

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Стрельнікова Вікторія Анатоліївна

УДК 621.318

ДИСЕРТАЦІЯ

**«ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ РЕМОНТУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ»**

Спеціальність 274 – Автомобільний транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

 В. А. Стрельнікова

Науковий керівник: Батигін Юрій Вікторович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

*Усі предмети дисертації схвалені за
змістом
Голова спеціалізованої вченої ради ДРБ6.059.003
 Михайло Подрирко*

АНОТАЦІЯ

Стрельнікова В. А. Підвищення ефективності електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 274 – Автомобільний транспорт. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2021.

Роботу виконано на кафедрі фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Міністерства освіти і науки України

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси в інструментах електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту: системах індукційного нагріву із феромагнітними сердечниками та системах магнітно-імпульсного притягання тонкостінних металів із «прямим пропусканням струму».

Предметом дослідження є методи підвищення ефективності інструментів електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту, заснованих на введенні феромагнітних сердечників до пристроїв індукційного нагріву і використання закону Ампера в системах магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму».

Дисертація присвячена подальшому розвитку прогресивних технологій ремонту автомобільного транспорту, від елементної бази агрегатів до кузовних панелей, за допомогою використання енергії електромагнітних полів, зокрема, підвищенню інтенсивності впливу на металеві ділянки завдяки введенню до конструкції інструментів ремонту феромагнітних сердечників, а також впровадження магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки.

Практичний інтерес до електромагнітних методів ремонту викликаний перш за все їх набагато більшою ефективністю при вирішенні складних технологічних завдань, таких як рихтування кузовних панелей транспортних

засобів без пошкодження лакофарбового покриття та безпосереднього розбирання кузову тощо, ніж виконання тих самих операцій традиційними способами. Перехід індукційного нагріву із суто промислового використання до виробничої галузі має багато застосувань та переваг, що обумовлюють постійну увагу дослідників. Розробка нових ефективних інструментів заснованих на взаємодії електромагнітних полів джерела та об'єкта обробки, аналіз процесів у подібних системах та пошук шляхів оптимізації технології, все це та багато іншого становить актуальність представленого дослідження.

У дисертаційній роботі проведений аналіз технології індукційного нагріву та інструментів для її реалізації, який дозволяє вказати на реальну можливість збільшити амплітуди вихрових струмів і швидкість виконання виробничої операції при незмінному рівні енергоспоживання за рахунок введення додаткових феромагнітних сердечників до конструкції інструментів. Фізично, це рішення дозволяє знизити розсіювання збуджуваних електромагнітних полів і сконцентрувати їх локальну спрямованість в задану область оброблюваного металу.

Досліджений вплив магнітних властивостей внутрішнього заповнення інструменту-індуктору на електромагнітні процеси у оброблюваному металевому об'єкті – масивному зразку та тонкостінному листовому металі, для яких були розглянуті дві цілковито протилежні фізичні ідеалізації: «прозорість» для електромагнітних полів та зверхпровідність. Реальне проблематика обробки металів електромагнітним впливом має місце поміж ними, оскільки, якщо для масивного металевго об'єкту досягти «ідеальної» провідності можливо, бо вона відповідає режиму досить високих частот, коли має місце різкий поверхневий ефект, тоді, як «прозорість» металу залежить від суворого виконання хоча б однієї з двох умов. Перша з них, це прагнення до нуля питомої електропровідності металу ($\gamma_1 \rightarrow 0$), що швидше за все відповідає не провіднику, а діелектрику. Або друга, це прагнення до нуля частоти збуджуючого сигналу ($\omega \rightarrow 0$), що відповідає постійному струму в обмотці індуктора, коли неможливі ніякі індукційні ефекти. Проте, ідеалізація «прозорості» цікава саме з

практичних міркувань, оскільки, нехай якісно, але встановлює можливі орієнтири для реалізації індукційного нагріву досить масивних і погано провідних об'єктів.

Встановлено, що залежність від магнітних властивостей виділених середовищ, індуктора та оброблюваного металу, визначається множителем

$$\beta = \frac{\mu_{r2}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) + 1 \right)}.$$

Його величина встановлює вплив намагніченості на процес

збудження індукованого струму в металі зразка.

Ситуація з обробкою тонкостінних металів дещо протилежна, ніж із масивними, певної «прозорості» можливо отримати у припущенні його достатньо низької провідності, за реальних значень питомої електропровідності, це режим наднизьких робочих частот.

Аналітичний висновок про дієвість конструкції інструменту із феромагнітним сердечником, визначення коефіцієнту пропорційності між максимумами густини збуджуючого та індукованого струмів, величина якого визначає трансформацію енергії у досліджуваній системі «індуктор – оброблюваний метал», а також відповідні експериментальні дослідження свідчать про досягнення поставленої мети дисертаційної роботи.

Окремою частиною дисертаційного дослідження є магнітно-імпульсне притягання листових металів із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки. На даний час наукових досліджень за даною тематикою небагато.

Аналіз магнітно-імпульсних методів силового впливу, заснованих на притяганні заданих ділянок листових металів, показав затребуваність електромагнітних технологій відновлення транспортних засобів і необхідність їх подальшого розвитку за рахунок впровадження розробок нових конструкцій інструментів.

Аналіз дієвості інструментів безконтактного магнітно-імпульсного притягання, заснованих на прояві магнітних властивостей оброблюваних металів або на силовій взаємодії індукованих струмів, показав необхідність створення

нових інструментів, де притягання можна здійснити за рахунок «прямого пропускання струму» через задану ділянку листового металу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступних положеннях.

1. Вперше запропоновано використання феромагнітних сердечників в інструментах індукційного нагріву для ремонту автомобільного транспорту, що призводить до підвищення амплітуд збуджуваних полів, зростання інтенсивності теплових процесів та скорочення часу нагріву об'єктів обробки.

2. Вперше запропоновано використання магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки для видалення вм'ятин замість механічних аналогів із важільною системою витягання пошкоджених ділянок листових металів, що дозволило істотно спростити технологію ремонту, зменшити час і собівартість його виконання.

3. Отримала подальший розвиток теорія електромагнітних і теплових процесів у масивних та тонкостінних листових металах за наявності феромагнітного сердечника у конструкції інструментів індукційного нагріву, що дозволяє виконання чисельних оцінок, необхідних для проектування реально дієвих інструментів ремонту.

4. Отримали подальший розвиток аналітичні підходи до теоретичних моделей електромагнітних процесів у робочих зонах інструментів з «прямим пропусканням струму», що дозволяє виконання чисельних оцінок, необхідних для проектування реально дієвих інструментів рихтування автомобільних кузовів.

5. Успішно апробовані експериментальні моделі розроблених зразків інструментів електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту, як індукційного нагріву, так і притягання тонкостінних металів за «прямого пропускання струму», що дозволяє проводити достовірні розрахунки параметрів конструкцій інструментів для виконання реальних ремонтних операцій.

Результати дисертаційного дослідження використовувалися у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті в рамках

науково-дослідної роботи за держбюджетною темою «Універсальні інструменти безальтернативних електромагнітних технологій ремонту сталевих та алюмінієвих елементів конструкцій автотранспорту (індукторні системи з екраном, що притягає)» (номер державної реєстрації № 0117U002402, 2017-2018 рр.)

Розроблені системи індукційного нагріву та магнітно-імпульсної обробки пройшли апробацію на підприємстві «ТОВ АВТОДОМ ХАРКІВ». Технічна новизна розробок підтверджена 2 патентами України.

Також результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету при викладанні дисциплін «Основи технології виробництва та ремонту автомобілів».

Ключові слова: автомобільний транспорт, ефективні технології ремонту, індукційний нагрів, магнітно-імпульсне притягання, «пряме пропускання струму», електротехніка

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. Автомобільний транспорт. 2017;40:75-9.

(*Особистий внесок здобувача:* аналіз існуючих ремонтних технологій автомобільного транспорту, пропозиція використання індукційного нагріву як сучасної технології, що нівелює недоліки традиційного ремонтного обладнання)

2. Батыгин ЮВ, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев и магнитно-импульсное притяжение для промышленных технологий современности. Харьков: Лидер; 2019. 162 с. ISBN 978-617-7476-29-9

(*Особистий внесок здобувача:* формулювання тематики, збір та опрацювання теоретичного матеріалу, оформлення видання)

Статті у наукових виданнях держав ЄС:

3. Strelnikova V. Experimental research of induction heating in inner hollow of cylindrical solenoid. European Journal of Engineering Research and Science. 2020;5(8):986-9. doi: 10.24018/ejers.2020.5.8.2053

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Strelnikova VA, Voronova YM. Electromagnetic metal forming. The relevance and prospects for the use in industry. In: Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences. 36. наук. пр. Міжнар. наук-практ. конф.; 2017 Бер. 22; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, 7(2), с. 205-7.

(Особистий внесок здобувача: визначення перспектив застосування електромагнітної формовки металів для ремонтних технологій автомобільного транспорту)

5. Лавінський ДВ, Конкін ВМ, Стрельнікова ВА. Чисельні розрахунки температурного поля у елементах енергетичного устаткування з урахуванням впливу електромагнітного поля. В: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф.; 2019 Квіт. 25-26; Харків; Харків: НТУ «ХП», Вид-во «Лідер»; 2019, с. 66-7.

(Особистий внесок здобувача: участь у розробці ефективного методу аналізу нестационарного температурного поля що виникає у провідних матеріалах під впливом електромагнітного поля)

6. Стрельнікова ВА. Сучасні технології ремонту автомобілів з використанням електромагнітної формовки металів. В: Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика. Тези доп. III Всеукр. наук-практ. конф. молод. вч., спец. та асп.; 2017 Травн. 11-12; Маріуполь. Маріуполь: Приазовськ. держ. техн. ун-т, 2017, с. 70-2.

7. Стрельнікова ВА. Моделювання процесу індукційного нагріву металів засобами скінченно-елементного аналізу ANSYS. В: Математична підготовка у багатоступеневій системі вищої освіти: погляд студентів і молодих вчених. Матеріали Всеукр. наук-практ. конф. студ. і молод. вч.; 2017 Квіт. 13-14; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, с. 412-4.

Статті у наукових фахових виданнях України, що додатково відображають результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз даних (Web of Science):

8. Batygin YV, Chaplygin EA, Shinderuk SA, Strelnikova VA. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. Електротехніка і Електромеханіка. 2018;3:43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06

(Особистий внесок здобувача: теоретичний огляд існуючих магнітно-імпульсних технологій притягання листових металів, порівняльний аналіз інструментів притягання для виконання виробничих операцій)

9. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 1: Металлы с низкой удельной электропроводностью. Електротехніка і Електромеханіка. 2019;5:40-4. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07

(Особистий внесок здобувача: визначення амплітудно-часових залежностей струмів та електродинамічних зусиль в лінійних магнітно-імпульсних інструментах для обробки металів з низькою питомою електропровідністю)

10. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 2: Металлы с высокой удельной электропроводностью. Електротехніка і Електромеханіка. 2019;6:39-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05

(Особистий внесок здобувача: визначення амплітудно-часових залежностей струмів та електродинамічних зусиль в лінійних магнітно-імпульсних інструментах для обробки металів з високою питомою електропровідністю)

11. Batygin YV, Chaplygin YO, Sabokar OS, Strelnikova VA. Analysis of

electromagnetic processes in the system “cylindrical solenoid – massive conductor”
Електротехніка і Електромеханіка. 2018;1:54-8. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.08

(Особистий внесок здобувача: визначення параметрів багатовиткового циліндричного соленоїда в якості інструменту індукційного нагріву, що впливають на амплітуду збуджуваних вихрових струмів у масивному провіднику)

Статті у наукових фахових виданнях України:

12. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагріву в сучасних технологіях машинобудування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;4(133):70-4.

(Особистий внесок здобувача: аналіз виробничих способів нагріву металів, опис альтернативної системи індукційного нагрівання для вирішення задач ремонту та обслуговування автомобільного транспорту)

13. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Індукційне нагрівання тонкої феромагнітної пластини в полі плоского кругового соленоїда. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;6:135-140.

(Особистий внесок здобувача: вирішення фізико-математичної задачі для системи індуктор – тонка феромагнітна пластина, аналіз отриманих результатів)

14. Стрельникова ВА. Особенности индукционного нагрева массивных металлических заготовок индукторами с ферромагнитными сердечниками. Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. 2018;32(1308):99-104. doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17

15. Батыгин ЮВ, Ерёмина ЕФ, Чаплыгин ЕА, Стрельникова ВА. Электродинамические процессы в инструментах магнитно-импульсного притяжения при прямом пропускании тока через обрабатываемый металл. Вісник НТУ «ХПІ». Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2019;8(1333):207-13.

(*Особистий внесок здобувача*: отримання аналітичних залежностей, що дозволяють розраховувати розподіли струмів у перерізі листового металу під дією інструменту магнітно-імпульсного притягання за прямого пропускання струму через оброблюваний метал)

16. Batygin YV, Yeryomina OF, Shinderuk SO, Strelnikova VA, Chaplygin YO. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. Вісник НТУ «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях. 2020;4(6):3-13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.

(*Особистий внесок здобувача*: теоретичне обґрунтування дієвості методу магнітно-імпульсного притягання металів за «прямого пропускання струму» через оброблюваний об'єкт, вирішення крайової електродинамічної задачі для отримання фазових залежностей струмів в експериментальній системі і збуджуваних сил притягання об'єкту обробки)

17. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Сабокарь ОС, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев во внутренней полости цилиндрического соленоида. Основные соотношения протекающих процессов. Вісник Хмельницького національного університету. 2017;6(255):32-6.

(*Особистий внесок здобувача*: розробка моделі індукційного нагріву зубчатих циліндричних заготовок та вирішення електродинамічної задачі для представленої моделі)

18. Батыгин ЮВ, Сериков ГС, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов. Електротехніка та електроенергетика. 2019;2:34-42.

(*Особистий внесок здобувача*: формулювання рекомендацій для подальших розробок схемних елементів джерел живлення для магнітно-імпульсного притягання металів)

Патенти:

19. Батигін ЮВ, Чаплигін ЄО, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. патентовласник. Спосіб

обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Патент України № 121597. 2017 Груд. 11.

(Особистий внесок здобувача: розробка формули корисної моделі та опис її функціонування)

20. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, Шиндерук СО, Чаплигін ЄО, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. патентовласник. Пристрій індукційного нагріву з магнітним концентратором. Патент України №. 122800. 2018 Січ. 25.

