061	0.8620
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	10.950	2.9104	1.5042	1.0624
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	13.297	3.5152	1.8017	1.2614
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	15.645	4.1199	2.0984	1.4608
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	17.992	4.7238	2.3951	1.6610

Розроблено автором

Таблиця Є.9 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 1$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$L, [\text{мкГн}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	0.0058	0.0050	0.0044	0.0041
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	0.0170	0.0092	0.0082	0.0076
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	0.0158	0.0137	0.0123	0.0113
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	0.0210	0.0182	0.0164	0.0151
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	0.0259	0.0225	0.0203	0.0187
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	0.0304	0.0265	0.0238	0.0217
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	0.0340	0.0294	0.0262	0.0236

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.10 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 20$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.0979	1.1825	1.2937	1.4662
$D_{coil} = 5$ мм	1.0663	1.1199	1.1953	1.3193
$D_{coil} = 7$ мм	1.0524	1.0922	1.1511	1.2515
$D_{coil} = 9$ мм	1.0446	1.0765	1.1261	1.2118
$D_{coil} = 11$ мм	1.0396	1.0664	1.1095	1.1856
$D_{coil} = 13$ мм	1.0362	1.0594	1.0980	1.1663
$D_{coil} = 15$ мм	1.0336	1.0542	1.0892	1.1522

Розроблено автором

Таблиця Є.11 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 20$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	7.7902	2.0976	1.0200	0.6523
$D_{coil} = 5$ мм	12.479	3.2766	1.5544	0.9669
$D_{coil} = 7$ мм	17.166	4.4535	2.0861	1.2776
$D_{coil} = 9$ мм	21.852	5.6297	2.6174	1.5860
$D_{coil} = 11$ мм	26.538	6.8053	3.1468	1.8932
$D_{coil} = 13$ мм	31.224	7.9806	3.6764	2.1983
$D_{coil} = 15$ мм	35.909	9.1557	4.2044	2.5034

Розроблено автором

Таблиця Є.12 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 20$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.0180	0.0151	0.0135	0.0123
$D_{coil} = 5$ мм	0.0342	0.0290	0.0259	0.0237
$D_{coil} = 7$ мм	0.0518	0.0442	0.0396	0.0361
$D_{coil} = 9$ мм	0.0697	0.0597	0.0535	0.0488
$D_{coil} = 11$ мм	0.0869	0.0747	0.0667	0.0606
$D_{coil} = 13$ мм	0.1026	0.0879	0.0780	0.0703
$D_{coil} = 15$ мм	0.1148	0.0975	0.0855	0.0760

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.14 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 60$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1000	1.2313	1.5402	2.0347
$D_{coil} = 5$ мм	1.0681	1.1607	1.3976	1.7887
$D_{coil} = 7$ мм	1.0542	1.1293	1.3310	1.6709
$D_{coil} = 9$ мм	1.0463	1.1116	1.2941	1.5990
$D_{coil} = 11$ мм	1.0413	1.0997	1.2672	1.5502
$D_{coil} = 13$ мм	1.0377	1.0917	1.2492	1.5129
$D_{coil} = 15$ мм	1.0352	1.0855	1.2328	1.4851

Розроблено автором

Таблиця Є.15 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 60$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	7.8050	2.1843	1.2143	0.9053
$D_{coil} = 5$ мм	12.501	3.3961	1.8174	1.3110
$D_{coil} = 7$ мм	17.194	4.6051	2.4122	1.7058
$D_{coil} = 9$ мм	21.887	5.8134	3.0079	2.0929
$D_{coil} = 11$ мм	26.580	7.0179	3.5942	2.4753
$D_{coil} = 13$ мм	31.271	8.2244	4.1827	2.8516
$D_{coil} = 15$ мм	35.963	9.4283	4.7588	3.2269

Розроблено автором

Таблиця Є.16 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 60$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.0180	0.0150	0.0132	0.0117
$D_{coil} = 5$ мм	0.0342	0.0289	0.0256	0.0229
$D_{coil} = 7$ мм	0.0518	0.0441	0.0392	0.0352
$D_{coil} = 9$ мм	0.0696	0.0596	0.0530	0.0477
$D_{coil} = 11$ мм	0.0869	0.0746	0.0662	0.0594
$D_{coil} = 13$ мм	0.1026	0.0878	0.0774	0.0691
$D_{coil} = 15$ мм	0.1148	0.0974	0.0849	0.0746

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.17 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$Kf$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	1.1041	1.3159	1.8316	2.5322
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	1.0718	1.2322	1.6454	2.2223
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	1.0576	1.1948	1.5581	2.0729
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	1.0497	1.1737	1.5107	1.9811
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	1.0445	1.1593	1.4739	1.9190
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	1.0410	1.1495	1.4498	1.8716
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	1.0383	1.1416	1.4269	1.8366

Розроблено автором

Таблиця Є.18 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$Rac, [\text{МОм}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	7.8343	2.3344	1.4440	1.1266
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	12.544	3.6051	2.1396	1.6287
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	17.250	4.8722	2.8237	2.1162
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	21.958	6.1381	3.5113	2.5930
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	26.663	7.3981	4.1804	3.0644
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	31.368	8.6600	4.8544	3.5277
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	36.073	9.9149	5.5082	3.9905

Розроблено автором

Таблиця Є.19 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 2$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$L, [\text{мкГн}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	0.0180	0.0149	0.0129	0.0114
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	0.0342	0.0288	0.0252	0.0224
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	0.0518	0.0440	0.0387	0.0346
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	0.0696	0.0594	0.0524	0.0470
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	0.0869	0.0744	0.0656	0.0586
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	0.1026	0.0876	0.0767	0.0681
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	0.1148	0.0972	0.0841	0.0736

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.20 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 20$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1002	1.2105	1.3855	1.6491
$D_{coil} = 5$ мм	1.0689	1.1529	1.2987	1.5048
$D_{coil} = 7$ мм	1.0551	1.1272	1.2599	1.4358
$D_{coil} = 9$ мм	1.0473	1.1125	1.2376	1.3914
$D_{coil} = 11$ мм	1.0422	1.1028	1.2205	1.3566
$D_{coil} = 13$ мм	1.0387	1.0953	1.2061	1.3272
$D_{coil} = 15$ мм	1.0361	1.0884	1.1896	1.2968

Розроблено автором

Таблиця Є.21 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 20$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	19.517	5.3686	2.7308	1.8343
$D_{coil} = 5$ мм	31.273	8.4330	4.2219	2.7571
$D_{coil} = 7$ мм	43.023	11.491	5.7086	3.6645
$D_{coil} = 9$ мм	54.769	14.545	7.1914	4.5529
$D_{coil} = 11$ мм	66.511	17.594	8.6544	5.4158
$D_{coil} = 13$ мм	78.253	20.628	10.096	6.2538
$D_{coil} = 15$ мм	89.992	23.632	11.480	7.0441

Розроблено автором

Таблиця Є.22 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 20$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.0776	0.0598	0.0500	0.0433
$D_{coil} = 5$ мм	0.1579	0.1238	0.1035	0.0892
$D_{coil} = 7$ мм	0.2469	0.1965	0.1650	0.1423
$D_{coil} = 9$ мм	0.3389	0.2721	0.2287	0.1973
$D_{coil} = 11$ мм	0.4277	0.3447	0.2894	0.2485
$D_{coil} = 13$ мм	0.5077	0.4073	0.3396	0.2889
$D_{coil} = 15$ мм	0.5660	0.4483	0.3684	0.3081

Розроблено автором



## Продовження додатку Є

Таблиця Є.23 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 60$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1188	1.3664	1.8490	2.5233
$D_{coil} = 5$ мм	1.0891	1.3079	1.6924	2.2333
$D_{coil} = 7$ мм	1.0759	1.2816	1.6126	2.0737
$D_{coil} = 9$ мм	1.0682	1.2656	1.5642	1.9624
$D_{coil} = 11$ мм	1.0682	1.2547	1.5233	1.8717
$D_{coil} = 13$ мм	1.0591	1.2441	1.4889	1.8006
$D_{coil} = 15$ мм	1.0563	1.2315	1.4519	1.7407

Розроблено автором

Таблиця Є.24 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 60$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	19.848	6.0597	3.6444	2.8067
$D_{coil} = 5$ мм	31.866	9.5668	5.5020	4.0920
$D_{coil} = 7$ мм	43.872	13.065	7.3064	5.2926
$D_{coil} = 9$ мм	55.862	16.547	9.0891	6.4211
$D_{coil} = 11$ мм	67.821	20.017	10.801	7.4721
$D_{coil} = 13$ мм	79.789	23.431	12.463	8.4845
$D_{coil} = 15$ мм	91.741	26.740	14.012	9.4554