(Особистий внесок здобувача: розробка формули корисної моделі та підготовка документації на отримання патенту)

Міжнародні стажування:

«Академічна доброчесність: виклики сучасності»: 14–25 жовтня 2019 р. – 120 год. Вищий Духовний Семінаріум UKSW (Варшава, Польща) та Фондація Інститут міжнародної наукової та академічної співпраці.

Сертифікат KW-102019/010 від 25.10.2019

“ENGR2000X: A Hands-on Introduction to Engineering Simulations” of Cornell University. Сертифікат f154360b025140b5b870c1fb0e8f92d0 від 12.01.2020

ABSTRACT

Strelnikova V. A. Improving the efficiency of electromagnetic technologies of automobile transport repair. – Qualification scholarly paper: a manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Transport, Specialty 274 – Automobile transport. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2021.

The work was accomplished at the Physics Chair of Kharkiv National Automobile and Highway University of the Ministry of Education and Science of Ukraine

The object of study is electromagnetic processes in the electromagnetic technologies tools of automobile transport repair: induction heating systems with ferromagnetic cores and systems of magnetic-pulse attraction of thin-walled metals with "direct current passage".

The subject of study is methods to increase the efficiency of electromagnetic tools for automobile transport repair, based on the introduction of ferromagnetic cores in induction heating devices and the use of Ampere's law in magnetic-pulse attraction systems with "direct current passage".

This thesis is devoted to further development of progressive technologies of automobile transport repair, from base elements of aggregates to body panels, using the energy of electromagnetic fields increasing the effect intensiveness on metal region caused by adding into repair-tool construction ferromagnetic cores, and also implementing of magnetic-pulsed attraction with “direct current passage” through the processing object.

Practical interest to electromagnetic repair methods is driven by their effectiveness in solving difficult technological tasks, such as flatter of vehicle bodies without any damage to their polish layer or its direct disassembly, which is higher than traditional way to manage same processes. Nowadays induction heating has not only industrial usage, but it is also production technology with many advantages under sustainable attention of researchers. Development of new effective

tools based on interaction between electromagnetic fields of source and processing object, analysis of processes in equal systems and search of ways to optimize the technology, all this and even more present the scientific novelty of the given thesis.

In the presented dissertation has been conducted analysis of induction heating technology and tools for its realization which allows indicating the real opportunity for increasing magnitude of induced currents and velocity of processing operation at the same level of energy by additional ferromagnetic cores in tools construction. Physically, such solution helps to decrease the dissipation of electromagnetic fields and concentrate them in local direction on processing metal region.

There has been investigated the effect of magnetic properties of inductor-tool inner space filling on electromagnetic processes in working metal object – massive billet and thin sheet metal, which were considered in two totally opposite physical idealizations: “transparency” for electromagnetic fields and superconductivity. The real problem of metal processing by electromagnetic effect is between them. In case of massive metal object, it is possible to reach “perfect” conductivity because it is corresponding rather high frequencies mode when an abrupt skin-effect takes place. But at the same time metal “transparency” depends on strict fulfillment of at least one of two conditions. The first is metal unit electrical conductivity that is tending to zero ($\gamma_1 \rightarrow 0$) which rather corresponds not to a conductor, but to a dielectric. Or the second one is exciting signal frequency that is tending to zero ($\omega \rightarrow 0$) which rather corresponds to direct current in the inductor winding, when any induction effects are not possible. However, the idealization of "transparency" is interesting for practical reasons because, though qualitatively, it sets possible benchmarks for the implementation of induction heating of massive and poorly conductive objects.

It has been determined that the dependence on magnetic properties of the selected media, inductor and metal being processed is determined by the factor

$$\beta = \frac{\mu_{r2}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) + 1 \right)}. \text{ Its value establishes the effect of magnetization on the excitation}$$

process of induced current in the metal sample.

The issue of thin-walled metal processing is a bit opposite than of massive one; some kind of “transparency” can be reached in the assumption of its rather low conductivity, due to the real values of unit electrical conductivity it is super low frequencies mode.

The analytical conclusion of the tool design with ferromagnetic core effectiveness, determination of the proportionality factor between the maximum densities of excitation and induced currents, which value defines the energy transformation in the investigating system “inductor – processing metal”, also corresponding experimental researches are testify to achievement of the set purpose of the dissertation thesis.

A separate part of the dissertation research is the magnetic-pulse attraction of sheet metals with “direct current passage” through the object of processing. Currently, there is not much information about research on this topic.

Analysis of magnetic-pulse methods of force, based on the attraction of specified areas of sheet metals, showed the demand for electromagnetic technologies for the restoration of vehicles and the need for their further development through the introduction of new tool designs.

Analysis of the effectiveness of non-contact magnetic pulse attraction tools based on the manifestation of magnetic properties of processed metals or on the force interaction of induced currents, showed the need to create new tools where attraction can be done by "direct current passage" through a given section of sheet metal.

The scientific novelty of the dissertation research is in the following statements.

1. For the first time, it is proposed to use of ferromagnetic cores in induction heating tools for the repair of automobile transport has been proposed, which leads to increased amplitudes of excited fields, increased intensity of thermal processes and reduced heating time of processing objects.

2. For the first time, it is proposed to use magnetic-pulse attraction with "direct current passage" through the treatment object to remove dents instead of mechanical analogues with a lever system for removing damaged areas of sheet metal, which significantly simplifies repair technology, reduce time and cost.

3. The theory of electromagnetic and thermal processes in massive and thin-walled sheet metals in the presence of a ferromagnetic core in the design of induction heating tools was further developed, which allows performing numerical estimates necessary for designing real effective repair tools.

4. Analytical approaches to theoretical models of electromagnetic processes in the working areas of tools with "direct current passage" have been further developed, which allows the performance of numerical estimates necessary for the design of real effective car body straightening tools.

5. Experimental models of the developed samples of electromagnetic technologies tools are successfully tested for automobile transport repair, both induction heating, and attraction with "direct current passage" that successfully allows to carry out reliable calculations of tools designs parameters for performance of real production operations.

The results of the dissertation research were used at Kharkiv National Automobile and Highway University in the framework of research work on the state budget topic “Universal tools of non-alternative electromagnetic technologies for repairing steel and aluminum elements of vehicle structures (inductor systems with attracting screen)” (the state registration number № 0117U002402, 2017-2018).

The developed systems of induction heating and magnetic-pulse processing have been tested at the enterprise “AVTODOM KHARKIV LLC”. The technical novelty of the developments is confirmed by 2 patents of Ukraine.

Also, the results of the dissertation are used in the educational process of Kharkiv National Automobile and Highway University in teaching the disciplines “Fundamentals of technology of production and repair of automobiles” and “Electric machines”.

Key words: automobile transport, effective repair technologies, induction heating, magnetic-pulsed attraction, “direct current passage”, electrical engineering

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

The main scientific results of the dissertation

Articles in scientific specialized editions of Ukraine:

1. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. Automobile transport. 2017;40:75-9.

(Personal contribution of the applicant: an analysis of existing repair technologies of automobile transport, a proposal to use induction heating as a modern technology that eliminates the disadvantages of traditional repair equipment)

2. Batygin YV, Strelnikova VA. Induction heating and magnetic-pulsed attraction for modern production technologies. Kharkiv: Leader; 2019. 162 p. ISBN 978-617-7476-29-9

(Personal contribution of the applicant: a formulation of topics, collection and processing of theoretical material, design of the publication)

Articles in scientific publications of EU countries:

3. Strelnikova V. Experimental research of induction heating in inner hollow of cylindrical solenoid. European Journal of Engineering Research and Science. 2020;5(8):986-9. doi: 10.24018/ejers.2020.5.8.2053

Published works for approbation purpose:

4. Strelnikova VA, Voronova YM. Electromagnetic metal forming. The relevance and prospects for the use in industry. In: Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences; 2017 Mar 22; Kharkiv. Kharkiv: KhNAHU; 2017, 7(2), p. 205-7.

(Personal contribution of the applicant: a prospects definition of application of electromagnetic metal forming for repair technologies of automobile transport)

5. Lavinsky DV, Konkin VM, Strelnikova VA. Numerical estimates of temperature field inside the elements of power equipment including electromagnetic field affection. In: Energy and thermal engineering processes and equipment; 2019 Apr 25-26; Kharkiv. Kharkiv: NTU "KhPI", "Leader"; 2019, p. 66-7.

(Personal contribution of the applicant: a participation in the development of an effective method of analysis of a non-stationary temperature field arising in conductive materials under the influence of an electromagnetic field)

6. Strelnikova VA. Modern technologies of automobile repair using electromagnetic metal forming. In: Energy resources saving problems in production area. Science and practice; 2017 May 11-12; Mariupol. Mariupol: Priazovsky STU, 2017 p. 70-2.

7. Strelnikova VA. Induction heating of metals process modeling using finite-element analysis program package ANSYS. In: Mathematical training in a multilevel system of higher education: the view of students and young scientists; 2017 Apr 13-14; Kharkiv. Kharkiv: KhNAHU; 2017, p. 412–4.

Articles in scientific professional editions of Ukraine, which additionally reflect the results of the dissertation

Articles in scientific professional editions of Ukraine, which are included in international science-computer databases (Web of Science):

8. Batygin YV, Chaplygin EA, Shinderuk SA, Strelnikova VA. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. Electrical Engineering & Electromechanics. 2018;3:43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06.

(Personal contribution of the applicant: a theoretical review of the existing magnetic-pulsed technologies of sheet metal attraction, comparative analysis of attraction tools for production operations)

9. Batygin YV, Chaplygin EA, Shinderuk SA, Strelnikova VA. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 1: Low electrical conductance metals. Electrical Engineering & Electromechanics. 2019;5:40-4. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07.

(Personal contribution of the applicant: a definition of magnitude-time dependences of currents and electrodynamic forces in linear magnetic-pulsed tools for processing metals with low electrical conductivity)

10. Batygin YV, Chaplygin EA, Shinderuk SA, Strelnikova VA. Numerical estimates of currents and forces in linear tools of the magnetic-pulse attraction of metals. Part 2: High electrical conductance metals. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019;6:39-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05

(Personal contribution of the applicant: a definition of amplitude-time dependences of currents and electrodynamic forces in linear magnetic-pulsed tools for processing metals with high electrical conductivity)

11. Batygin YV, Chaplygin YO, Sabokar OS, Strelnikova VA. Analysis of electromagnetic processes in the system “cylindrical solenoid – massive conductor” *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018;1:54-8. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.08

(Personal contribution of the applicant: a determination of multi-turn cylindrical solenoid parameters as an instrument of induction heating, influencing the magnitudes of excited eddy currents in a massive conductor)

Articles in scientific specialized editions of Ukraine:

12. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA. Equipment for practical induction heating implementation in modern technology engineering. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*. 2017;4(133):70-4.

(Personal contribution of the applicant: an analysis of production methods for metal heating, a description of alternative induction heating system for solving problems of repair and maintenance of automobile transport)

13. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA. Induction heating of thin ferromagnetic plate by the field of plane solenoid. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*. 2017;6:135-140.

(Personal contribution of the applicant: a solution of the physical and mathematical problem for the inductor-thin ferromagnetic plate system, an analysis of the obtained results)

14. Strelnikova VA. Features of induction heating of a massive metal billets by inductors with ferromagnetic cores. *Bulletin of NTU “KhPI” series “Problems of*

Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice”. 2018;32(1308):99-104. doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17

15. Batygin YV, Yeryomina EF, Chaplygin YA, Strelnikova VA. Electrodynamic processes in instruments of magnetic-pulse attraction at direct current passing through the handled metal. Bulletin of the NTU “KhPI” series “Mathematical modeling in engineering and technologies”. 2019;8(1333):207-13.

(Personal contribution of the applicant: obtaining analytical dependences that allow to calculate the current distributions in the cross section of the sheet metal under the action of the tool of magnetic-pulsed attraction by direct current passing through the processed metal)

16. Batygin YV, Yeryomina OF, Shinderuk SO, Strelnikova VA, Chaplygin YO. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. Bulletin of the NTU “KhPI” series “New solutions in modern technology”. 2020;4(6):3-13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.

(Personal contribution of the applicant: a theoretical substantiation of the efficiency of a method of magnetic-pulsed attraction of metals with “direct current passing” through the processed object, the solution of boundary electrodynamic problem for obtaining of phase dependences of currents in experimental system and excited forces of attraction of processing object)

17. Batygin YV, Chaplygin YO, Sabokar OS, Strelnikova VA. Induction heating in the inner cavity of the cylindrical solenoid. Running processes main relationships. Herald of Khmelnytskyi national university. 2017;6(255):32-6.

(Personal contribution of the applicant: a development of a model of induction heating of toothed cylindrical blanks and solution of an electrodynamic problem for the presented model)

18. Batygin YV, Serikov GS, Shinderuk SO, Strelnikova VA. Resonant reactive power amplifier. Analysis of electromagnetic processes. Electrical Engineering and Power Engineering. 2019;2:34-42.

(Personal contribution of the applicant: a formulation of recommendations for further development of circuit elements of power supplies for magnetic-pulsed attraction of metals)

Patents:

19. Batygin YV, Chaplygin YA, Sabokar OS, Strelnikova VA, inventors; KhNAHU, assignee. Method of processing sheet metals by concentrated energy sources of magnetic fields with preheating. Patent of Ukraine № 121597. 2017 Dec 11.

(Personal contribution of the applicant: a development of the formula of the utility model and the description of its functioning)

20. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA, Shinderuk SA, Chaplygin YA, inventors; KhNAHU, assignee. Induction heating device with magnetic concentrator. Patent of Ukraine № 122800. 2018 Jan 25.

(Personal contribution of the applicant: development of a utility model formula and preparation of patent application documentation)

International Internships:

«Uczciwość akademicka»: 14–25 października 2019 r. – 120 god. Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie (Poland) and Foundation Institute for International Scientific and Academic Cooperation. Certificate KW-102019/010; 25.10.2019

“ENGR2000X: A Hands-on Introduction to Engineering Simulations” of Cornell University. Valid Certificate ID f154360b025140b5b870c1fb0e8f92d0 Verified Certificate Issued January 12, 2020

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	24
ВСТУП	25
РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РЕМОНТУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ	34
1.1 Індукційний нагрів	34
1.1.1 Фізичні основи індукційного нагріву	34
1.2 Аналіз розвитку техніки індукційного нагріву в промисловості та ремонтних технологіях.....	36
1.2.1 Індукційний нагрів для ремонту автомобільного транспорту	40
1.3 Магнітно-імпульсне притягання в електромагнітних технологіях ремонтних автомобільних транспортних засобів.....	42
1.3.1 Притягання за суперпозиції високочастотних та низькочастотних електромагнітних процесів.....	43
1.3.2 Інструменти притягання феромагнетиків низькочастотними електромагнітними полями	45
1.3.3 Низькочастотні електромагнітні інструменти притягання немагнітних металів	50
1.3.4 Магнітно-імпульсне притягання листових металів для видалення вм'ятин на поверхні кузова автомобіля	56
1.3.5 «Пряме пропускання струму» для притягання листових металів ...	58
Висновки за розділом 1	60
РОЗДІЛ II. ІНДУКЦІЙНІ ЕФЕКТИ ЗБУДЖУВАНІ У МЕТАЛЕВИХ ОБ'ЄКТАХ ПЛОСКИМ СОЛЕНОЇДОМ ІЗ ФЕРОМАГНІТНИМ СЕРДЕЧНИКОМ	62
2.1 Об'єкт нагріву – масивний металевий зразок.....	63
2.1.1 Розрахункова модель. Постановка задачі	63
2.1.2 Інтегрування рівнянь Максвелла та аналіз електромагнітних процесів	65

2.1.3	Чисельні оцінки та можливість підвищення інтенсивності індукційних ефектів.....	74
2.2	Об'єкт нагріву – тонкостінний листовий метал.....	86
2.2.1	Формулювання задачі, інтегрування рівнянь Максвелла	87
2.2.2	Індукційні процеси в ідеалізації зверхпровідності листового металу	93
2.2.3	Індукційні процеси в листових металах із скінченним значенням питомої електропровідності	94
2.2.4	Індукційні процеси в ідеалізації «прозорості» листового металу ...	98
2.2.5	Чисельні оцінки	101
	Висновки за розділом 2	108
	РОЗДІЛ III. МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ ПРИТЯГАННЯ ЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ ІЗ «ПРЯМИМ ПРОПУСКАННЯМ СТРУМУ»	110
3.1	Принцип дії, постановка задачі.....	110
3.2	Електродинамічні процеси, співвідношення для струмів та сил ..	113
3.2.1	Фізико-математична модель, прийняті припущення.....	113
3.2.2	Інтеграли рівнянь Максвелла в L–просторі.....	115
3.2.3	Струми та сили в просторі оригіналів.....	121
3.3	Чисельні оцінки, узагальнення результатів розрахунків	127
3.4	Приклади можливих експериментальних конструкцій інструментів	138
	Висновки за розділом 3	140
	РОЗДІЛ IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	142
4.1	Індукційний нагрів інструментами з феромагнітними сердечниками	142
4.1.1	Обладнання, експериментальні зразки.....	143
4.1.2	Схеми проведених експериментів	145
4.1.3	Моделювання індукційного нагріву методом скінченних елементів в середовищі ANSYS.....	148
4.1.4	Результати вимірювань	156

4.1.5	Узагальнення отриманих результатів, висновки.....	162
4.2	Магнітно-імпульсне притягання листових зразків за «прямого пропускання струму»	163
4.2.1	Розрахунок експериментальної моделі інструмента	164
4.2.2	Обладнання, експериментальні об'єкти обробки	168
4.2.3	Практична апробація, основні результати	171
	Висновки за розділом 4	174
	ВИСНОВКИ	176
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178
	Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	191
	Додаток Б Акти впровадження результатів дисертації	196
	Додаток В Результати розрахунків модельного експерименту	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕВВ – електромагнітний видаляч вм'ятин

ЕМФ – електромагнітна формовка

ІСПЕ – індукторна система з притягаючим екраном

ЛЕТ – лабораторія електромагнітних технологій ХНАДУ

МВВ – магнітний видаляч вм'ятин

МІОМ – магнітно-імпульсна обробка металів

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У теперішній час техніка на основі індукційного нагріву набуває все більшої популярності. Про це свідчить кількість досліджень у науковій періодиці у всьому світі, що зростає щороку. Її застосовують не лише у металургії, як це було на початку 20 сторіччя, коли технологія лише розвивалась, але і у багатьох інших галузях промисловості, охорони здоров'я, побуті. Вона має низку переваг над іншими способами нагріву, являє собою практичний та комерційний інтерес, як для науково-технічних підприємств, так і для виробників електротехнічного обладнання. Індукційний нагрів забезпечує швидкий, безконтактний та найбільш ефективний нагрів провідників та діелектриків, дозволяє досягти високих температур, навіть температур плавлення матеріалів що обробляють, при цьому зберігаючи рівномірний розподіл необхідного рівня прогріву у об'ємі заготовки. Виходячи із фізичної суті, індукційний нагрів є технологією, що заснована на явищах вихрових струмів, поверхневого ефекту та магнітного гістерезису, що супроводжуються виділенням тепла у об'єкті обробки. **Актуальним** методом вдосконалення інструментів індукційного нагріву є використання феромагнітних сердечників, що підвищують інтенсивність електромагнітних процесів у системі «індуктор – заготовка», що в свою чергу підвищує продуктивність інструмента.

Окрім іншого, усе більшу **актуальність** набувають методи локалізованого притягання заданих ділянок листових металів із використанням енергії імпульсних магнітних полів для різного роду технологій обробки у багатьох галузях промислового виробництва.

Особливу увагу привертають розробки технологій усунення вм'ятин і вирівнювання поверхонь листових металів під час реставрації корпусів літаків та автомобільних кузовів. У першому випадку необхідність такої операції обумовлена порушенням аеродинамічних характеристик літального апарату, у

другому, не лише із естетичних міркувань, але загалом неможливістю подальшої експлуатації транспортного засобу із пошкодженим кузовом.

Як показує практика, більше 50% пошкоджень це вм'ятини в зонах із ускладненим доступом або повністю закритим зворотнім доступом. Це різноманітні корпусні елементи, крила, фюзеляжі літаків, двері, капоти, криші, пороги, бампери автомобілів тощо.

З огляду на вище зазначене особливий інтерес привертають пристрої, що дозволяють виконувати реставрацію пошкоджень (вм'ятин) на поверхні із зовнішньої сторони без попереднього розбирання корпусу або кузова та, за можливості, без порушення існуючого захисного покриття. Наведеним вимогам відповідають пропозиції, наприклад, американського концерну «Boeing Company», а також європейських фірм, що є лідерами у сфері кузовного ремонту сучасних автомобілів.

У найбільш перспективних технологіях магнітно-імпульсного притягання заданих ділянок листових металів, що дозволяють реставрацію із зовнішньої сторони корпусів транспортних засобів, слід виділити деякі теоретично та експериментально обґрунтовані пропозиції, сформульовані авторами робіт [1,2], а саме:

- спосіб, заснований на експериментально виявленім ефекті притягання тонкостінних феромагнетиків за достатньо низьких робочих частотах діючих полів [1].
- інструменти магнітно-імпульсного притягання, принцип дії яких заснований на силовій взаємодії провідників із однаково направленими струмами [2].

Незважаючи на цілу низку переваг, недоліком вищезазначених пропозицій є обмеженість силових можливостей. Величини зусиль, які збуджуються обумовлені індукційними ефектами, яким, як правило, супутні значні втрати електромагнітної енергії [3].

Тому **актуальним** способом магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів, що може бути основою для створення

ефективного інструменту зовнішнього рихтування автомобільних кузовів, є спосіб «прямого пропускання струму» через оброблюваний метал. Його привабливість обумовлена простотою технічної реалізації, доволі високими енергетичними показниками, та широким спектром виробничих можливостей. Безумовно сама ідея «прямого пропускання струму» у практиці магнітно-імпульсної обробки металів не нова, але особливого сенсу та практичної значимості дана пропозиція набуває саме для ремонтних технологій рихтування, що засновані на притягання заданих ділянок листових металів.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є вдосконалення технічних пристроїв ремонту автомобільного транспорту за рахунок використання феромагнітних сердечників у системах індукційного нагріву, а також «прямого пропускання струму» у технології магнітно-імпульсного притягання листових металів.

Завдання, які були вирішені для досягнення поставленої мети:

- дослідження існуючих електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту та виявлення шляхів підвищення їх ефективності;
- розробка математичної моделі інструменту індукційного нагріву, визначення впливу феромагнітного сердечника всередині інструменту на ефективність реалізації ремонтних операцій;
- розробка математичної моделі інструменту магнітно-імпульсного притягання тонкостінних металів з «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки та визначення характерних режимів роботи системи для реалізації ефективного видалення пошкоджень кузовних елементів автомобільного транспорту
- проведення експериментальної апробації розроблених зразків інструментів в умовах реального технологічного процесу, узагальнення результатів.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в інструментах електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту: системах індукційного нагріву із феромагнітними сердечниками та системах магнітно-

імпульсного притягання тонкостінних металів із «прямим пропусканням струму».

Предмет дослідження – методи підвищення ефективності інструментів електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту, заснованих на введенні феромагнітних сердечників до пристроїв індукційного нагріву і використанні закону Ампера в системах магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму».

Методи дослідження. Вирішення сформульованих у дисертаційній роботі задач досягнуто за допомогою фундаментальних положень теорії електротехніки, аналітичного вирішення задач електро- і термодинаміки, методів диференціального та інтегрального обчислення рівнянь Максвелла, а також метод скінченних елементів для чисельного моделювання. Перевірка адекватності прийнятих модельних рішень проводилась за допомогою експериментальних досліджень на базі Лабораторії електромагнітних технологій кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступних положеннях.

1. Вперше запропоновано використання феромагнітних сердечників в інструментах індукційного нагріву для ремонту автомобільного транспорту, що призводить до підвищення амплітуд збуджуваних полів, зростання інтенсивності теплових процесів та скорочення часу нагріву об'єктів обробки.

2. Вперше запропоновано використання магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки для видалення вм'ятин замість механічних аналогів із важільною системою витягання пошкоджених ділянок листових металів, що дозволило істотно спростити технологію ремонту, зменшити час і собівартість його виконання.

3. Отримала подальший розвиток теорія електромагнітних і теплових процесів у масивних та тонкостінних листових металах за наявності феромагнітного сердечника у конструкції інструментів індукційного нагріву, що

дозволяє виконання чисельних оцінок, необхідних для проектування реально дієвих інструментів ремонту.

4. Отримали подальший розвиток аналітичні підходи до теоретичних моделей електромагнітних процесів у робочих зонах інструментів з «прямим пропусканням струму», що дозволяє виконання чисельних оцінок, необхідних для проектування реально дієвих інструментів рихтування автомобільних кузовів.

5. Успішно апробовані експериментальні моделі розроблених зразків інструментів електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту, як індукційного нагріву, так і притягання тонкостінних металів за «прямого пропускання струму», що дозволяє проводити достовірні розрахунки параметрів конструкцій інструментів для виконання реальних ремонтних операцій.

Публікації і особистий внесок здобувача.

Основні результати дисертації викладені в 20 публікаціях, у тому числі статті у «Електротехніка і Електромеханіка» індексовані у світових наукометричних базах даних і системах [4-6], статті закордонного видання на англійській мові [7], в монографії [8], дев'яти статтях в наукових фахових виданнях України [9-17] та чотирьох тезах доповідей у матеріалах міжнародних та міжнародно-практичних конференцій [18-21], а також у двох патентах [22-23]. З представлених публікацій 2 є самостійними науковими працями дисертанта [7,12].

Дисертаційна робота є самостійно виконаною науковою працею. Результати, які складають основний зміст дисертації, отримані автором самостійно.

Обґрунтованість та достовірність результатів наведених у дисертації, забезпечується коректністю та строгістю математичних постановок задач у рамках класичної електродинаміки; застосуванням відомих числових методів розв'язання поставлених задач; узгодженістю та збігом одержаних розв'язків із наведеними у літературі результатами, які були отримані альтернативними методами; відповідністю результатів і висновків фізичній суті завдань.

Апробація результатів дисертації.

Основні концепції, ідеї, положення і результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових семінарах і конференціях, на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях: Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences (Харків, 2017); Математична підготовка у багатоступеневій системі вищої освіти: погляд студентів і молодих вчених (Харків, 2017); Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика (Маріуполь, 2017); Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування (Харків, 2019).

У повному обсязі робота доповідалась і обговорювалась на розширеному науковому семінарі кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (Харків, 2021).

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу було виконано у межах індивідуального плану роботи аспіранта та в рамках дослідження, яке здійснено у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті та за темою держбюджетної роботи «Універсальні інструменти безальтернативних електромагнітних технологій ремонту сталевих та алюмінієвих елементів конструкцій автотранспорту (індукторні системи з екраном, що притягає)» (номер державної реєстрації № 0117U002402, 2017-2018 рр.)

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці працездатної системи індукційного нагріву із феромагнітним сердечником, ефективність якої підвищується за рахунок збільшення ефективного потокозчеплення; розробці моделі інструменту магнітно-імпульсного притягання з «прямим пропусканням струму» через оброблюваний метал; розробці алгоритмів аналітичних розрахунків функціонування подібних систем що можуть бути використані для подальших досліджень. Результати роботи можуть бути використані для безпосереднього впровадження у технологічний процес на підприємствах.

Розроблені системи індукційного нагріву та магнітно-імпульсної обробки пройшли апробацію на підприємстві «ТОВ АВТОДОМ ХАРКІВ». Технічна новизна розробок підтверджена 2 патентами України.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету при викладанні дисципліни «Основи технології виробництва та ремонту автомобілів».

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація включає вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Вона містить 206 сторінок машинописного тексту, з них 151 сторінка основного тексту, 80 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел зі 121 найменувань та 3 додатки.

У вступі висвітлено актуальність теми, мету, наукову новизну отриманих результатів.

У першому розділі розглянуті історичні аспекти теми дисертаційного дослідження, розвиток техніки індукційного нагріву в промисловості та ремонтних технологіях. Традиційне застосування систем індукційного нагріву для термообробки описане у роботах [26,30,38,50,51,58-67].

Особлива увага приділялась розробкам індукторних систем для автомобільної галузі та ремонтних технологій [52-57,68-77].

Окремою частиною було розглянуто магнітно-імпульсне притягання в електромагнітних технологіях ремонту автомобільного транспорту [78,79]. Проведено порівняльний аналіз класичної магнітно-імпульсної обробки металів та електромагнітної формовки [80-85]. Представлена інформація про експериментальну апробацію таких систем [86-89]. Розглянуто відповідні задачі та методи їх розв'язання щодо фізичної суті їх функціонування [90-106].

Проаналізовані системи засновані на «прямому пропусканні струму» через об'єкт обробки – тонкостінний листовий метал [107-110].

На основі проведеного аналізу джерел за тематикою дослідження можна зробити наступні висновки. Більшість праць направлена на опис конструкцій інструментів-індукторів різної конфігурації без феромагнітного заповнення та не

призначених для нагріву локальних областей кузовних панелей автомобільних транспортних засобів. Системам магнітно-імпульсної обробки металів з «прямим пропусканням струму» через оброблюваний об'єкт приділяється недостатньо уваги у сучасній науковій періодиці.