Розроблено автором

Таблиця Є.25 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 60$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.0773	0.0585	0.0478	0.0404
$D_{coil} = 5$ мм	0.1573	0.1213	0.1001	0.0852
$D_{coil} = 7$ мм	0.2462	0.1927	0.1604	0.1374
$D_{coil} = 9$ мм	0.3380	0.2671	0.2230	0.1917
$D_{coil} = 11$ мм	0.4266	0.3385	0.2827	0.2424
$D_{coil} = 13$ мм	0.5064	0.4001	0.3320	0.2824
$D_{coil} = 15$ мм	0.5645	0.4403	0.3602	0.3014

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.26 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$Kf$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	1.1486	1.5400	2.2864	3.1911
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	1.1211	1.4587	2.0658	2.8278
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	1.1087	1.4214	1.9469	2.6274
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	1.1013	1.3981	1.8745	2.4821
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	1.0957	1.3821	1.8122	2.3660
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	1.0921	1.3662	1.7614	2.2751
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	1.0890	1.3484	1.7093	2.2003

Розроблено автором

Таблиця Є.27 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$Rac, [\text{МОм}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	20.375	6.8298	4.5066	3.5495
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	32.801	10.670	6.7157	5.1812
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	45.211	14.490	8.8211	6.7056
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	57.597	18.280	10.892	8.1218
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	69.926	22.050	12.849	9.4454
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	82.271	25.730	14.744	10.720
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	94.583	29.278	16.495	11.952

Розроблено автором

Таблиця Є.28 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 5$ , частота  $f = 100 \text{ кГц}$

$L, [\text{мкГн}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	0.0770	0.0576	0.0465	0.0391
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	0.1567	0.1198	0.0983	0.0834
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	0.2452	0.1908	0.1582	0.1351
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	0.3367	0.2646	0.2205	0.1891
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	0.4252	0.3355	0.2799	0.2395
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	0.5047	0.3966	0.3289	0.2793
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	0.5626	0.4365	0.3570	0.2980

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.29 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 20$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1049	1.2331	1.4262	1.7319
$D_{coil} = 5$ мм	1.0760	1.1914	1.3508	1.5840
$D_{coil} = 7$ мм	1.0635	1.1779	1.3223	1.5090
$D_{coil} = 9$ мм	1.0563	1.1708	1.3066	1.4557
$D_{coil} = 11$ мм	1.0516	1.1648	1.2913	1.4105
$D_{coil} = 13$ мм	1.0481	1.1582	1.2730	1.3669
$D_{coil} = 15$ мм	1.0454	1.1468	1.2465	1.3263

Розроблено автором

Таблиця Є.30 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 20$  кГц

$Rac$ , [мОм]	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	39.199	10.937	5.6222	3.8527
$D_{coil} = 5$ мм	62.964	17.429	8.7825	5.8044
$D_{coil} = 7$ мм	86.731	24.015	11.982	7.7025
$D_{coil} = 9$ мм	110.48	30.615	15.184	9.5266
$D_{coil} = 11$ мм	134.22	37.166	18.313	11.261
$D_{coil} = 13$ мм	157.91	43.628	21.312	12.882
$D_{coil} = 15$ мм	181.59	49.803	24.059	14.409

Розроблено автором

Таблиця Є.31 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 20$  кГц

$L$ , [мкГн]	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.2084	0.1485	0.1189	0.1003
$D_{coil} = 5$ мм	0.4517	0.3251	0.2581	0.2154
$D_{coil} = 7$ мм	0.7330	0.5351	0.4249	0.3533
$D_{coil} = 9$ мм	1.0284	0.7580	0.6015	0.4988
$D_{coil} = 11$ мм	1.3143	0.9725	0.7692	0.6344
$D_{coil} = 13$ мм	1.5647	1.1514	0.9034	0.7384
$D_{coil} = 15$ мм	1.7413	1.2588	0.9730	0.7821

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.32 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 60$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1468	1.4319	2.0185	2.7920
$D_{coil} = 5$ мм	1.1312	1.3900	1.8530	2.4797
$D_{coil} = 7$ мм	1.1257	1.3774	1.7585	2.2800
$D_{coil} = 9$ мм	1.1221	1.3698	1.6915	2.1187
$D_{coil} = 11$ мм	1.1197	1.3604	1.6299	1.9810
$D_{coil} = 13$ мм	1.1160	1.3492	1.5730	1.8644
$D_{coil} = 15$ мм	1.1130	1.3264	1.5162	1.7862

Розроблено автором

Таблиця Є.33 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 60$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	40.689	12.701	7.9573	6.7920
$D_{coil} = 5$ мм	66.193	20.334	12.048	9.0870
$D_{coil} = 7$ мм	91.803	28.083	15.935	11.638
$D_{coil} = 9$ мм	117.37	35.817	19.658	13.865
$D_{coil} = 11$ мм	142.91	43.407	23.114	15.817
$D_{coil} = 13$ мм	168.15	50.821	26.334	17.570
$D_{coil} = 15$ мм	193.34	57.601	29.264	19.405

Розроблено автором

Таблиця Є.34 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 60$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.2062	0.1447	0.1134	0.0929
$D_{coil} = 5$ мм	0.4464	0.3169	0.2496	0.2052
$D_{coil} = 7$ мм	0.7246	0.5219	0.4135	0.3413
$D_{coil} = 9$ мм	1.0169	0.7395	0.5876	0.4858
$D_{coil} = 11$ мм	1.3000	0.9490	0.7531	0.6211
$D_{coil} = 13$ мм	1.5479	1.1234	0.8858	0.7253
$D_{coil} = 15$ мм	1.7223	1.2283	0.9547	0.7688

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.35 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 100$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1951	1.6601	2.5539	3.5537
$D_{coil} = 5$ мм	1.1899	1.5860	2.3154	3.1679
$D_{coil} = 7$ мм	1.1904	1.5534	2.1656	2.9156
$D_{coil} = 9$ мм	1.1904	1.5311	2.0562	2.7066
$D_{coil} = 11$ мм	1.1911	1.5089	1.9576	2.5294
$D_{coil} = 13$ мм	1.1874	1.4875	1.8702	2.3810
$D_{coil} = 15$ мм	1.1846	1.4540	1.7918	2.2856

Розроблено автором

Таблиця Є.36 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 100$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	42.400	14.725	10.068	7.9056
$D_{coil} = 5$ мм	69.626	23.202	15.055	11.609
$D_{coil} = 7$ мм	97.082	31.673	19.624	14.882
$D_{coil} = 9$ мм	124.51	40.037	23.896	17.713
$D_{coil} = 11$ мм	152.02	48.147	27.761	20.195
$D_{coil} = 13$ мм	178.91	56.031	31.310	22.438
$D_{coil} = 15$ мм	205.77	63.143	34.584	24.831

Розроблено автором

Таблиця Є.37 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 10$ , частота  $f = 100$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.2041	0.1424	0.1100	0.0897
$D_{coil} = 5$ мм	0.4417	0.3131	0.2449	0.2007
$D_{coil} = 7$ мм	0.7169	0.5166	0.4080	0.3358
$D_{coil} = 9$ мм	1.0065	0.7328	0.5815	0.4798
$D_{coil} = 11$ мм	1.2868	0.9410	0.7467	0.6147
$D_{coil} = 13$ мм	1.5323	1.1143	0.8793	0.7187
$D_{coil} = 15$ мм	1.7043	1.2184	0.9481	0.7617

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.38 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 20$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1077	1.2365	1.4347	1.7599
$D_{coil} = 5$ мм	1.0824	1.2001	1.3578	1.6044
$D_{coil} = 7$ мм	1.0725	1.1933	1.3284	1.5199
$D_{coil} = 9$ мм	1.0670	1.1917	1.3118	1.4563
$D_{coil} = 11$ мм	1.0632	1.1894	1.2950	1.4010
$D_{coil} = 13$ мм	1.0603	1.1822	1.2737	1.3510
$D_{coil} = 15$ мм	1.0567	1.1674	1.2455	1.3090

Розроблено автором

Таблиця Є.39 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 20$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	58.947	16.451	8.4833	5.8726
$D_{coil} = 5$ мм	95.004	26.335	13.242	8.8191
$D_{coil} = 7$ мм	131.20	36.496	18.057	11.637
$D_{coil} = 9$ мм	167.41	46.741	22.867	14.296
$D_{coil} = 11$ мм	203.55	56.927	27.547	16.779
$D_{coil} = 13$ мм	239.63	66.793	31.985	19.097
$D_{coil} = 15$ мм	275.34	76.046	36.060	21.332