У другому розділі запропоновано теоретичну модель інструменту-індуктору із феромагнітним сердечником. Визначені аналітичні розв'язки системи рівнянь Максвелла за умов двох ідеалізацій: надпровідності та «електромагнітної прозорості» листового металу. Отримані результати свідчать про можливість надати оцінки реальним системам, фізичні властивості яких знаходяться в рамках цих двох ідеалізацій.

Визначено що інтенсифікація електромагнітних процесів у системі індуктор – заготовка залежить від намагніченості середовища із джерелами магнітного поля:

- у випадку немагнітних середовища із двома індукторами та металу об'єкту ($\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$), в порівнянні з аналогічною ситуацією при підключенні одного індуктора, має місце збільшення амплітуди вихрових струмів більше ніж у $\sim 1,3$ рази;
- у випадку намагніченого середовища з двома індукторами ($\mu_{r2} = 100$) та немагнітного металу об'єкту нагріву ($\mu_{r1} = 1$), в порівнянні із аналогічною ситуацією при підключенні одного індуктора, має місце збільшення амплітуди вихрових струмів більше ніж у $\sim 1,2$ рази;
- в системі з двома індукторами у магнітному середовищі над немагнітним металом в порівнянні із системою, де один індуктор та немагнітні складові, можливе підвищення інтенсивності індукційного процесу більше ніж у $\sim 1,5$ рази.

Окремо слід зазначити, що наявність або відсутність магнітних властивостей у метала об'єкта що нагрівається практично не впливає на амплітуди збуджуваних вихрових струмів.

У третьому розділі запропонована система магнітно-імпульсного притягання листових металів із «прямим пропусканням струму». Представлена

фізико-математична модель електромагнітних процесів. Отримані чисельні оцінки, що свідчать про дієвість запропонованого інструменту магнітно-імпульсної обробки, а саме відповідність до вимоги низьких робочих частот, що забезпечують режим інтенсивного проникнення збуджуваних електромагнітних полів.

Описані можливі експериментальні конструкції інструментів за двома схемами підключення до джерела потужності – послідовне та паралельне.

Показано, що системи із «прямим пропусканням струму» здатні знизити енергетичні затрати на виробничі операції та водночас підвищити амплітуди сил притягання листових металів.

Виходячи з чисельних оцінок для схем із послідовним включенням до розрядного кола джерела потужності амплітуди збуджуваних сил притягання зростають у $\sim 3 \div 4$ рази за тих самих енергетичних показників, що і у випадку паралельного включення.

У четвертому розділі представлені результати всіх експериментальних досліджень проведених в рамках дисертаційного дослідження.

В додатках наведена інформація щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження та результати проведених експериментів.

Автор висловлює щире вдячність своєму науковому керівнику – доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри фізики Юрію Вікторовичу Батигіну за постійну увагу до роботи, цінні поради та пропозиції, що сприяли успішному проведенню досліджень.

РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РЕМОНТУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Індукційний нагрів

Наприкінці 19-го сторіччя вже були закладені теоретичні основи техніки індукційного нагріву. Так, у 1831 році М. Фарадей відкрив закон електромагнітної індукції. Результати дослідження процесів виділення теплової енергії в провіднику, по якому протікає електричний струм, належать Д. Джоулю та Е. Ленцу. Дж. К. Максвелл систематизував експериментальні дані і створив теорію електромагнітного поля. Система рівнянь Максвелла є фундаментом сучасної електродинаміки. Далі слідувала Нобелівська Премія Д. Томсону за «Дослідження проходження електрики крізь гази» [24,25]. Всі ці відкриття та багато інших послужили науковими передумовами для використання індукційного нагріву в промислових цілях. Але, зважаючи на відсутність джерел струму великої потужності, відсутність необхідності в промисловому високотемпературному нагріві, відсутність достатніх вимог до автоматизації технологічних процесів і матеріалів після обробки, пік розвитку технологій із застосуванням індукційного нагріву припав лише на 20 століття [26].

1.1.1 Фізичні основи індукційного нагріву

Як було зазначено раніше, фізичною основою дієздатності техніки індукційного нагріву є закон електромагнітної індукції Фарадея. Цей закон став базовим принципом сучасної практичної електротехніки. Наприклад, відомі перетворювачі електричних сигналів – трансформатори, дозволяють легко змінювати рівень напруги і струму для живлення різного виду приладів. Фактично, цей же принцип використовується і в системах індукційного нагріву, де об'єкт нагріву виступає в ролі вторинної обмотки трансформатора, в якому

індукуються, так звані, вихрові струми Фуко. Дане фізичне явище передбачає обов'язкову замкнутість контурів протікання струму, що є необхідною умовою для безпосередньої працездатності системи.

Індукційний нагрів – це феномен, що включає складний взаємозв'язок електромагнітних і теплообмінних явищ, оскільки фізичні властивості різних матеріалів залежать від впливу багатьох чинників, наприклад, мікроструктури, температури, впливу зовнішніх електромагнітних полів та ін. [27].

Слід зазначити, що тепловиділення присутнє як у трансформаторах, так і в обладнанні для індукційного нагріву, з тією лише різницею, що в першому випадку негативні наслідки даного ефекту мінімізують, а в другому – нагрівання є цільовою функцією роботи системи.

Змінна напруга, що подається на котушку (наприклад, багатовитковий соленоїд), призведе до появи струму в її колі. Змінний струм збуджує змінне в часі магнітне поле. Останнє індукує вихрові струми в заготовці – об'єкті нагрівання, розташованому всередині соленоїда. Далі, відповідно до закону Джоуля-Ленца, має місце виділення теплової енергії.

Через неоднорідність розподілу індукованих струмів в заготовці з'являються температурні градієнти. Нерівномірний розподіл струму обумовлений наступними електромагнітними явищами: поверхневий ефект (скін-ефект), ефект близькості, крайові ефекти та ін. Ці явища грають важливу роль в роботі систем індукційного нагріву і найбільш докладно описані в роботах [26-38]. Крім цих ефектів, на ефективність індукційного нагріву значний вплив мають також електрофізичні властивості оброблюваних матеріалів. Серед них найбільш значущими є питома електропровідність – γ , магнітна проникність – μ , діелектрична проникність – ε та ін.

При індукційному нагріві сплавів, важливо мати чітке уявлення про можливу варіацію електричного опору. Слід зазначити, що використання усереднених значень в деяких випадках може призвести до некоректних результатів і знизити ефективність роботи системи в цілому.

Магнітна проникність матеріалу вказує на здатність до намагнічування. Відносна діелектрична проникність визначає здатність до поляризації матеріалу. Магнітна проникність має помітний вплив на скін-ефект, крайовий ефект і ефект близькості. Діелектрична проникність зазвичай не має істотного впливу на індукційний нагрів металевих матеріалів, але відіграє важливу роль під час нагріву діелектриків.

Оскільки основною метою електромагнітної обробки металів є їх нагрівання, то слід зазначити, що в індукційному нагріві присутні всі три режими теплопередачі – провідність, конвекція і випромінювання, відносно повну інформацію про які можна знайти в публікаціях [39-49].

1.2 Аналіз розвитку техніки індукційного нагріву в промисловості та ремонтних технологіях

Фактично, індукційні системи для термообробки привертали увагу вчених і інженерів, починаючи з 1930-х років. Для цього необхідно було мати джерела живлення високої частоти і розроблену теорію поведінки металу і його електрофізичних властивостей (питомого опору, магнітної проникності) в процесі обробки електромагнітним полем. В першу чергу, слід було підійти до питання вибору частоти електромагнітних процесів. Винахід радіо А. Поповим стимулював роботи по створенню високочастотних генераторів. Спочатку електромашинних, а потім електронних, одинична потужність яких в наш час вимірюється мегаватами. Велику роль у розвитку електромагнітної термообробки зіграла монографія В. П. Вологдіна «Поверхневе загартування індукційним методом», що вийшла у 1939 році. В цей же час питаннями індукційного нагріву зайнялися професор Г. Бабат, відомий своїми численними винаходами, і професор Г. Лозинський. Далі індукційний нагрів набув широкого застосування в ковальському і прокатному виробництвах, де потужність окремих установок досягає сотень мегават, для зварювання, пайки, віджигу, отримання

матеріалів надвисокої чистоти, відпуску тощо. Частоти, що використовуються при індукційному нагріві металів, варіюються в діапазоні від 0,5 до 10^7 Гц.

Безліч систем індукційного нагріву можна класифікувати або за принципом їх впливу на об'єкт що нагрівається, або за конструктивними особливостями [26,30]. Принципова схема будь-якої установки індукційного нагріву для проведення технологічних операцій включає в себе наступні елементи:

1. Генератор високої частоти. Підбирається конкретно під тип технологічного процесу.
2. Інструмент – індуктор (соленоїд) необхідної конфігурації, в залежності від об'єкта обробки. Це можуть бути як плоский круговий або протяжний циліндричний соленоїд, так і багато інших форм, які забезпечать достатній рівень електромагнітного зв'язку з об'єктом нагріву.
3. Конденсаторна батарея, яка компенсує низький коефіцієнт потужності інструменту.

Крім того, в залежності від умов необхідної технологічної операції може використовуватися трансформатор, що знижує або підвищує живлення від мережі. Відмінною особливістю такого варіанту живлення є можливість роботи в режимі «резонансу струмів», що в цілому дає можливість підвищити ефективність виконуваної виробничої операції. Часто в конструкції системи встановлюють перетворювачі частоти з трифазної в однофазну, чим забезпечують рівномірність навантаження на мережу. Типові робочі частоти цих систем варіюються від низьких частот до декількох МГц.

Обов'язковою умовою збудження вихрових струмів є наявність замкнутих контурів для їх протікання. Виконання цієї умови досягається відповідним розташуванням інструменту-індуктору щодо провідних елементів об'єкту нагріву [3].

Для установок індукційного нагріву, які застосовуються при наскрізному нагріванні, зазвичай використовують живлення від промислової мережі зі струмом частотою $50 - 10^3$ Гц і перетворювачем частоти. Підбираючи частоти

під певний діаметр об'єкта обробки можна домогтися прогріву будь-якої необхідної глибини. При глибинному типі нагрівання спостерігається зниження перегріву поверхні об'єкта і високий ККД. Зменшуючи частоту, можна збільшити «гарячу» глибину проникнення струму. Якщо в індукторі знаходиться одна заготовка, то для забезпечення рівномірного прогріву по всій довжині, розміри її повинні бути трохи менше розмірів інструменту.

Основними способами індукційного нагріву є наступні два: періодичний і методичний [30]. Для першого характерний одночасний нагрів всіх частин заготовки з подальшим вилученням її із індуктора, а для другого способу характерна безперервна подача заготовок одна за одною або ж рух індуктора уздовж однієї заготовки з певною швидкістю.

Нагрівання металу основний технологічний процес, що безпосередньо впливає на якість оброблюваного матеріалу та на його техніко-експлуатаційні показники в майбутньому. Саме за рахунок оптимізації цього процесу, як в металургії, так і в автомобілебудуванні, зокрема, можливо оптимізувати весь процес виробництва. Тому питанню вибору методу нагріву приділяється особлива увага. Індукційний нагрів при такому виборі виграє по ряду показників. Він має істотні переваги, а саме [50-52]:

1. Швидкий нагрів.
2. Висока ефективність.
3. Керований нагрів.
4. Автоматизація технологічного процесу.
5. Екологічність і безпека.
6. Енергозбереження.
7. Мобільність обладнання.
8. Нагрів електромагнітним випромінюванням.
9. Відсутність необхідності спеціальної освіти у робітників, які обслуговують індукційні установки.

Незважаючи на описані переваги, технологія індукційного нагріву має вельми обмежений перелік недоліків. Проте, суттєві переваги індукційного

нагріву повністю нівелюють всі відомі недоліки. Вибір на користь того або іншого способу нагріву залежить від початкових цілей і завдань технологічного процесу.

З плином часу технологія індукційного нагріву зазнавала значних змін і все більше удосконалювалася. Сучасна сфера застосування індукційних установок давно вийшла за рамки виключно промислового нагріву. Так, зважаючи на всі переваги і значний технологічний прогрес в останні роки, індукційний нагрів стали використовувати в ремонтних технологіях [51-57] та в багатьох інших взаємопов'язаних галузях. Найбільш загальні способи застосування індукційного нагріву описані в роботах [26,30] ще в кінці 20-го століття.

Як було раніше зазначено, застосовувати індукційний нагрів в промисловості почали з плавки металів, а пізніше в автомобільній і авіаційній індустрії. Сьогодні його застосування поширюється на багато технологічних процесів, в тому числі попередній та постнагрів заготовок під гарячу штамповку різних сплавів [58], пайка і зварювання металів [59-64], поверхневе гартування [61], ювелірна справа, металообробка деталей різної форми і розмірів, різноманітні процеси, пов'язані з металами, композитними матеріалами і навіть діелектриками. Зазвичай на сайтах виробників індукційного обладнання [51,52,63,65-67] представлені приблизно однакові відомості про рівень температури необхідної для конкретної виробничої операції.

Як приклад виробничого процесу із застосуванням технології індукційного нагріву, можна привести підприємство, яке займається складанням конструкцій, де є трубні профілі. У складальному цеху встановлюють дві паралельно працюючі установки індукційного нагріву – одна для зварювання труб, а друга для зміцнення нових швів.

Інше промислове застосування індукційних систем пов'язано з роботами, які вимагають виділення високого рівня потужності: обробка матеріалів з використання поперечного магнітного потоку (взаємо розташування – індуктор над або під заготовкою), гартування залізничних рейок, прискорення полімеризації клею між металевими деталями. Зазвичай подібні установки

працюють з низькими температурами від 150°C до 300°C. На деяких підприємствах харчової промисловості використовують установки індукційного нагріву спеціальної конфігурації для герметизації алюмінієвих консервних банок. Індукційний нагрів алюмінієвого листа збільшує температуру ущільнювача, нанесеного на сторону кришки, яка знаходиться в контакті з банкою, що сприяє кращому зчепленню поверхонь.

В залежності від цільового застосування і матеріалу для нагріву, робоча частота силового перетворювача істотно відрізняється від декількох Гц для систем з високою потужністю, типових для плавки металів, до декількох сотень кГц для поверхневої теплової обробки. Виходячи з цього, для промислового нагріву на робочих частотах до 3 кГц і номінальних потужностях в кілька МВт в якості перетворювачів використовують напівпровідники – тиристори, а для робочих частот до 150 кГц і номінальних потужностей до 3 МВт зазвичай використовують транзистори різних конструкцій і внутрішнього наповнення.

У деяких випадках індукційний нагрів вимагає більш досконалих конструкцій установок і інструментів, які дозволять поліпшити характеристики нагріву і розширити сферу застосування технології. До цього випадку відноситься використання двочастотних генераторів [69], одночасне живлення індуктора струмами різної частоти для досягнення різних глибин проникнення. Одна частота зазвичай встановлюється в середньочастотному діапазоні (від 3 до 10 кГц), а інша у високочастотному діапазоні (від 200 до 400 кГц). Ці типи генераторів використовуються для зміцнення деталей з неправильною геометрією, наприклад, поверхні шестерень.

1.2.1 Індукційний нагрів для ремонту автомобільного транспорту

Ремонтні технології з використанням індукційного нагріву металів відносяться скоріше до групи промислових, але через те що представлена дисертаційна робота спрямована на аналіз можливостей підвищення

ефективності електромагнітних систем саме для ремонту автомобільного транспорту, тому виділимо їх окремо для детального розгляду.

Основна відмінність таких систем від традиційних методів ремонту [65-67,70] полягає в повній відсутності джерел відкритого вогню при обробці деталей. Ця обставина, в першу чергу, попереджає будь-які можливі загоряння в ремонтних майстернях і всі наслідки з ними пов'язані. Перелік ремонтних операцій можливих з системами індукційного нагріву досить великий. Це складання-розбирання різьбових з'єднань (з'єднань з натягом) [55,70,71], вузлів з запресованими елементами (втулки) в результаті теплового розширення і ослаблення зв'язків між конструкційними елементами. Нагрівання шестерень і підшипників перед посадкою [54,67], з'їм наклейок, молдингів, скла на автомобілях за рахунок розм'якшення клейового шару і багато інших операцій в залежності від конфігурації інструменту і конкретної необхідності. Зі списку переваг технології її локальність застосування і мінімальне розсіювання теплової енергії поза робочої області допускає повторне використання деталей після обробки, оскільки не деформує їх безповоротно [72].

На ринку пропозицій сучасних методів ремонту технології з використанням індукційного нагріву з'явилися зовсім недавно. Така інформація про ремонтне обладнання європейських виробників з'явилася в Інтернеті не раніше 2009 – 2010 року [70,71]. Електротехнічні компанії України представили свої розробки тільки в 2014 – 2015 роках [70]. В цей же час інформація про авторські розробки систем індукційного нагріву для ремонту автомобільного транспорту з'явилася на веб-сайті Лабораторії електромагнітних технологій (далі, ЛЕТ) ХНАДУ [73].

Слід зазначити, що реклама систем індукційного нагріву американськими компаніями з'явилася дещо раніше. Так, наприклад “Induction heating system” представляє в Інтернеті свої розробки вже більше ~ 15 років [74,75]. Однак їх не можна розглядати як пристрої призначені для ремонтних технологій саме автомобільного транспорту. Цілеспрямованість цих пропозицій можна було б узагальнити і на відновлення елементної бази транспортних засобів, але тільки

після суттєвої конструктивної переробки. У ремонтній спеціалізації пропозиції американських виробників обладнання для індукційного нагріву з'явилися значно пізніше [76].

В цілому, проведений аналіз технологій індукційного нагріву та інструментів для їх реалізації дозволяє вказати на реальну можливість збільшити амплітуди вихрових струмів і швидкість виконання виробничої операції при незмінному рівні енергоспоживання за рахунок введення додаткових феромагнітних сердечників до конструкції інструментів. Фізично це рішення дозволяє знизити розсіювання збуджуваних електромагнітних полів і сконцентрувати їх локальну спрямованість в задану область оброблюваного металу.

1.3 Магнітно-імпульсне притягання в електромагнітних технологіях ремонту автомобільних транспортних засобів

Магнітно-імпульсна обробка металів (далі, МІОМ) є галуззю машинобудування з використанням імпульсних або високочастотних технологій формування, об'єднаних загальним принципом дії, суть якого полягає в силовому впливі імпульсних електромагнітних полів на провідні заготовки. В роботі [77] була дана історична перспектива розвитку традиційних технологій МІОМ і були підкреслені досягнення в області моделювання, проектування котушок, формування листового металу, формування труб, обтиску, зварювання, різання, калібрування пружин і гібридних процесів, включаючи магнітно-імпульсні методи. Крім того, було відзначено, що хороша електропровідність металу заготовок є основною вимогою для ефективної роботи «класичної» МІОМ. Практично, останнє зауваження означає використання досить високих частот діючих електромагнітних полів. Всі застосування, розглянуті в [77], засновані на відштовхуючій дії сил Лоренца між інструментом електромагнітної формовки (далі, ЕМФ) і провідною заготовкою. У такій конфігурації інструмент і інші пристосування (формуєча головка, форма, з якою заготовка зварюється або

обтискається, ріжуча кромка, яка розрізає заготовку) розташовані з протилежних сторін заготовки. Але є ще одна конфігурація процесів ЕМФ, де заготовка притягається до робочої поверхні інструменту. Це новий напрямок наукового і практичного розвитку сучасної магнітно-імпульсної обробки металів.

1.3.1 Притягання за суперпозиції високочастотних та низькочастотних електромагнітних процесів

Перша фундаментальна пропозиція електромагнітного притягання металів була сформульована ще в середині минулого століття. У 1965 році Г. Фюрт запатентував процес ЕМФ із багатовитковою котушкою і додатковим розімкненим витком [78].

Магнітне поле багатовиткової котушки було досить повільним і, отже, проникало крізь провідну листову заготовку. Після того, як індукований струм досягав певного значення, додатковий розімкнутий виток електрично замикався розрядною дугою. Високочастотне поле, збуджене струмом витка, нівелювало низькочастотне поле з боку заготовки, зверненої до котушки. В результаті, магнітний тиск на поверхню заготовки з боку котушки був відсутній, а тиск від проникнення магнітного поля на протилежну сторону заготовки притягував її до котушки.

Виходячи з узагальнюючих фізичних уявлень, описаний процес складається із генерації двох частот розряду: низьких та високих. Високочастотний розряд усуває низькочастотне поле з боку заготовки, зверненої до котушки, в той час як низькочастотне поле, що проникає крізь товщину листового металу, штовхає його до багатовиткової котушки.

Цей фізичний принцип був покладений в основу цілого ряду конструкцій електромагнітних інструментів. Авторами роботи [79] був запропонований інструмент електромагнітного видалення вм'ятин з провідних матеріалів, до обмотки якого подавалися високочастотні і низькочастотні імпульси. Їх суперпозиція створювала необхідну часову форму силового впливу на

оброблюваний об'єкт. В [80] запропонована система з двох котушок і портативного генератора імпульсів, що збуджують як відштовхуючі, так і притягаючі сили для корекції як увігнутих, так і опуклих областей вм'ятини. В [81] запропонована електронна система, здатна формувати імпульс, що складається зі швидких і повільних частот, найбільш прийнятних для видалення вм'ятин. Остання успішно апробована конструкція електромагнітних систем притягання з двома робочими частотами була розроблена інженерами американських фірм «Electroimpact» і «Fluxtronic» [82,83]. Дані пристрої призначені для видалення вм'ятин на панелях корпусів пошкоджених аеропланів. Їх відмінна риса – це робота в режимі багаторазового повторення силових впливів. Практичні можливості «Електромагнітний видалач вм'ятин» (далі, ЕВВ) «Electroimpact» і «Fluxtronic» дозволяють успішно вирівняти алюмінієві листи товщиною ~ 2 мм. Виходячи з очевидних фізичних міркувань, представлені ЕВВ не зможуть працювати з феромагнетиками. Вплив їх магнітних властивостей буде означати, що інтенсивність проникнення полів зменшується і, як наслідок, сили притягання падають.

Ще один спосіб притягання листового металу магнітним полем багатовитковою котушкою був запропонований Г. А. Шнеєрсоном у 1981 році. Спосіб заснований на різкому перериванні повільно наростаючого струмового імпульсу [84]. В цьому випадку проникаюче електромагнітне поле створює сили притягання. Слід зазначити, що цей підхід аналогічний описаним раніше двочастотним методам, хоча і виглядає набагато простіше. Однак, його ефективність залежить від того, наскільки швидко може бути перерваний струмовий імпульс, що протікає у котушці. Узагальнення вищенаведеного розгляду призводить до висновку: основні недоліки всіх двочастотних пропозицій полягають в їх дуже складній технічній реалізації, використанні багатокомпонентної силової електроніки, необхідної для синхронізації різних часових процесів тощо. В результаті має місце висока собівартість виробленого обладнання (згідно з даними «Electroimpact» вартість комплектуючих становила $\sim 40 \div 60.000$ \$).

1.3.2 Інструменти притягання феромагнетиків низькочастотними електромагнітними полями

Концепція одночастотного притягання листового металу вперше була описана в [85,86] для феромагнітних металів. Явище, яке послужило основою даної пропозиції, було зафіксовано вченими НТУ «ХПІ» у 2004 році під час експериментів з магнітно-імпульсного впливу на тонку металеву пластину. Ця пропозиція (але вже конструктивно оформлена) знайшла практичне застосування в пристроях для видалення вм'ятин на автомобільних кузовах, де більшість зовнішніх панелей виготовлені з низьковуглецевої сталі.

Виявлене явище було покладено в основу винаходу [87]. Аналогічна патентна заявка була описана в [88], де автори представили конкретні конструкції котушок, джерела потужності, а також практичні аспекти видалення вм'ятин на автомобільних панелях. Слід додати, що концерн «Betaginnovation», представники якого є заявниками патенту, до останнього часу на своєму сайті рекламував технічний комплекс під назвою «Магнітний видалач вм'ятин» (далі, MBV) [71]. Одночастотні експерименти, спочатку описані в [89], показали, що напрямок електромагнітного тиску для заготовок з листового феромагнетика залежить від частоти розряду. При певному її значенні силовий вплив змінював свій напрям. Для високих частот мало місце відоме Лоренцеве відштовхування, а для низьких частот спостерігалось притягання. Формально допустимий діапазон низьких частот для притягання феромагнетиків був зафіксований в роботах [85,86]:

$$\omega \ll \frac{1}{\mu \cdot \gamma \cdot d^2}, \quad (1.1)$$

де $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота процесу,
 f – робоча частота,
 μ – магнітна проникність металу,

γ – електропровідність листового металу,

d – товщина листового металу.

Слід зазначити, що формула (1.1) забезпечує тільки верхню межу частоти, де можна очікувати притягання. Фактична гранична частота між притяганням і відштовхуванням може бути на порядок нижче. Фізично, формулу (1.1) можна додатково інтерпретувати в такий спосіб: вона пов'язує товщину листового металу з величиною скін-шару для даної частоти. Після нескладного перетворення нерівність (1.1) можна представити у вигляді [90]:

$$\frac{d}{\delta} \ll \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (1.2)$$

де δ – значення скін-шару.

З фізичної точки зору формули (1.1) і (1.2) дають приблизне уявлення про те, яка частина енергії магнітного поля, що залишилася в заготовці, йде на збудження вихрових струмів і сил Лоренца, але без урахування будь-якого впливу магнітних сил притягання. Слід підкреслити, що формули (1.1) і (1.2) ілюструють наближені умови, коли інтегральна дія сил Лоренца дуже мала і притягання можливо. Найчастіше їх виконання досить для необхідних інженерних оцінок. Принципово, застосовність вперше запропонованого способу притягання феромагнітних заготовок, показана в [86], заснована на трьох фундаментальних твердженнях. Перше полягає в пригніченні природних сил відштовхування Лоренца. Друге це збудження сил притягання, викликаних впливом магнітних властивостей листових заготовок. Третє твердження полягає в створенні умов, коли магнітні сили притягання переважають сили відштовхування Лоренца. В цілому три сформульованих вище твердження забезпечують притягання листових феромагнетиків низькочастотними електромагнітними полями.

Для підвищення ефективності запатентованої індукторної системи, як інструменту для притягання листового феромагнетика, вводяться два основні компоненти (рис. 1.1.).

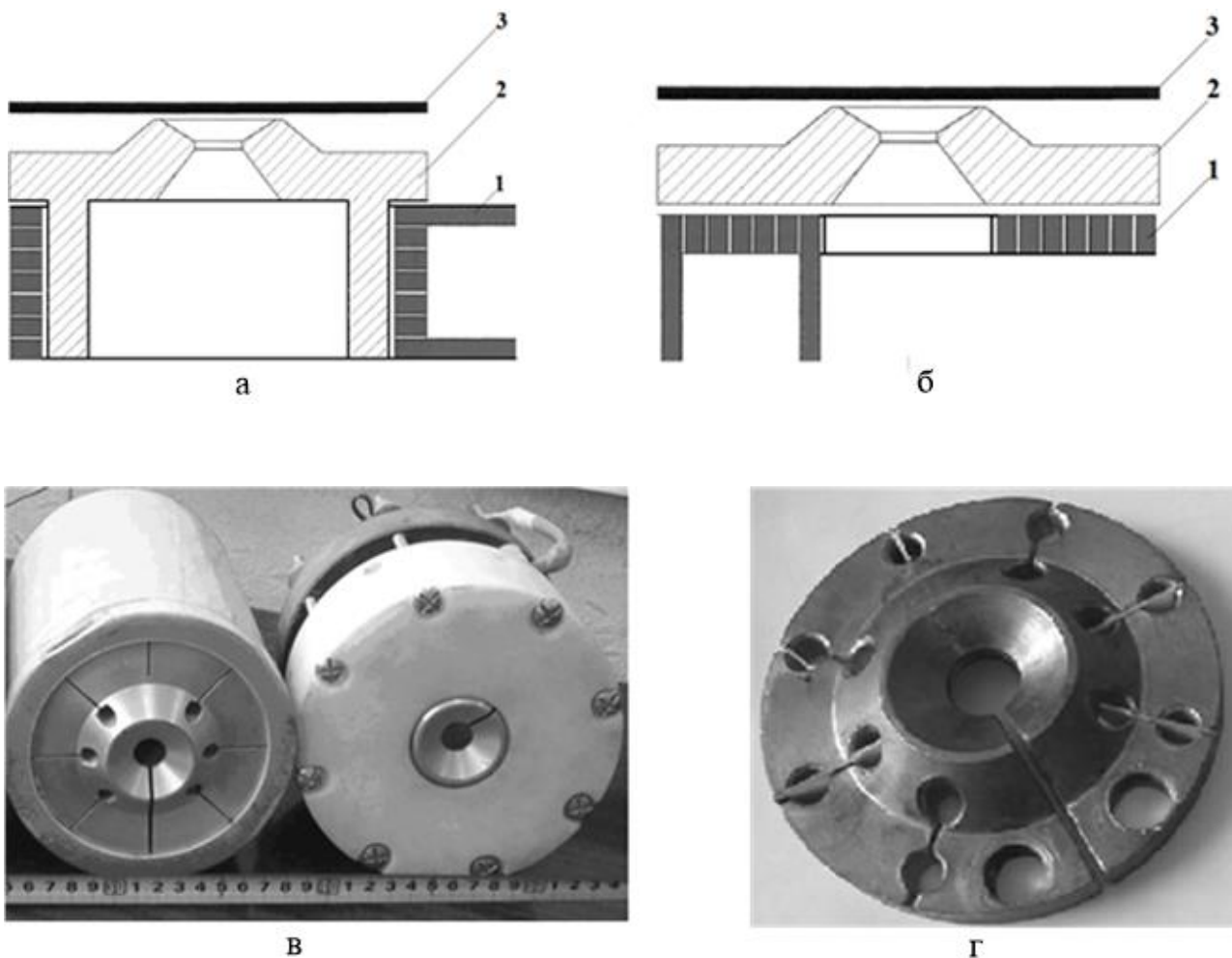


Рис. 1.1. Узгоджувальний пристрій різного конструктивного виконання:

- а) принципова схема «узгоджувального циліндричного пристрою»,
- б) принципова схема «узгоджувального дискового пристрою»,
- 1 – первинна обмотка, 2 – одновитковий індуктор, 3 – листовая заготовка,
- в) фотографії з циліндричними і дисковими конструкціями,
- г) одновитковий індуктор з конічним внутрішнім отвором

Це одновитковий індуктор (рис. 1.1.г) та узгоджувальний пристрій [89,91]. Виходячи з їх фізичної сутності, останній – це звичайний імпульсний повітряний трансформатор. Він може мати дві різні конструкції. Перша з них має багатовиткову первинну обмотку на зовнішній поверхні полого довгого металевого циліндра (з поздовжнім розрізом), що грає роль вторинної обмотки. Первинна обмотка підключена до джерела живлення. Вторинна обмотка навантажується одновитковим індуктором. Такий тип конструкції узгоджувального пристрою отримав назву «узгоджувальний циліндричний пристрій» (рис. 1.1.а, в ліворуч) [89]. Інший тип узгоджувального пристрою має багатовитковому плоску спіральну обмотку, що розміщується через ізолюючу вставку на плоскій поверхні одновиткового індуктора. Такий тип конструкції отримав назву «узгоджувальний дисковий пристрій» (рис. 1.1.б, в справа) [91]. Призначення трансформатора полягає в тому, щоб збільшити струм індуктора при збереженні електромагнітної енергії від джерела живлення.

Що стосується узгоджувальних дискових пристроїв, то первинна обмотка зазнає великих електродинамічних зусиль, що відштовхують її від масивного одиночного витка вторинної обмотки. Їх дія послаблює електромагнітний зв'язок між обмотками, зменшує струм в одновитковому індукторі і, як наслідок, зменшує зусилля притягання. Зрештою, сили відштовхування руйнують котушку первинної обмотки. Щоб уникнути цих негативних ефектів, можна встановити, так званий, демпфуючий пристрій. Два відповідні рішення були запропоновані і запатентовані авторами роботи [92].

Розроблений інструмент для притягання феромагнетиків був випробуваний в спеціальному експерименті з різними зразками з листової сталі. Перша частина проведеного експерименту полягала в створенні магнітно-імпульсним притяганням двох опуклостей на гладкій поверхні пластин товщиною $\sim 0,008$ м. Одна з них буде об'єктом для подальшого видалення, але вже як вм'ятина, а друга залишиться для порівняння. Обидві опуклості мали напівсферичну форму діаметром $\sim 0,015$ м і глибиною $\sim 0,002$ м. У наступній частині експерименту пластини переверталися. Пластини поміщали на плоску

ізолювану поверхню індуктора, так що одна з вм'ятин виявилася навпроти внутрішнього вікна індуктора. Видалення вм'ятин здійснювалося магнітно-імпульсним притяганням. Після п'ятикратного силового впливу ця вм'ятина практично зникла. Поверхня листа, де вона була розташована, стала досить гладкою. Тут слід зазначити доволі цікаву обставину. Подальше магнітно-імпульсне притягання може привести до появи опуклості з протилежного кривизною по відношенню до вихідної. Таким чином, цей експеримент продемонстрував можливість контрольованого деформування заданої ділянки листового металу.

Один з експериментальних зразків з вихідними і віддаленими вм'ятинами показаний на рис. 1.2.

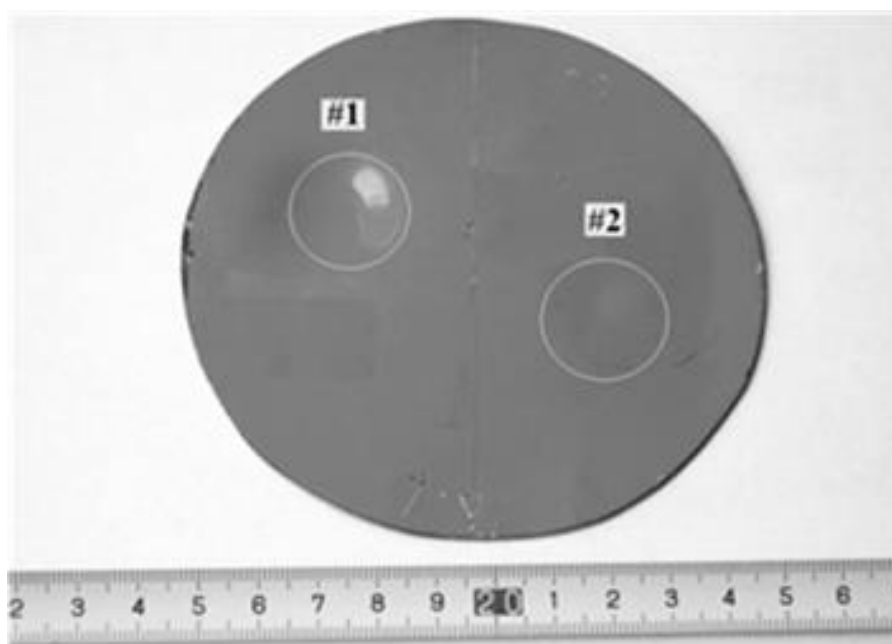


Рис. 1.2. Експериментальний зразок з листової сталі а / м «Mitsubishi»:
№ 1 – вм'ятина, отримана магнітно-імпульсним притяганням на заданій ділянці листа, № 2 – частина поверхні листа з віддаленої вм'ятиною

1.3.3 Низькочастотні електромагнітні інструменти притягання немагнітних металів

Для кращого розуміння слід виходити з основних тверджень, що забезпечують працездатність запатентованого способу магнітно-імпульсного притягання немагнітних металів [93] у порівнянні із попереднім розглядом для феромагнетиків [86].

Як і раніше, перше твердження полягає в пригніченні природних сил відштовхування Лоренца. Ця проблема може бути вирішена відповідним вибором низькочастотного часового режиму (формули (1.1) – (1.2)). Друге твердження про дієвість полягає у збудженні сил притягання. У попередній пропозиції це були сили, обумовлені магнітними властивостями деформованого феромагнетика. Пропонований спосіб для немагнітних металів використовує відомий закон Ампера, згідно до якого односпрямовані струми відчують взаємне електродинамічне притягання. Для практичної реалізації цієї пропозиції необхідно ввести допоміжний екран до конструкції інструмента. Цей додатковий конструктивний елемент повинен бути розміщений паралельно поверхні листа, який деформується. Струми, індуковані в металі екрану і листовій заготовці, будуть відчувати взаємне притягання. Інструмент притягання описаного принципу дії був названий «Індукторна система з притягаючим екраном» (далі, ІСПЕ). Конструктивна особливість першого варіанту ІСПЕ полягала в тому, що одновитковий індуктор знаходився між заготовкою з листового металу і допоміжним притягаючим екраном [93].

У внутрішньому просторі між екраном і заготовкою, інтенсивності магнітних полів, які збуджуються односпрямованим індукованими струмами, спрямовані протилежно. Вони віднімаються одна від одної. Результуюча магнітна напруженість буде зменшуватися і в ідеалізованому випадку вона прагне до нуля.

Поза цієї системи напруженості збуджуваних магнітних полів мають однакові напрямки. Вони підсумовуються. Отримана напруженість зовнішніх

магнітних полів буде зростати, і прагнути до подвоєного значення напруженості поля, що збуджується окремо кожним з індукованих струмів (ідеалізований випадок). Таким чином, внутрішнє магнітне поле падає, але зовнішнє поле зростає. Як наслідок, магнітний тиск зовні стане причиною притягання листової заготовки до нерухомого екрану. Як правило, відповідний напружений стан індукторної системи, обумовлений силами притягання Ампера, можна визначити як «стиснення». Але крім сил притягання, що відповідають закону Ампера, збуджуються також сили відштовхування Лоренца. Їх дія обумовлена підсумовуванням інтенсивностей магнітних полів індукованих струмів і струму індуктора у внутрішньому просторі і відніманням цих інтенсивностей поза індукторної системи. Таким чином, сили Лоренца, що діють на екран і листову заготовку зсередини, перевищують сили, що діють зовні. Досить умовно відповідний напружений стан системи індуктора, обумовлений силами відштовхування Лоренца, можна визначити як «розширення». В інтегралі, якщо «стиснення» переважає над «розширенням», представлена ІСПЕ буде працювати як інструмент притягання листових заготовок з металів будь-якої електрофізичної природи (як феромагнетиків, так і не феромагнетиків). В цілому, всі інші цитовані патенти ІСПЕ спрямовані на підвищення їх ефективності.

Розміщення одновиткового індуктора в заглибленні на екрані кінцевої товщини з боку оброблюваної заготовки запропоновано авторами [94]. Дана модифікація конструкції вимагає обмеження робочої частоти найменшим значенням:

$$f \ll \frac{1}{\pi \cdot D^2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_s} \quad \text{або} \quad f \ll \frac{1}{\pi \cdot d^2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_b}, \quad (1.3)$$

де D, d – товщина екрана та заготовки відповідно,

γ_s, γ_b – питома провідність екрана та заготовки відповідно.

Мета винаходу [95] полягає в збільшенні амплітуд діючих полів. Автори запропонували круговий індуктор, який повинен складатися з двох окремих концентричних кілець з двома протилежними прорізами уздовж діаметральної осі. Кільця повинні бути з'єднані таким чином, щоб забезпечити односпрямовані струми у внутрішніх витках кільця при підключенні індуктора до джерела живлення.

Новизна роботи [96] полягає в пропозиції по вибору геометрії екрану. Його товщина залишається незмінною за поперечним перерізом і може бути визначена з нерівності: $D \ll \delta$, де δ – значення скін-шару.

В [97-99] представлений метод магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою індукторною системою з тонким екраном. Різниця в цитованих патентах полягає у конструктивному виконанні котушок. Сутність новизни полягає в тому, що індуктор сконструйований як дві плоскі котушки. Одна з них розміщена під екраном з боку заготовки. Друга – над екраном. Струм в котушках тече в одному напрямку. Збуджувані поля підсумовуються. Як і в попередньому патенті, товщина допоміжного екрану вибирається однаковою по всьому поперечному перерізу. На відміну від попередніх пропозицій в [100,101], індуктор представлений одновитковою [100] або багатовитковою плоскою котушкою [101]. Він розміщується на зовнішній поверхні допоміжного екрану. Дане рішення дозволяє послабити сили відштовхування Лоренца між струмом, індукованим в металі заготовки, і струмом в індукторі. Це відбувається через екранування їх один від одного провідним допоміжним екраном. Крім того, зовнішнє розміщення котушки індуктора дозволяє конструктивно збільшити силу інструменту притягання в цілому. Ще одна перевага – можливість розмістити всю конструкцію, включаючи обмотку індуктора і допоміжний екран в закритому корпусі [101], як це представлено на рис. 1.3.

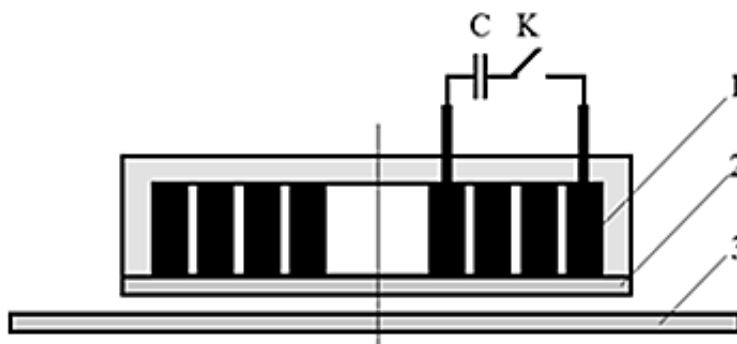


Рис. 1.3. Схематичне представлення ІСПЕ із зовнішньою плоскою багатовитковою обмоткою індуктора:
1 – обмотка, 2 – екран, 3 – листова заготовка

Говорячи про застосування, слід зазначити, що робочий інструмент притягання може бути дуже зручним для зовнішнього безконтактного рихтування кузова автомобіля або літака (без розбирання), а також в машинобудуванні, де обробку заготовки можна виконувати тільки з одного боку.

Основна відмінність представлених нижче винаходів від запропонованих циліндричних конструкцій полягає в прямокутній формі індукторів, що використовуються в якості генераторів магнітного поля. Необхідні частоти з [94] такі ж самі і для [102], але індуктор, розташований між екраном і заготовкою, виконаний у вигляді двох компланарних петель прямокутної форми, електрично з'єднаних послідовно одна з одною. Їх струмопроводи, що обмежують робочу область, паралельні. Одновитковий прямокутний індуктор, запатентований в [103], розміщений між екраном і заготовкою, яка має два розрізи уздовж осі симетрії, вони ділять її на дві окремі гілки, послідовно або паралельно з'єднані одна з одною. Ця конструкція дозволяє регулювати індукцію, в залежності від згаданого вище розгалуження з'єднань окремих гілок і амплітуд збуджуваних полів. Пропозиція в [104] ідентична запатентованій пропозиції в [97-99]. Основна відмінність і суттєва новизна полягають в тому, що індуктор сконструйований як дві одновиткові плоскі прямокутні котушки. Але так само, як в [97-99], один з них розміщений під екраном з боку заготовки. Другий – над екраном. Струм в котушках тече в одному напрямку. Збуджувані поля

підсумовуються. Остання варіація геометричної форми індуктора (у порівнянні з рішенням в [100]) запатентована авторами [104]. На відміну від попередніх тверджень з прямокутними індукторами, ця пропозиція полягає в розміщенні прямокутного одновиткового індуктора не між екраном і листової заготовкою, а повністю над допоміжним екраном (рис. 1.4).