Розроблено автором

Таблиця Є.40 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 20$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.3527	0.2418	0.1905	0.1589
$D_{coil} = 5$ мм	0.7932	0.5436	0.4222	0.3473
$D_{coil} = 7$ мм	1.3183	0.9113	0.7052	0.5765
$D_{coil} = 9$ мм	1.8770	1.3067	1.0082	0.8204
$D_{coil} = 11$ мм	2.4201	1.6869	1.2956	1.0476
$D_{coil} = 13$ мм	2.8917	2.0012	1.5235	1.2201
$D_{coil} = 15$ мм	3.2016	2.1809	1.6355	1.2886

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.41 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 60$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1561	1.4491	2.0884	2.9018
$D_{coil} = 5$ мм	1.1525	1.4085	1.9138	2.5773
$D_{coil} = 7$ мм	1.1565	1.3995	1.8026	2.3491
$D_{coil} = 9$ мм	1.1600	1.3928	1.7169	2.1540
$D_{coil} = 11$ мм	1.1610	1.3842	1.6366	1.9817
$D_{coil} = 13$ мм	1.1607	1.3665	1.5623	1.8417
$D_{coil} = 15$ мм	1.1539	1.3382	1.5004	1.7573

Розроблено автором

Таблиця Є.42 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 60$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	61.528	19.279	12.349	9.6830
$D_{coil} = 5$ мм	101.16	30.907	18.665	14.167
$D_{coil} = 7$ мм	141.47	42.801	24.502	17.986
$D_{coil} = 9$ мм	181.99	54.627	29.930	21.145
$D_{coil} = 11$ мм	222.28	66.249	34.814	23.733
$D_{coil} = 13$ мм	262.32	77.211	39.233	26.035
$D_{coil} = 15$ мм	300.66	87.170	43.439	28.638

Розроблено автором

Таблиця Є.43 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 60$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.3478	0.2362	0.1816	0.1467
$D_{coil} = 5$ мм	0.7795	0.5312	0.4087	0.3305
$D_{coil} = 7$ мм	1.2944	0.8908	0.6877	0.5571
$D_{coil} = 9$ мм	1.8424	1.2776	0.9873	0.8003
$D_{coil} = 11$ мм	2.3755	1.6496	1.2724	1.0282
$D_{coil} = 13$ мм	2.8377	1.9573	1.4990	1.2019
$D_{coil} = 15$ мм	3.1420	2.1335	1.6104	1.2706

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.44 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 100$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.2053	1.7063	2.6697	3.7025
$D_{coil} = 5$ мм	1.2139	1.6290	2.4204	3.3053
$D_{coil} = 7$ мм	1.2259	1.5949	2.2452	3.0179
$D_{coil} = 9$ мм	1.2350	1.5652	2.1043	2.7683
$D_{coil} = 11$ мм	1.2393	1.5376	1.9743	2.5464
$D_{coil} = 13$ мм	1.2408	1.5028	1.8591	2.3681
$D_{coil} = 15$ мм	1.2320	1.4612	1.7742	2.2650

Розроблено автором

Таблиця Є.45 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 100$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	64.144	22.702	15.787	12.355
$D_{coil} = 5$ мм	106.55	35.746	23.605	18.168
$D_{coil} = 7$ мм	149.97	48.777	30.518	23.107
$D_{coil} = 9$ мм	193.76	61.391	36.683	27.174
$D_{coil} = 11$ мм	237.25	73.594	41.998	30.497
$D_{coil} = 13$ мм	280.42	84.910	46.686	33.476
$D_{coil} = 15$ мм	321.02	95.183	51.365	36.910

Розроблено автором

Таблиця Є.46 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 15$ , частота  $f = 100$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.3443	0.2324	0.1759	0.1415
$D_{coil} = 5$ мм	0.7708	0.5252	0.4009	0.3232
$D_{coil} = 7$ мм	1.2796	0.8826	0.6785	0.5484
$D_{coil} = 9$ мм	1.8213	1.2674	0.9776	0.7908
$D_{coil} = 11$ мм	2.3482	1.6376	1.2627	1.0184
$D_{coil} = 13$ мм	2.8046	1.9439	1.4896	1.1921
$D_{coil} = 15$ мм	3.1049	2.1193	1.6012	1.2602

Розроблено автором



## Продовження додатку Є

Таблиця Є.47 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 20$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1088	1.2354	1.4364	1.7729
$D_{coil} = 5$ мм	1.0864	1.1994	1.3560	1.6115
$D_{coil} = 7$ мм	1.0794	1.1940	1.3234	1.5194
$D_{coil} = 9$ мм	1.0763	1.1943	1.3036	1.4483
$D_{coil} = 11$ мм	1.0738	1.1929	1.2841	1.3864
$D_{coil} = 13$ мм	1.0712	1.1857	1.2608	1.3323
$D_{coil} = 15$ мм	1.0669	1.1697	1.2329	1.2904

Розроблено автором

Таблиця Є.48 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 20$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	78.677	21.915	11.325	7.8882
$D_{coil} = 5$ мм	127.14	35.093	17.633	11.811
$D_{coil} = 7$ мм	176.06	48.689	23.985	15.511
$D_{coil} = 9$ мм	225.14	62.458	30.299	18.956
$D_{coil} = 11$ мм	274.11	76.128	36.421	22.139
$D_{coil} = 13$ мм	322.78	89.324	42.213	25.111
$D_{coil} = 15$ мм	370.65	101.59	47.593	28.038

Розроблено автором

Таблиця Є.49 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 20$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.5019	0.3367	0.2629	0.2179
$D_{coil} = 5$ мм	1.1550	0.7687	0.5895	0.4805
$D_{coil} = 7$ мм	1.9504	1.3027	0.9929	0.8028
$D_{coil} = 9$ мм	2.8064	1.8812	1.4272	1.1472
$D_{coil} = 11$ мм	3.6409	2.4389	1.8396	1.4681
$D_{coil} = 13$ мм	4.3537	2.8958	2.1649	1.7100
$D_{coil} = 15$ мм	4.8131	3.1507	2.3193	1.8030

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.50 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 60$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1571	1.4540	2.1252	2.9594
$D_{coil} = 5$ мм	1.1593	1.4106	1.9424	2.6259
$D_{coil} = 7$ мм	1.1700	1.3987	1.8185	2.3776
$D_{coil} = 9$ мм	1.1788	1.3905	1.7159	2.1607
$D_{coil} = 11$ мм	1.1834	1.3788	1.6204	1.9669
$D_{coil} = 13$ мм	1.1834	1.3584	1.5350	1.8117
$D_{coil} = 15$ мм	1.1751	1.3270	1.4702	1.7252

Розроблено автором

Таблиця Є.51 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 60$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	82.108	25.794	16.755	13.167
$D_{coil} = 5$ мм	135.67	41.273	25.259	19.245
$D_{coil} = 7$ мм	190.84	57.036	32.957	24.272
$D_{coil} = 9$ мм	246.59	72.718	39.882	28.280
$D_{coil} = 11$ мм	302.08	87.991	45.958	31.408
$D_{coil} = 13$ мм	356.60	102.33	51.395	34.148
$D_{coil} = 15$ мм	408.24	115.26	56.753	37.484

Розроблено автором

Таблиця Є.52 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 60$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.4947	0.3295	0.2506	0.2009
$D_{coil} = 5$ мм	1.1328	0.7529	0.5711	0.4571
$D_{coil} = 7$ мм	1.9086	1.2766	0.9696	0.7762
$D_{coil} = 9$ мм	2.7444	1.8442	1.4003	1.1202
$D_{coil} = 11$ мм	3.5598	2.3914	1.8105	1.4429
$D_{coil} = 13$ мм	4.2546	2.8402	2.1351	1.6875
$D_{coil} = 15$ мм	4.7041	3.0912	2.2892	1.7812

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.53 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 100$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.2049	1.7298	2.7331	3.7806
$D_{coil} = 5$ мм	1.2191	1.6474	2.4741	3.3746
$D_{coil} = 7$ мм	1.2384	1.6046	2.2804	3.0651
$D_{coil} = 9$ мм	1.2531	1.5681	2.1152	2.7867
$D_{coil} = 11$ мм	1.2611	1.5321	1.9602	2.5379
$D_{coil} = 13$ мм	1.2625	1.4899	1.8269	2.3399
$D_{coil} = 15$ мм	1.2522	1.4426	1.7366	2.2353

Розроблено автором

Таблиця Є.54 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 100$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	85.495	30.686	21.548	16.821
$D_{coil} = 5$ мм	142.68	48.200	32.173	24.732
$D_{coil} = 7$ мм	201.99	65.433	41.329	31.291
$D_{coil} = 9$ мм	262.13	82.005	49.164	36.474
$D_{coil} = 11$ мм	321.91	97.771	55.597	40.525
$D_{coil} = 13$ мм	380.45	112.24	61.170	44.102
$D_{coil} = 15$ мм	435.02	125.29	67.035	48.569

Розроблено автором

Таблиця Є.55 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 20$ , частота  $f = 100$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.4902	0.3244	0.2426	0.1937
$D_{coil} = 5$ мм	1.1212	0.7449	0.5600	0.4471
$D_{coil} = 7$ мм	1.8882	1.2658	0.9568	0.7642
$D_{coil} = 9$ мм	2.7146	1.8310	1.3870	1.1073
$D_{coil} = 11$ мм	3.5195	2.3762	1.7977	1.4299
$D_{coil} = 13$ мм	4.2071	2.8236	2.1233	1.6747
$D_{coil} = 15$ мм	4.6511	3.0740	2.2779	1.7678

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.56 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 20$  кГц

$Kf$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.1090	1.2334	1.4363	1.7796
$D_{coil} = 5$ мм	1.0884	1.1961	1.3523	1.6157
$D_{coil} = 7$ мм	1.0839	1.1903	1.3168	1.5232
$D_{coil} = 9$ мм	1.0827	1.1907	1.2940	1.4530
$D_{coil} = 11$ мм	1.0812	1.1894	1.2726	1.3912
$D_{coil} = 13$ мм	1.0800	1.1822	1.2481	1.3355
$D_{coil} = 15$ мм	1.0788	1.1661	1.2208	1.2916

Розроблено автором

Таблиця Є.57 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 20$  кГц

$Rac, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	98.369	27.350	14.155	9.8972
$D_{coil} = 5$ мм	159.23	43.744	21.981	14.802
$D_{coil} = 7$ мм	220.98	60.673	29.831	19.438
$D_{coil} = 9$ мм	283.11	77.835	37.597	23.772
$D_{coil} = 11$ мм	342.70	94.876	45.118	27.769
$D_{coil} = 13$ мм	403.90	111.32	52.236	31.464
$D_{coil} = 15$ мм	440.50	126.60	58.906	35.080

Розроблено автором

Таблиця Є.58 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 20$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.6533	0.4325	0.3356	0.2765
$D_{coil} = 5$ мм	1.5265	0.9971	0.7582	0.6120
$D_{coil} = 7$ мм	2.6059	1.7018	1.2834	1.0243
$D_{coil} = 9$ мм	3.7784	2.4689	1.8509	1.4643
$D_{coil} = 11$ мм	4.9509	3.2089	2.3899	1.8738
$D_{coil} = 13$ мм	6.1232	3.8133	2.8131	2.1828
$D_{coil} = 15$ мм	7.2959	4.1429	3.0109	2.3011

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.59 – Розрахунок  $Kf$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 60 \text{ кГц}$

$Kf$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	1.1556	1.4563	2.1478	2.9905
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	1.1597	1.4089	1.9591	2.6509
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	1.1741	1.3933	1.8259	2.4003
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	1.1862	1.3817	1.7117	2.1802
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	1.1983	1.3668	1.6060	1.9827
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	1.2104	1.3450	1.5127	1.8240
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	1.2225	1.3126	1.4480	1.7331

Розроблено автором

Таблиця Є.60 – Розрахунок  $Rac$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 60 \text{ кГц}$

$Rac, [\text{МОм}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	102.49	32.292	21.167	16.632
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	169.66	51.529	31.844	24.286
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	239.48	71.018	41.364	30.630
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	310.16	90.324	49.732	35.669
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	380.10	109.03	56.938	39.576
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	483.30	126.66	63.311	42.975
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	528.00	142.51	69.868	47.071

Розроблено автором

Таблиця Є.61 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 60 \text{ кГц}$

$L, [\text{мкГн}]$	$d = 0.25 \text{ мм}$	$d = 0.5 \text{ мм}$	$d = 0.75 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$
$D_{coil} = 3 \text{ мм}$	0.6444	0.4239	0.3200	0.2548
$D_{coil} = 5 \text{ мм}$	1.4976	0.9786	0.7350	0.5822
$D_{coil} = 7 \text{ мм}$	2.5493	1.6713	1.2545	0.9903
$D_{coil} = 9 \text{ мм}$	3.6909	2.4257	1.8183	1.4298
$D_{coil} = 11 \text{ мм}$	4.8377	3.1536	2.3556	1.8417
$D_{coil} = 13 \text{ мм}$	5.9743	3.7485	2.7788	2.1543
$D_{coil} = 15 \text{ мм}$	7.1159	4.0738	2.9768	2.2737

Розроблено автором

## Продовження додатку Є

Таблиця Є.62 – Розрахунок  $K_f$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 100$  кГц

$K_f$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	1.2015	1.7432	2.7721	3.8223
$D_{coil} = 5$ мм	1.2172	1.6556	2.5074	3.4093
$D_{coil} = 7$ мм	1.2401	1.6060	2.3009	3.0969
$D_{coil} = 9$ мм	1.2579	1.5624	2.1173	2.8166
$D_{coil} = 11$ мм	1.2693	1.5184	1.9469	2.5632
$D_{coil} = 13$ мм	1.2807	1.4725	1.8017	2.3611
$D_{coil} = 15$ мм	1.2921	1.4226	1.7102	2.2503

Розроблено автором

Таблиця Є.63 – Розрахунок  $R_{ac}$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 100$  кГц

$R_{ac}, [мОм]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	106.57	38.655	27.320	21.258
$D_{coil} = 5$ мм	178.06	60.552	40.757	31.233
$D_{coil} = 7$ мм	252.84	81.861	52.124	39.520
$D_{coil} = 9$ мм	328.92	102.14	61.515	46.082
$D_{coil} = 11$ мм	405.01	121.12	69.023	51.163
$D_{coil} = 13$ мм	479.20	138.66	75.407	55.627
$D_{coil} = 15$ мм	552.40	154.45	82.522	61.118

Розроблено автором

Таблиця Є.64 – Розрахунок  $L$  для одношарової обмотки діаметром  $D_{coil}$ , з провідника діаметром  $d$ , кількість витків  $N = 25$ , частота  $f = 100$  кГц

$L, [мкГн]$	$d = 0.25$ мм	$d = 0.5$ мм	$d = 0.75$ мм	$d = 1$ мм
$D_{coil} = 3$ мм	0.6391	0.4173	0.3096	0.2457
$D_{coil} = 5$ мм	1.4835	0.9683	0.7206	0.5693
$D_{coil} = 7$ мм	2.5241	1.6578	1.2380	0.9749
$D_{coil} = 9$ мм	3.6536	2.4095	1.8013	1.4133
$D_{coil} = 11$ мм	4.7575	3.1354	2.3397	1.8251
$D_{coil} = 13$ мм	5.8614	3.7289	2.7646	2.1379
$D_{coil} = 15$ мм	6.9653	4.0537	2.9635	2.2566

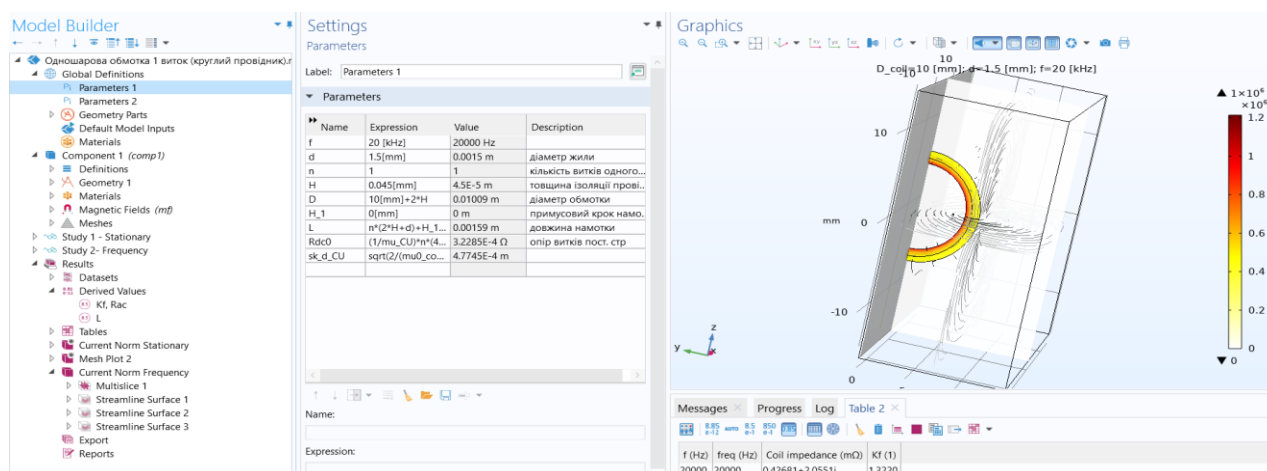
Розроблено автором

\*Примітка. Усі наведені у додатку результати машинного експерименту здійснювалися за однакових розмірів області симуляції – блок з розмірами:  $W=35$  мм,  $D=20$  мм,  $H=20$  мм.