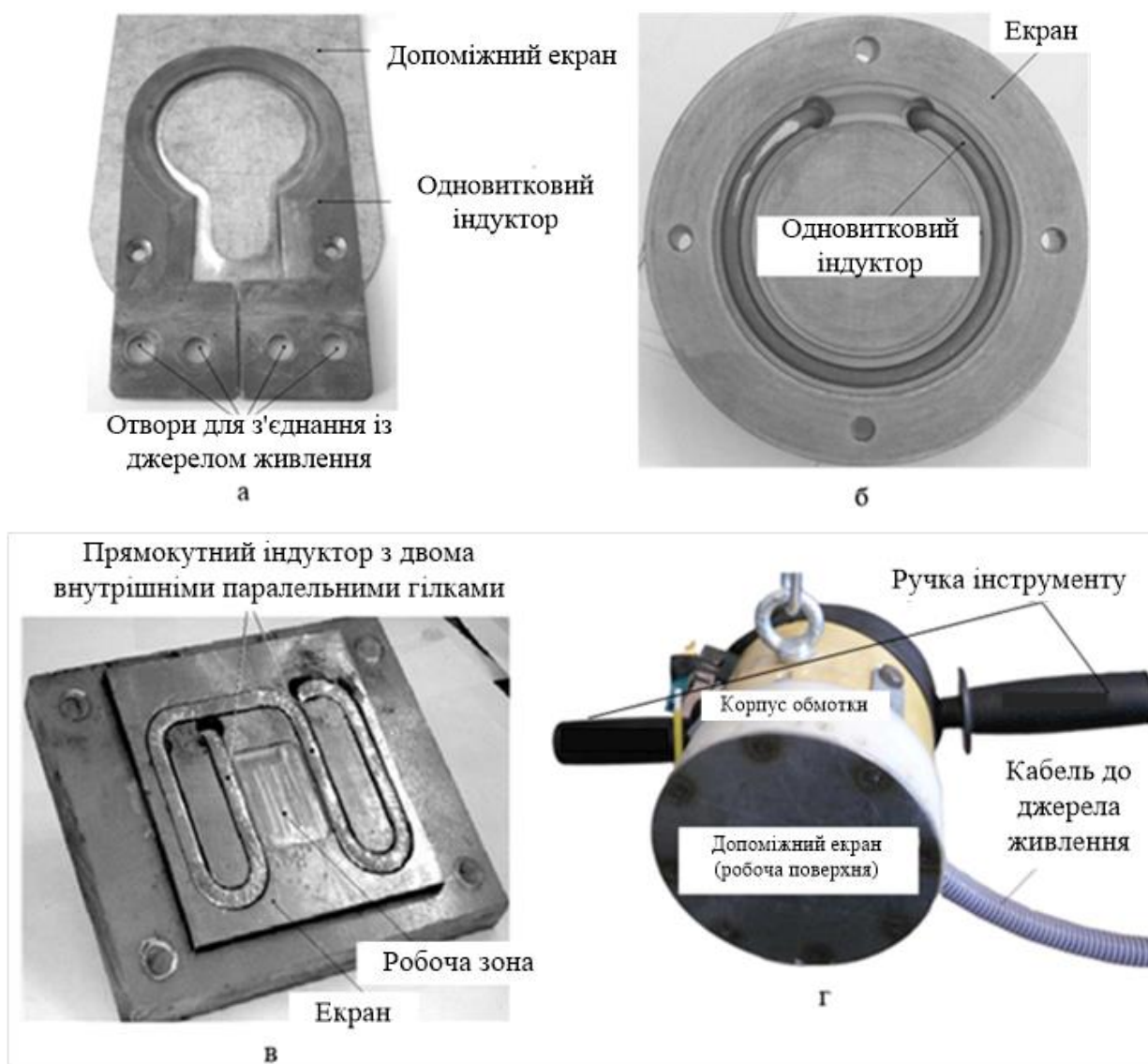


Рис. 1.4. Експериментальні моделі ІСПЕ:

а) перша конструкція для експериментів, б) круговий одновитковий індуктор у заглибленні на поверхні екрану, в) прямокутний індуктор з двома внутрішніми паралельними гілками, г) конструкція із зовнішньою плоскою багатовитковою обмоткою в збірці

Узагальнюючи представлені винаходи ІСПЕ в якості інструментів для роботи з тонкостінними металами, слід додати, що всі описані конструкції були випробувані в експериментах, які підтвердили їх працездатність. Деякі результати їх експериментального тестування представлені на рис. 1.5.

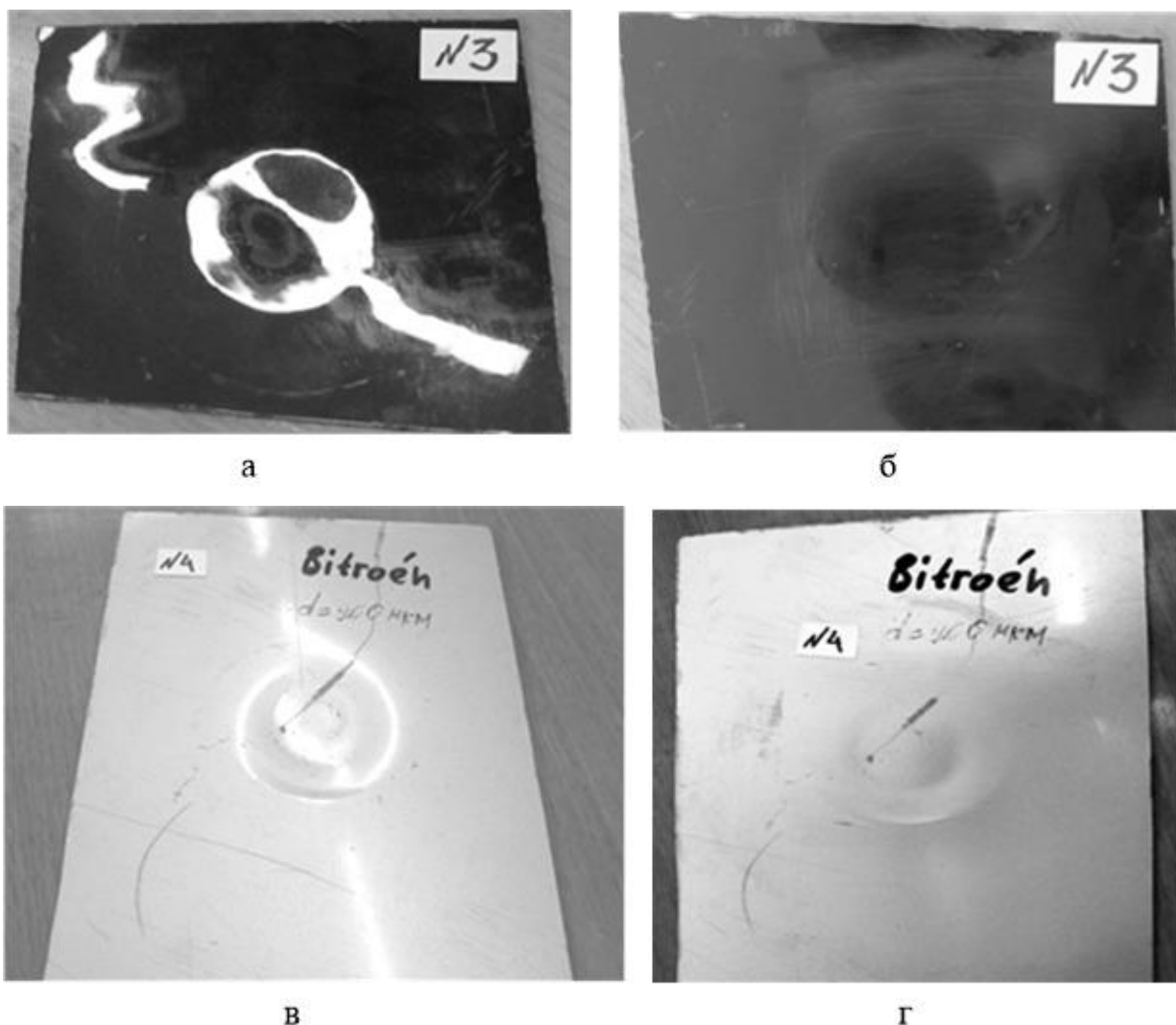


Рис. 1.5. Експериментальні зразки з різних автомобільних сталей:

а / м «Subaru»: а) до силового впливу, б) після притягання

а / м «Citroen»: в) до дії сили, г) після притягання

Експериментальні дослідження проводилися за допомогою магнітно-імпульсної установки – МІУС-2, створеної у ЛЕТ ХНАДУ і використовуваної в якості джерела потужності з накопиченої енергією ~ 2 кДж при максимальній напрузі ~ 2200 В і власною частотою $\sim 7,5$ кГц [73].

1.3.4 Магнітно-імпульсне притягання листових металів для видалення вм'ятин на поверхні кузова автомобіля

Патенти [101] і [105] присвячені практичному застосуванню магнітно-імпульсного притягання тонкостінних металів. В [101] описаний найбільш ефективний магнітно-імпульсний інструмент притягання (він був представлений раніше як ІСПЕ). Слід нагадати, що цей індуктор-інструмент для видалення вм'ятин з поверхні оброблюваного об'єкта виконується як складна система, що складається з багатовиткової котушки, яка грає роль трансформатора і допоміжного притягаючого екрану. Котушка розташована на зовнішній поверхні екрану. Його протилежна внутрішня поверхня – робоча поверхня інструмента, з якої розташована вм'ятина на листовому металі. Безперечною перевагою цієї конструкції інструменту є істотне зменшення сил відштовхування Лоренца за рахунок відділення струму котушки від струму, індукованого в оброблюваному листовому металі. В [105] представлений повний комплекс зовнішнього безконтактного магнітно-імпульсного вирівнювання, який включає в себе і інструмент, і джерело електромагнітної енергії.

Загалом обладнання для зовнішнього магнітно-імпульсного вирівнювання об'єднує раніше описані і запатентовані компоненти. Детальний опис подібних комплексів представлено в роботі [101], під назвою «Комплекс зовнішнього магнітно-імпульсного випрямлення», який містить віддалений портативний інструмент, що дозволяє обробляти будь-які необхідні частини листів з вм'ятинами.

Інтегральні характеристики інструментів силового впливу (з відповідним трансформатором або без цього компонента у ланцюгу зарядки) повинні обиратися таким чином, щоб забезпечити необхідну робочу частоту збуджуваних полів. Конструкції індукторних інструментів, параметри (незалежно від основної дії) і розташування на оброблюваному листовому металі повинні обиратися таким чином, щоб забезпечити високу ефективність, що гарантує проведення операції з видалення вм'ятин у відповідності з усіма

попередніми рекомендаціями. Слід додати, що місце розташування будь-якої індукторної системи має забезпечити найкращий електродинамічний зв'язок між оброблюваним листовим металом і інструментом для видалення вм'ятин. Далі представлена ілюстрація практичного магнітно-імпульсного видалення вм'ятин за допомогою описаного комплексу ІСПЕ. Перші фотографії (рис. 1.6.) це технологія ремонту автомобільної двері «Audi».

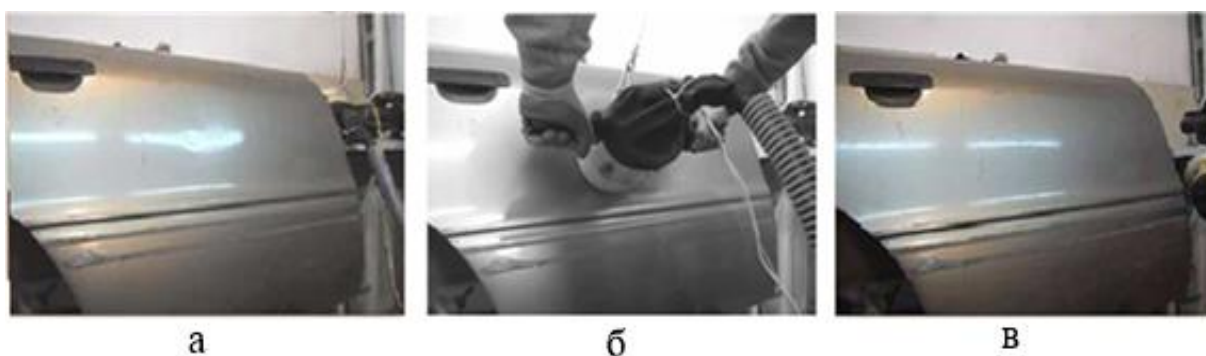


Рис. 1.6. Зовнішнє видалення вм'ятини в реальному процесі ремонту:

а) двері перед операцією, б) інструмент ІСПЕ в дії, в) двері після силового впливу

Наступні фотографії (рис. 1.7) ілюструють технологічний маршрут як алгоритм видалення вм'ятин на автомобільній двері «Subaru».

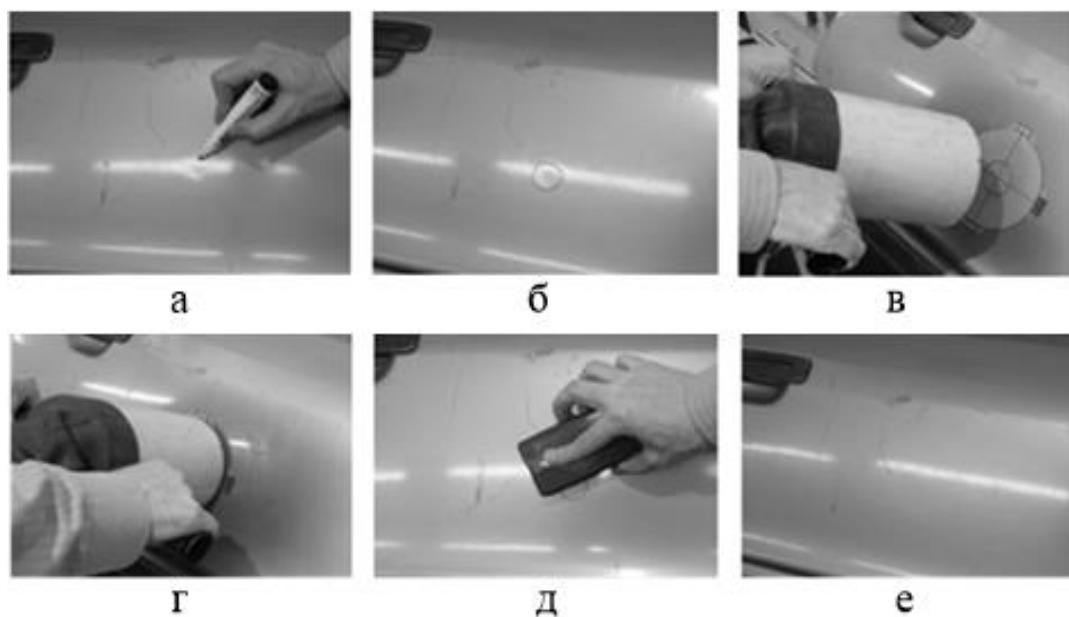


Рис. 1.7. Фотоілюстрації технологічного маршруту:

- а) визначення вм'ятини, б) маркування граничних розмірів,
в) фіксація інструменту над вм'ятиною, г) магнітно-імпульсний вплив
д) видалення маркера, е) панель двері автомобіля після силового впливу

1.3.5 «Пряме пропускання струму» для притягання листових металів

Публікації в сучасній науковій періодиці, присвячені дослідженням магнітно-імпульсного притягання при «прямому пропусканні струму» через задану ділянку оброблюваного листового металу, доволі нечисленні, це наприклад [106,107].