## **ДОДАТОК Ж**

**3D МОДЕЛІ ОДНОШАРОВИХ ОБМОТОК ІНДУКТИВНИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ, ВИКОНАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ КІНЦЕВО-  
ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ**

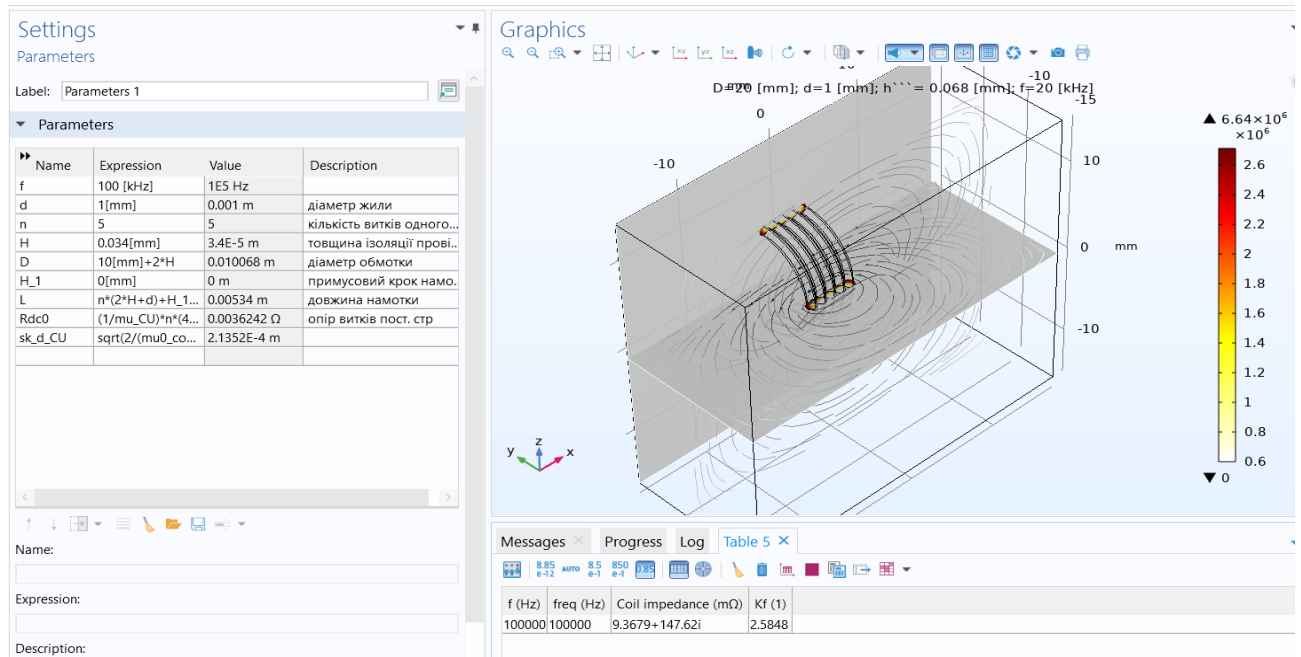
Однією зі важливих складових експериментальної частини досліджень, проведених у дисертації, є машинний експеримент (моделювання) досліджуваних обмоток індуктивних елементів, виконаного у середовищі кінцево-елементного аналізу (FEM аналізу) *COMSOL Multiphysics 5.6*. Вибір даного способу виконання експериментальної частини був зумовленим двома факторами: *перший* – гнучкість машинної моделі, можливість проводити моделювання в широкому діапазоні параметрів обмотки та робочих частот з одночасною візуалізацією розподілу струму та розрахунку зосереджених параметрів (опору втрат та індуктивності), чого позбавлені натурні експериментальні вимірювання; *другий* – обмеженість функцій наявного пристрою для натурних вимірювань – лише дві фіксовані частоти вимірювання в ультразвуковому діапазоні та можливість проводити вимірювання обмоток від  $N = 20$  витків (за меншого числа витків вимірювані параметри обмотки наближалися до рівня похибки приладу, тому точність результатів у такому випадку різко знижувалася). Створення та налаштування моделей одношарових обмоток у вказаному середовищі є досить відповідальним та ресурсозатратним процесом, оскільки від коректності та точності результатів залежать основні результати дисертації. Тому приділено значну увагу перевірці її адекватності, що було виконано у *Розділі 2* та *Розділі 3* перед кожним етапом досліджень. На рис. Ж.1 а, б, в представлено результати побудови моделі, візуалізації розподілу струму та розрахунку зосереджених параметрів.



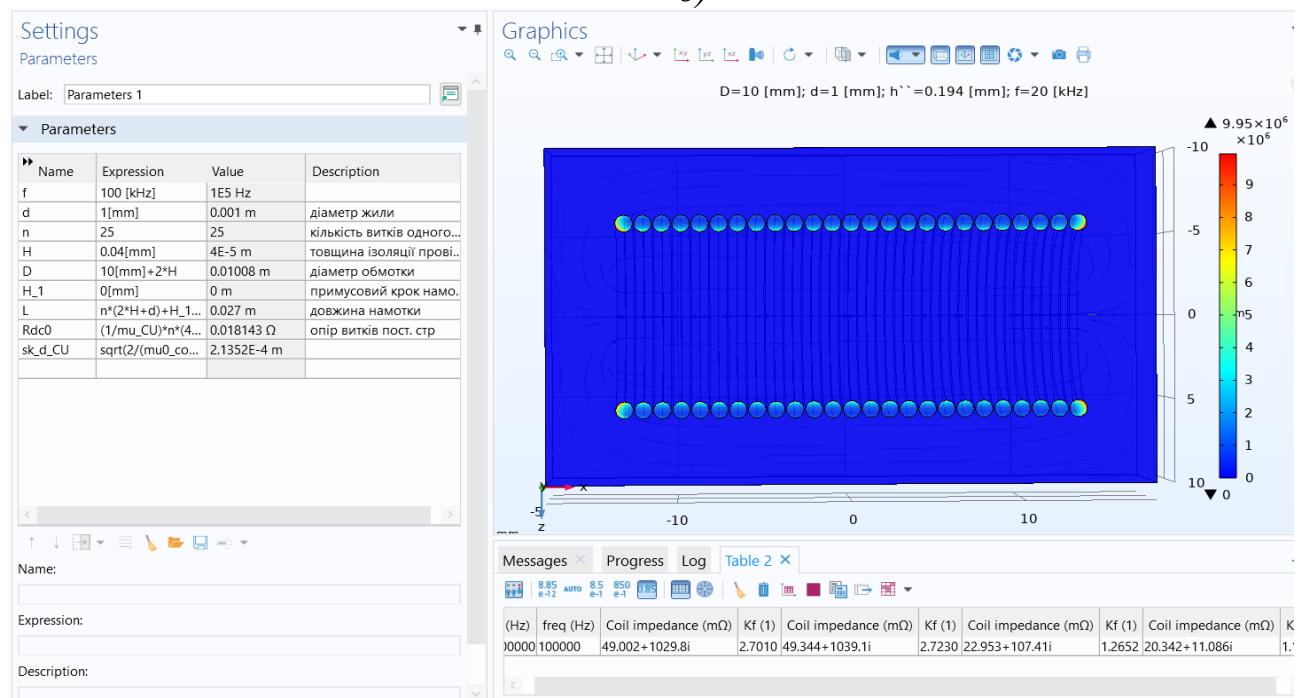
а)



## Продовження додатку Ж



б)



в)

Рисунок Ж.1 – Моделювання обмоток у середовищі кінцево-елементного аналізу – загальний вигляд моделі, задання геометричних параметрів, ілюстрація розподілу струму у витках та магнітного поля, розрахунок зосереджених параметрів на вказаних частотах для:

а) одиночного круглого витка; б) обмотки з  $N=5$  витків; в) обмотки з

$N=25$  витків

(розроблено автором)

### **ДОДАТОК 3**

**КОЕФІЦІЄНТИ АПРОКСИМАЦІЇ ДЛЯ КРИВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ**

**$K_f = f(d/D_{coil})$  ТА  $K_f = f(N)$  ДЛЯ НАЙБІЛЬШ ПОШИРЕНИХ  
ПРАКТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ОДНОШАРОВИХ ОБМОТОК**

У ході досліджень, виконаних у Розділі 4, виявлено, що у випадку багатовиткової одношарової обмотки, величина  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  найбільш точно буде описуватися поліномом четвертого ступеня:

$$K_{prox\_multiturn\_N}(N) = p_1 \cdot N^4 + p_2 \cdot N^3 + p_3 \cdot N^2 + p_4 \cdot N + p_5.$$

У подальшому виконано апроксимацію та розрахунок апроксимуючих коефіцієнтів для ряду геометричних параметрів одновиткової обмотки – діаметрів провідників  $d$ , діаметрів витків  $D_{coil}$  кількості витків  $N$  на частотах  $f$ .

Результати розрахунків апроксимуючих коефіцієнтів для кривої залежності  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  у випадку обмотки діаметром  $D_{coil1} = 3$  мм представлено в табл. 3.1, для обмотки діаметром  $D_{coil2} = 5$  мм – у табл. 3.2, для обмотки діаметром  $D_{coil3} = 7$  мм – в табл. 3.3, для обмотки діаметром  $D_{coil4} = 9$  мм – у табл. 3.4, для обмотки діаметром  $D_{coil5} = 11$  мм – у табл. 3.5, для обмотки діаметром  $D_{coil6} = 13$  мм – у табл. 3.6, для обмотки діаметром  $D_{coil7} = 15$  мм – у табл. 3.7.

Таблиця 3.1 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  кривої  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметрів провідників  $d$ , діаметра витка  $D_{coil1} = 3$  мм, на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25$ мм	$f = 20$ кГц	$1.614 \cdot 10^{-7}$	$-9.093 \cdot 10^{-6}$	$0.142 \cdot 10^{-6}$	$5.43 \cdot 10^{-5}$	1.097
	$f = 60$ кГц	$1.032 \cdot 10^{-6}$	$-5.171 \cdot 10^{-5}$	$0.624 \cdot 10^{-3}$	$3.067 \cdot 10^{-3}$	1.094
	$f = 100$ кГц	$1.225 \cdot 10^{-6}$	$-5.099 \cdot 10^{-5}$	$0.177 \cdot 10^{-3}$	$13.02 \cdot 10^{-3}$	1.083
$d_2 = 0.5$ мм	$f = 20$ кГц	$2.505 \cdot 10^{-7}$	$-2.098 \cdot 10^{-6}$	$-0.43 \cdot 10^{-3}$	$10.9 \cdot 10^{-3}$	1.166
	$f = 60$ кГц	$-2.962 \cdot 10^{-6}$	$0.217 \cdot 10^{-3}$	$-5.9 \cdot 10^{-3}$	0.0711	1.124
	$f = 100$ кГц	$-6.583 \cdot 10^{-6}$	$0.449 \cdot 10^{-3}$	-0.0111	0.1308	1.108
$d_3 = 0.75$ мм	$f = 20$ кГц	$-2.443 \cdot 10^{-6}$	$0.173 \cdot 10^{-3}$	-0.0045	0.0514	1.216
	$f = 60$ кГц	$-1.245 \cdot 10^{-5}$	$0.813 \cdot 10^{-3}$	-0.0191	0.2087	1.191
	$f = 100$ кГц	$-2.095 \cdot 10^{-5}$	$1.301 \cdot 10^{-3}$	-0.0310	0.3310	1.258
$d_4 = 1$ мм	$f = 20$ кГц	$-7.291 \cdot 10^{-6}$	$0.479 \cdot 10^{-3}$	-0.0114	0.1201	1.273
	$f = 60$ кГц	$-2.539 \cdot 10^{-5}$	$1.616 \cdot 10^{-3}$	-0.0371	0.3770	1.379
	$f = 100$ кГц	$-3.582 \cdot 10^{-5}$	$2.26 \cdot 10^{-3}$	-0.0512	0.5226	1.619

Розроблено автором

## Продовження додатку 3

Таблиця 3.2 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  кривої  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметрів провідників  $d$ , діаметра витка  $D_{coil2} = 5 \text{ мм}$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$1.923 \cdot 10^{-7}$	$-1.243 \cdot 10^{-5}$	$0.2422 \cdot 10^{-3}$	$-0.409 \cdot 10^{-3}$	1.066
	$f = 60 \text{ кГц}$	$1.628 \cdot 10^{-6}$	$-8.91 \cdot 10^{-5}$	$1.351 \cdot 10^{-3}$	$0.295 \cdot 10^{-3}$	1.064
	$f = 100 \text{ кГц}$	$2.301 \cdot 10^{-6}$	$-0.1138 \cdot 10^{-3}$	$1.293 \cdot 10^{-3}$	$9.373 \cdot 10^{-3}$	1.054
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$1.132 \cdot 10^{-6}$	$-5.016 \cdot 10^{-5}$	$0.3323 \cdot 10^{-3}$	$9.032 \cdot 10^{-3}$	1.105
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.892 \cdot 10^{-6}$	$0.1629 \cdot 10^{-3}$	$-5.149 \cdot 10^{-3}$	0.0705	1.056
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-5.262 \cdot 10^{-6}$	$0.3775 \cdot 10^{-3}$	-0.0101	0.1238	1.039
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-1.697 \cdot 10^{-6}$	$0.1372 \cdot 10^{-3}$	$-4.079 \cdot 10^{-3}$	0.052	1.118
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.054 \cdot 10^{-5}$	$0.702 \cdot 10^{-3}$	-0.017	0.1896	1.085
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-1.775 \cdot 10^{-5}$	$1.155 \cdot 10^{-3}$	-0.027	0.2957	1.139
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-6.425 \cdot 10^{-6}$	$0.434 \cdot 10^{-3}$	-0.0106	0.1146	1.141
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-2.182 \cdot 10^{-5}$	$1.397 \cdot 10^{-3}$	-0.0323	0.3345	1.211
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-3.111 \cdot 10^{-5}$	$1.982 \cdot 10^{-3}$	-0.0456	0.4675	1.409

Розроблено автором

Таблиця 3.3 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  кривої  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметрів провідників  $d$ , діаметра витка  $D_{coil3} = 7 \text{ мм}$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$1.687 \cdot 10^{-7}$	$-1.211 \cdot 10^{-5}$	$0.2702 \cdot 10^{-3}$	$-0.569 \cdot 10^{-3}$	1.053
	$f = 60 \text{ кГц}$	$1.819 \cdot 10^{-6}$	$-0.1038 \cdot 10^{-3}$	$1.705 \cdot 10^{-3}$	$-1.261 \cdot 10^{-3}$	1.052
	$f = 100 \text{ кГц}$	$2.779 \cdot 10^{-6}$	$-0.1445 \cdot 10^{-3}$	$1.915 \cdot 10^{-3}$	$6.963 \cdot 10^{-3}$	1.042
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$1.821 \cdot 10^{-6}$	$-8.981 \cdot 10^{-5}$	$1.025 \cdot 10^{-3}$	$6.515 \cdot 10^{-3}$	1.079
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-8.947 \cdot 10^{-7}$	$0.1088 \cdot 10^{-3}$	$-4.291 \cdot 10^{-3}$	0.0678	1.028
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-4.172 \cdot 10^{-6}$	$0.3182 \cdot 10^{-3}$	$-9.119 \cdot 10^{-3}$	0.1182	1.011
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-9.148 \cdot 10^{-7}$	$9.734 \cdot 10^{-5}$	$-3.51 \cdot 10^{-3}$	0.0508	1.076
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-9.583 \cdot 10^{-6}$	$0.648 \cdot 10^{-3}$	-0.01611	0.1783	1.041
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-1.639 \cdot 10^{-5}$	$1.073 \cdot 10^{-3}$	-0.0256	0.2741	1.092
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-5.737 \cdot 10^{-6}$	$0.405 \cdot 10^{-3}$	-0.0101	0.1103	1.082
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.976 \cdot 10^{-5}$	$1.279 \cdot 10^{-3}$	-0.0298	0.3052	1.147
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-2.881 \cdot 10^{-5}$	$1.847 \cdot 10^{-3}$	-0.0421	0.4315	1.327

Розроблено автором

## Продовження додатку 3

Таблиця 3.4 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  кривої  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметрів провідників  $d$ , діаметра витка  $D_{coil4} = 9$  мм, на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25$ мм	$f = 20$ кГц	$1.117 \cdot 10^{-7}$	$-9.756 \cdot 10^{-6}$	$0.257 \cdot 10^{-3}$	$-0.554 \cdot 10^{-3}$	1.045
	$f = 60$ кГц	$1.867 \cdot 10^{-6}$	$-0.1098 \cdot 10^{-3}$	$1.896 \cdot 10^{-3}$	$-2.261 \cdot 10^{-3}$	1.046
	$f = 100$ кГц	$3.021 \cdot 10^{-6}$	$-0.1618 \cdot 10^{-3}$	$2.306 \cdot 10^{-3}$	$5.165 \cdot 10^{-3}$	1.036
$d_2 = 0.5$ мм	$f = 20$ кГц	$2.206 \cdot 10^{-6}$	$-0.1131 \cdot 10^{-3}$	$1.457 \cdot 10^{-3}$	$4.814 \cdot 10^{-3}$	1.065
	$f = 60$ кГц	$-3.099 \cdot 10^{-7}$	$7.658 \cdot 10^{-5}$	$-3.702 \cdot 10^{-3}$	0.0651	1.013
	$f = 100$ кГц	$-3.622 \cdot 10^{-6}$	$0.2891 \cdot 10^{-3}$	$-8.605 \cdot 10^{-3}$	0.1153	0.994
$d_3 = 0.75$ мм	$f = 20$ кГц	$-3.608 \cdot 10^{-7}$	$6.871 \cdot 10^{-5}$	$-3.092 \cdot 10^{-3}$	0.0491	1.053
	$f = 60$ кГц	$-9.205 \cdot 10^{-6}$	$0.632 \cdot 10^{-3}$	-0.0150	0.1723	1.016
	$f = 100$ кГц	$-1.628 \cdot 10^{-5}$	$1.068 \cdot 10^{-3}$	-0.0254	0.2641	1.064
$d_4 = 1$ мм	$f = 20$ кГц	$-5.253 \cdot 10^{-6}$	$0.378 \cdot 10^{-3}$	$-9.796 \cdot 10^{-3}$	0.1063	1.051
	$f = 60$ кГц	$-1.899 \cdot 10^{-5}$	$1.236 \cdot 10^{-3}$	-0.0282	0.2847	1.114
	$f = 100$ кГц	$-2.755 \cdot 10^{-5}$	$1.776 \cdot 10^{-3}$	-0.0408	0.4029	1.287

Розроблено автором

Таблиця 3.5 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  кривої  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметрів провідників  $d$ , діаметра витка  $D_{coil5} = 11$  мм, на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25$ мм	$f = 20$ кГц	$1.687 \cdot 10^{-7}$	$-1.211 \cdot 10^{-5}$	$0.2702 \cdot 10^{-3}$	$-0.569 \cdot 10^{-3}$	1.053
	$f = 60$ кГц	$1.819 \cdot 10^{-6}$	$-0.1038 \cdot 10^{-3}$	$1.705 \cdot 10^{-3}$	$-1.261 \cdot 10^{-3}$	1.052
	$f = 100$ кГц	$2.779 \cdot 10^{-6}$	$-0.1445 \cdot 10^{-3}$	$1.915 \cdot 10^{-3}$	$6.963 \cdot 10^{-3}$	1.042
$d_2 = 0.5$ мм	$f = 20$ кГц	$1.821 \cdot 10^{-6}$	$-8.981 \cdot 10^{-5}$	$1.025 \cdot 10^{-3}$	$6.515 \cdot 10^{-3}$	1.079
	$f = 60$ кГц	$-8.947 \cdot 10^{-7}$	$0.1088 \cdot 10^{-3}$	$-4.291 \cdot 10^{-3}$	0.0678	1.028
	$f = 100$ кГц	$-4.172 \cdot 10^{-6}$	$0.318 \cdot 10^{-3}$	$-9.119 \cdot 10^{-3}$	0.1182	1.011
$d_3 = 0.75$ мм	$f = 20$ кГц	$-9.148 \cdot 10^{-7}$	$9.734 \cdot 10^{-5}$	$-3.512 \cdot 10^{-3}$	0.0501	1.076
	$f = 60$ кГц	$-9.583 \cdot 10^{-6}$	$0.648 \cdot 10^{-3}$	-0.0161	0.1783	1.041
	$f = 100$ кГц	$-1.638 \cdot 10^{-5}$	$1.073 \cdot 10^{-3}$	-0.0251	0.2741	1.092
$d_4 = 1$ мм	$f = 20$ кГц	$-5.737 \cdot 10^{-6}$	$0.401 \cdot 10^{-3}$	-0.0102	0.1103	1.082
	$f = 60$ кГц	$-1.976 \cdot 10^{-5}$	$1.279 \cdot 10^{-3}$	-0.0290	0.3052	1.147
	$f = 100$ кГц	$-2.881 \cdot 10^{-5}$	$1.847 \cdot 10^{-3}$	-0.0421	0.4315	1.327

Розроблено автором

## Продовження додатку 3

Таблиця 3.6 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  кривої  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметрів провідників  $d$ , діаметра витка  $D_{coil6} = 13 \text{ мм}$ , на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$1.228 \cdot 10^{-7}$	$-1.054 \cdot 10^{-5}$	$0.2878 \cdot 10^{-3}$	$-0.791 \cdot 10^{-3}$	1.037
	$f = 60 \text{ кГц}$	$2.537 \cdot 10^{-6}$	$-0.1412 \cdot 10^{-3}$	$2.414 \cdot 10^{-3}$	$-4.891 \cdot 10^{-3}$	1.039
	$f = 100 \text{ кГц}$	$3.721 \cdot 10^{-6}$	$-0.1985 \cdot 10^{-3}$	$2.961 \cdot 10^{-3}$	$1.919 \cdot 10^{-3}$	1.031
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$2.488 \cdot 10^{-6}$	$-0.1299 \cdot 10^{-3}$	$1.771 \cdot 10^{-3}$	$3.359 \cdot 10^{-3}$	1.049
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.776 \cdot 10^{-7}$	$5.173 \cdot 10^{-5}$	$-3.391 \cdot 10^{-3}$	0.0636	0.996
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-3.158 \cdot 10^{-6}$	$0.268 \cdot 10^{-3}$	$-8.392 \cdot 10^{-3}$	0.1113	0.978
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-2.893 \cdot 10^{-8}$	$5.112 \cdot 10^{-5}$	$-2.791 \cdot 10^{-3}$	0.0471	1.029
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-9.095 \cdot 10^{-6}$	$0.624 \cdot 10^{-3}$	-0.0155	0.1602	0.994
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-1.609 \cdot 10^{-5}$	$1.057 \cdot 10^{-3}$	-0.0249	0.2433	1.043
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-5.049 \cdot 10^{-6}$	$0.367 \cdot 10^{-3}$	$-9.447 \cdot 10^{-3}$	0.0978	1.021
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.841 \cdot 10^{-5}$	$1.198 \cdot 10^{-3}$	-0.0273	0.2511	1.089
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-2.684 \cdot 10^{-6}$	$1.731 \cdot 10^{-3}$	-0.0391	0.3602	1.256

Розроблено автором

Таблиця 3.7 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_5$  величини  $K_{prox\_multiturn\_N}(N)$  для діаметрів провідників  $d$ , діаметра витка  $D_{coil7} = 15 \text{ мм}$ , на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$2.7 \cdot 10^{-7}$	$-1.63 \cdot 10^{-5}$	$0.35 \cdot 10^{-3}$	$-1.02 \cdot 10^{-3}$	1.034
	$f = 60 \text{ кГц}$	$3.335 \cdot 10^{-6}$	$-0.1721 \cdot 10^{-3}$	$2.76 \cdot 10^{-3}$	$-6.26 \cdot 10^{-3}$	1.038
	$f = 100 \text{ кГц}$	$4.602 \cdot 10^{-6}$	$-0.232 \cdot 10^{-3}$	$3.33 \cdot 10^{-3}$	$0.529 \cdot 10^{-3}$	1.029
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$2.319 \cdot 10^{-6}$	$-0.119 \cdot 10^{-3}$	$1.591 \cdot 10^{-3}$	$3.68 \cdot 10^{-3}$	1.044
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-6.115 \cdot 10^{-8}$	$6.449 \cdot 10^{-5}$	$-3.55 \cdot 10^{-3}$	0.062	0.993
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-3.446 \cdot 10^{-6}$	$0.2829 \cdot 10^{-3}$	$-8.55 \cdot 10^{-3}$	0.1088	0.975
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-3.678 \cdot 10^{-7}$	$6.645 \cdot 10^{-5}$	$-2.919 \cdot 10^{-3}$	0.045	1.024
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-9.058 \cdot 10^{-6}$	$0.6144 \cdot 10^{-3}$	-0.015	0.1505	0.994
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-1.577 \cdot 10^{-5}$	$-1.028 \cdot 10^{-3}$	-0.023	0.228	1.046
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	$-5.026 \cdot 10^{-6}$	$0.3582 \cdot 10^{-3}$	$-8.997 \cdot 10^{-3}$	0.0905	1.018
	$f = 60 \text{ кГц}$	$-1.709 \cdot 10^{-5}$	$1.109 \cdot 10^{-3}$	-0.025	0.2278	1.102
	$f = 100 \text{ кГц}$	$-2.599 \cdot 10^{-5}$	$1.664 \cdot 10^{-3}$	-0.0373	0.3379	1.256

Розроблено автором

## Продовження додатку 3

Також визначено, що для даної обмотки величина  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  найбільш точно буде описуватися поліномом третього ступеня:

$$K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right) = p_1 \cdot \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^3 + p_2 \cdot \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)^2 + p_3 \cdot \frac{d}{D_{coil}} + p_4.$$

У подальшому виконано апроксимацію та розрахунок апроксимуючих коефіцієнтів для ряду геометричних параметрів одношарової обмотки – діаметрів провідників  $d$ , діаметрів витків  $D_{coil}$  кількості витків  $N$  на частотах  $f$ . Результати розрахунків апроксимуючих коефіцієнтів для кривої залежності  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$  у випадку обмотки з кількістю витків  $N_1 = 1$  представлено в табл. 3.8, для обмотки з кількістю витків  $N_2 = 2$  – у табл. 3.9, для обмотки з кількістю витків  $N_3 = 5$  – в табл. 3.10, для обмотки з кількістю витків  $N_4 = 10$  – у табл. 3.11, для обмотки з кількістю витків  $N_5 = 15$  – у табл. 3.12, для обмотки з кількістю витків  $N_6 = 20$  – у табл. 3.13, для обмотки з кількістю витків  $N_7 = 25$  – у табл. 3.14.

Таблиця 3.8 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ , для діаметрів провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$ , кількості витків  $N_1 = 1$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	-13.53	1.633	0.921	1.018
	$f = 60 \text{ кГц}$	-10.63	1.268	0.936	1.018
	$f = 100 \text{ кГц}$	-8.393	0.946	0.955	1.021
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	-1.367	0.076	0.978	1.019
	$f = 60 \text{ кГц}$	-1.513	0.133	1.028	1.031
	$f = 100 \text{ кГц}$	-1.257	0.111	1.121	1.051
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	1.299	-0.852	1.123	1.021
	$f = 60 \text{ кГц}$	1.997	-1.219	1.426	1.066
	$f = 100 \text{ кГц}$	3.871	-2.145	1.851	1.153
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	0.651	-0.628	1.198	1.031
	$f = 60 \text{ кГц}$	-3.384	1.767	1.294	1.194
	$f = 100 \text{ кГц}$	3.005	-2.363	2.499	1.371

Розроблено автором

## Продовження додатку 3

Таблиця 3.9 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ ,

для діаметрів провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$ , кількості витків  $N_2 = 2$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	-12.66	1.547	0.924	1.018
	$f = 60 \text{ кГц}$	-5.591	0.501	0.976	1.019
	$f = 100 \text{ кГц}$	-6.908	0.656	0.986	1.022
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	-1.222	0.012	0.996	1.021
	$f = 60 \text{ кГц}$	1.382	-0.925	1.224	1.046
	$f = 100 \text{ кГц}$	5.502	-2.391	1.587	1.092
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	2.298	-1.416	1.269	1.029
	$f = 60 \text{ кГц}$	8.982	-5.065	2.357	1.127
	$f = 100 \text{ кГц}$	16.04	-8.681	3.378	1.279
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	2.175	-1.862	1.625	1.051
	$f = 60 \text{ кГц}$	7.715	-6.221	3.492	1.277
	$f = 100 \text{ кГц}$	9.402	-7.748	4.418	1.573

Розроблено автором

Таблиця 3.10 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини

$K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ , для діаметрів провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$ , кількості

витків  $N_3 = 5$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	-4.189	0.081	0.995	1.019
	$f = 60 \text{ кГц}$	138.1	-21.08	1.854	1.031
	$f = 100 \text{ кГц}$	58.06	-10.63	1.463	1.067
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	13.22	-4.618	1.373	1.048
	$f = 60 \text{ кГц}$	53.42	-17.59	2.664	1.163
	$f = 100 \text{ кГц}$	79.05	-26.36	3.952	1.247
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	22.85	-11.17	2.549	1.091
	$f = 60 \text{ кГц}$	56.11	-28.98	6.308	1.207
	$f = 100 \text{ кГц}$	76.01	-40.41	9.089	1.352
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	19.54	-13.33	3.951	1.091
	$f = 60 \text{ кГц}$	38.23	-28.51	9.071	1.252
	$f = 100 \text{ кГц}$	48.67	-36.54	11.63	1.572

Розроблено автором



## Продовження додатку 3

Таблиця 3.11 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ , для діаметрів провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$ , кількості витків  $N_4 = 10$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	27.94	-4.766	1.133	1.028
	$f = 60 \text{ кГц}$	199.5	-30.54	1.843	1.092
	$f = 100 \text{ кГц}$	220.6	-36.64	1.916	1.162
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	69.43	-20.61	2.348	1.092
	$f = 60 \text{ кГц}$	156.1	-48.05	4.971	1.216
	$f = 100 \text{ кГц}$	209.8	-68.02	7.849	1.269
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	54.63	-25.46	4.275	1.096
	$f = 60 \text{ кГц}$	111.5	-58.09	11.27	1.091
	$f = 100 \text{ кГц}$	149.2	-80.65	16.43	1.159
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	34.18	-23.34	6.139	1.014
	$f = 60 \text{ кГц}$	67.41	-51.26	15.01	0.987
	$f = 100 \text{ кГц}$	83.22	-64.14	18.99	1.271

Розроблено автором

Таблиця 3.12 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ , для діаметрів провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$ , кількості витків  $N_5 = 15$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	102.8	-15.05	1.382	1.038
	$f = 60 \text{ кГц}$	454.1	-63.72	2.463	1.131
	$f = 100 \text{ кГц}$	641.9	-88.81	2.901	1.209
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	110.4	-31.74	3.021	1.103
	$f = 60 \text{ кГц}$	228.2	-70.20	6.938	1.186
	$f = 100 \text{ кГц}$	316.3	-103.2	11.53	1.191
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	61.86	-29.01	4.825	1.075
	$f = 60 \text{ кГц}$	134.6	-72.04	14.11	0.961
	$f = 100 \text{ кГц}$	185.1	-102.9	21.01	0.957
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	36.66	-25.77	6.944	0.951
	$f = 60 \text{ кГц}$	78.59	-61.47	18.11	0.787
	$f = 100 \text{ кГц}$	98.29	-77.65	22.98	1.031

Розроблено автором

## Продовження додатку 3

Таблиця 3.13 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ , для діаметрів провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$ , кількості витків  $N_6 = 20$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	201.3	-27.86	1.671	1.047
	$f = 60 \text{ кГц}$	685.1	-93.41	3.121	1.152
	$f = 100 \text{ кГц}$	918.2	-124.9	3.803	1.225
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	121.7	-34.73	3.195	1.103
	$f = 60 \text{ кГц}$	251.7	-78.28	7.861	1.153
	$f = 100 \text{ кГц}$	358.4	-119.4	13.62	1.120
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	62.35	-29.66	5.056	1.052
	$f = 60 \text{ кГц}$	147.7	-80.71	16.04	0.851
	$f = 100 \text{ кГц}$	210.9	-118.9	24.35	0.785
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	36.82	-26.48	7.335	0.908
	$f = 60 \text{ кГц}$	83.6	-66.68	19.85	0.656
	$f = 100 \text{ кГц}$	105.7	-84.91	25.31	0.869

Розроблено автором

Таблиця 3.14 – Апроксимуючі коефіцієнти  $p_1 - p_4$  величини  $K_{prox\_circle} \left( \frac{d}{D_{coil}} \right)$ , для діаметрів провідника  $d$ , діаметрів витка  $D_{coil}$ , кількості витків  $N_7 = 25$  на частотах  $f$

$d$	$f$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
$d_1 = 0.25 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	116.7	-12.16	0.665	1.071
	$f = 60 \text{ кГц}$	-566.9	110.1	-7.112	1.312
	$f = 100 \text{ кГц}$	-181.8	52.87	-5.063	1.361
$d_2 = 0.5 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	121.4	-34.51	3.172	1.101
	$f = 60 \text{ кГц}$	254.5	-80.16	8.268	1.126
	$f = 100 \text{ кГц}$	375.6	-127.3	14.84	1.066
$d_3 = 0.75 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	60.96	-29.34	5.131	1.035
	$f = 60 \text{ кГц}$	153.4	-85.13	17.17	0.781
	$f = 100 \text{ кГц}$	221.7	-126.8	26.22	0.679
$d_4 = 1 \text{ мм}$	$f = 20 \text{ кГц}$	39.21	-27.89	7.585	0.899
	$f = 60 \text{ кГц}$	88.71	-70.03	20.57	0.629
	$f = 100 \text{ кГц}$	112.5	-89.31	26.21	0.842

Розроблено автором

**ДОДАТОК И**

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО**

**ДОСЛІДЖЕННЯ**