Магнітно-імпульсна система притягання з «прямим пропусканням струму» через оброблюваний об'єкт, як інструмент видалення вм'ятин в тонкостінних листових металах, була вперше представлена авторами роботи [106]. Інструментом системи є основний струмопровід (провідна смуга кінцевої ширини), розташований паралельно над об'єктом обробки (тонкостінний металевий лист з вм'ятиною). Робоча зона інструменту – область між листом і смугою, обмежена в поперечному напрямку її шириною. До джерела потужності інструмент і оброблюваний об'єкт підключаються контактним чином безпосередньо. Односпрямовані сторонні струми, що протікають в них,

відповідно до закону Ампера ініціюють силову взаємодію [108]. Якщо основний струмопровід системи жорстко зафіксований, то метал вм'ятини, що має поздовжні ступені свободи, буде притягатися до його площини.

Найбільш цікавими в цитованих роботах є такі виділені положення.

Запропоновано і практично апробовано конструктивне рішення по створенню інструменту магнітно-імпульсного притягання з «прямим пропусканням струму» для усунення вм'ятин в плоских листових зразках. Ефективність виконання заданої виробничої операції за допомогою задіяного обладнання виявилася недостатньою, повністю усунути вм'ятину в листовому зразку не вдалося [106].

Оцінки для системи з двох паралельних провідників з односпрямованим струмами показали можливість отримання досить високих амплітуд електродинамічного взаємного притягання [107].

Узагальнення результатів описаних досліджень показали необхідність більш ретельного підходу до вибору робочих частот струмових імпульсів, заснованого на аналізі електродинамічних процесів в інструменті магнітно-імпульсного притягання з «прямим пропусканням струму» через задану ділянку оброблюваного об'єкта. Реальну конструкцію інструменту для такого аналізу з достатнім ступенем строгості і адекватності можна уявити моделлю: «стрічка зі струмом над площиною тонкостінного листового металу».

З фізичних міркувань, крім робочих частот на ефективність притягання повинні впливати і інші фактори. В першу чергу, до таких слід віднести поперечний розподіл струму по провідній поверхні оброблюваного об'єкта і еквівалентний опір всієї системи. Зниження концентрації струму в робочій зоні за рахунок «розтікання» в поперечному напрямку тягне за собою падіння амплітуд сил притягання. Еквівалентний опір, як параметр елемента контуру в ланцюзі джерела потужності, визначає максимуми струмів, а, отже, і силові показники притягання.

Останній фактор залежить від конструктивного виконання інструменту магнітно-імпульсного притягання, яке в свою чергу визначається безліччю

обставин, які не підлягають реальним кількісним оцінкам. Так, опір має бути мінімальним, що дозволяє отримувати великі струми, але індуктивність повинна бути максимальною, що дозволяє концентрувати велику енергію в робочій зоні інструмента.

Висновки за розділом 1

1. Індукційний нагрів, що має незаперечні переваги в порівнянні із традиційними методами термообробки, є прогресивною екологічно чистою технологією обробки металів.

2. Поза сумнівами перспективність використання індукційного нагріву, що дозволяє успішно здійснити безконтактне роз'єднання жорстко посаджених і різьбових зчленувань, локальний нагрів заданих ділянок термообробки, безконтактне вирівнювання листових металів тощо.

3. Оцінки ефективності існуючих інструментів індукційного нагріву дозволяють вказати на можливість їх вдосконалення за рахунок введення феромагнітних сердечників до конструкції інструментів, що дозволить збільшити амплітуди вихрових струмів і продуктивність при незмінному рівні енергоспоживання.

4. Аналіз магнітно-імпульсних методів силового впливу, заснованих на притяганні заданих ділянок листових металів, показав затребуваність електромагнітних технологій відновлення транспортних засобів і необхідність їх подальшого розвитку за рахунок впровадження розробок нових конструкцій інструментів.

5. Аналіз дієвості інструментів безконтактного магнітно-імпульсного притягання, заснованих на прояві магнітних властивостей оброблюваних металів або на силовій взаємодії індукованих струмів, показав необхідність створення нових інструментів, де притягання можна здійснити за рахунок «прямого пропускання струму» через задану ділянку листового металу.

6. Висвітлюються фундаментальні винаходи в області магнітно-імпульсного притягання листових металів із використанням низькочастотних розрядів. Велика частина з них захищена українськими патентами і мало відома західним фахівцям в області магнітно-імпульсних технологій.

7. Представлені різні типи інструментів притягання, засновані на різних фізичних принципах і призначені для роботи з металами, що мають різні електрофізичні властивості. Вони можуть деформувати феромагнетики, такі як низьковуглецеві сталі і немагнітні метали, наприклад сплави алюмінію.

Представлене нововведення до магнітно-імпульсних установок, що використовуються як джерела енергії у складному обладнанні для ремонту автомобільних кузовів.

Запропоновано і успішно апробовано практичне застосування розроблених систем для видалення вм'ятин в листових металах.

В цілому ці роботи можна розглядати як новий науковий напрям і використовуватися для різних виробничих цілей, хоча основна увага приділяється практичному застосуванню в області ремонту автомобільних кузовів.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора: [4,8,9,18,20]

РОЗДІЛ II. ІНДУКЦІЙНІ ЕФЕКТИ ЗБУДЖУВАНІ У МЕТАЛЕВИХ ОБ'ЄКТАХ ПЛОСКИМ СОЛЕНІДОМ ІЗ ФЕРОМАГНІТНИМ СЕРДЕЧНИКОМ

Акцентуючи увагу на підвищенні ефективності інструментів індукційного нагріву, не буде зайвим ще раз підкреслити все зростаючу роль даного способу обробки металів у сучасній промисловості.

Досить великий перелік сучасних виробничих операцій, що успішно здійснюються із використанням індукційного нагріву, наведено в науковій монографії новосибірських вчених [109]. У технологіях ремонту транспортних засобів, де раніше використовували інструменти з джерелами відкритого вогню, все більшого застосування знаходять різного роду електротехнічні пристосування. Так, наприклад, концерном «Betaginnovation», запропонований цілий ряд пристроїв, що дозволяють усунути дрібні вм'ятини, розчленовувати металеві та пластмасові з'єднання, видалити наклейки тощо [71].

Інструментами індукційного нагріву, як правило, є соленоїди різної геометрії (котушки або одинарні витки). Намотування може провадитися як на діелектричні каркаси, так і на феромагнітні сердечники. В останньому випадку конструктивного виконання, як видається з апіорних фізичних міркувань, повинен рости рівень електромагнітного зв'язку між джерелом поля – соленоїдом і металом об'єкта обробки і, в свою чергу, повинна зростати ефективність власне індукційного нагріву [3,110]. Однак, роботи про вплив феромагнетиків на індукційні ефекти в сучасній науковій періодиці не освітлені.

Мета даних досліджень – аналіз електромагнітних процесів в металевих зразках при збудженні поля плоским соленоїдом з феромагнітним сердечником. Отримані оцінки представляють практичний інтерес для створення ефективних систем індукційного нагріву в прогресивних технологіях ремонту автомобільного транспорту.

2.1 Об'єкт нагріву – масивний металевий зразок

Представлений розгляд присвячено теоретичним дослідженням процесів індукційного нагріву металевих об'єктів, геометричні розміри яких є досить великими в порівнянні з величиною скін-шару. Як відомо, остання характеристика визначається часовими параметрами електромагнітного поля, питомою електропровідністю і магнітною проникністю оброблюваного металу. Зазначене визначення «масивності» є вельми відносним, і використовується в електродинамічних задачах для можливого спрощення відповідних алгоритмів їх вирішення (наближення нескінченно протяжного середовища). В іншому випадку досить малих розмірів металевих об'єктів, в порівнянні з глибиною проникнення поля, як правило, застосовуються методи розрахунку, в яких об'єкт обробки представляється ідеально провідним.

2.1.1 Розрахункова модель. Постановка задачі

Основним результатом повинна стати оцінка впливу магнітних властивостей матеріалу, що становить основу для обмотки плоского кругового індуктора – джерела збуджуваного поля, на електромагнітні процеси в масивному металевому зразку. У зв'язку з цим, для виділення визначального фактору впливу, реальну систему можна представити адекватною моделлю з двох середовищ з різними електрофізичними характеристиками, в одній з яких безпосередньо розташований індуктор. Реально, щоб уникнути вихрових струмів, основа його обмотки виконується або з пластичного діелектрика, або шихтованої сталі, або з фериту. Дана обставина дозволяє вважати середу з індуктором непровідною, але такою що володіє в тій чи іншій мірі магнітними властивостями. Друге середовище, де збуджуються індуковані струми, – це метал з довільними електрофізичними характеристиками.

Графічно, прийнята модель представлена на рис. 2.1.

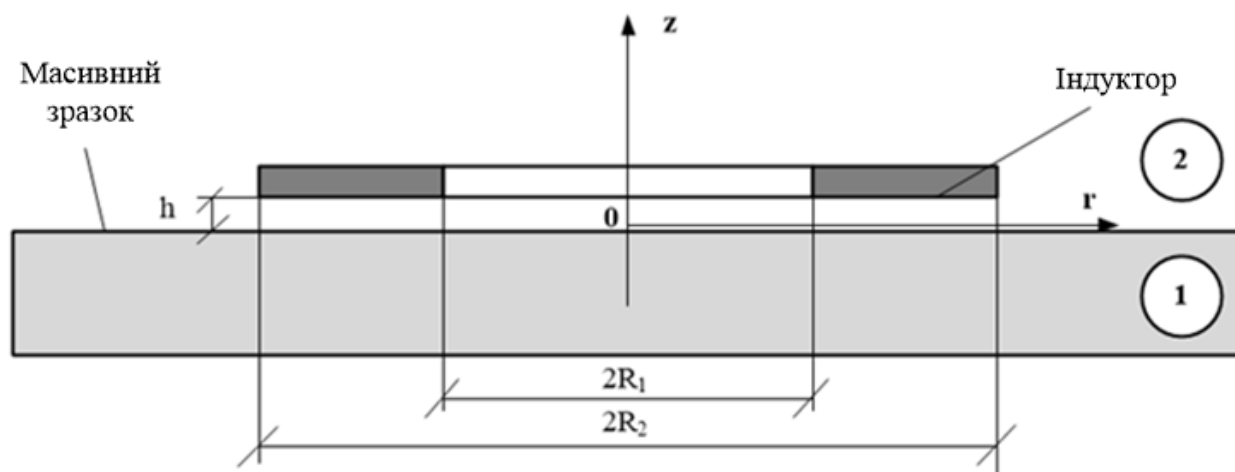


Рис. 2.1. Розрахункова модель у циліндричній системі координат:

1 – провідне магнітне середовище $\gamma_1 \neq 0$, $\mu_{r1} > 1$;

2 – непровідне магнітне середовище $\gamma_2 = 0$, $\mu_{r2} > 1$

Рішення задачі проведемо аналогічно роботам [90,111,112], де досить докладно викладено застосовуваний математичний апарат. Найбільш докладний опис його особливостей можна знайти в довідковому керівництві [113].

Постановка задачі, формулювання припущень.

1. Напівпростір – 1, $z \in (-\infty, 0]$, провідне магнітне середовище – метал з питомою електропровідністю $\gamma_1 \neq 0$ і відносною магнітної проникністю $\mu_{r1} > 1$.

2. Напівпростір – 2, $z \in [0, +\infty)$, непровідне (діелектричне) магнітне середовище з питомою електропровідністю $\gamma_2 = 0$ і відносною магнітної проникністю $\mu_{r2} > 1$.

3. Має місце азимутальна однорідність $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$.

4. Круговий індуктор з «w» витків, малою товщиною яких можна знехтувати, що не впливає на електромагнітні процеси в системі, розміщений над границею поділу виділених середовищ на висоті $z = h$.

5. У індукторі протікає рівномірно розподілений по радіусу гармонічний у часі струм із густиною $j_i(t)$. Його робоча частота – ω задовольняє

умові квазістаціонарності: $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$, де c – швидкість світла у вакуумі,
 l – найбільший характерний розмір системи.

2.1.2 Інтегрування рівнянь Максвелла та аналіз електромагнітних процесів

Рівняння Максвелла для ненульових складових напруженостей електромагнітного поля, перетворених за Лапласом з урахуванням нульових початкових умов, мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z), \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu \cdot p \cdot H_z(p, r, z), \end{array} \right. \quad (2.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu \cdot p \cdot H_z(p, r, z), \end{array} \right. \quad (2.3)$$

де p – параметр перетворення Лапласа,

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, μ_r – відносна магнітна проникність середовища,

$$E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\},$$

$$H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\},$$

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\}.$$

У загальному випадку густина струму у правій частині рівняння (2.1) записується наступним чином:

$$j_\varphi(p, r, z) = (p\varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_\varphi(p, r, z) + j_{\varphi i}(p, r, z), \quad (2.4)$$

де $j_{\varphi i}(p, r, z)$ – густина стороннього струму в індукторі,

$$j_{\varphi i}(p, r, z) = j_i(p) \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \cdot \delta(z - h), \quad (2.5)$$

$$j_i(p) = L\{j_i(t)\}, \quad j_i(p) = \frac{I(p)}{R_2 - R_1},$$

$j_i(t)$ – амплітудно-часова залежність густини збуджуючого струму,

$\eta(r)$, $\delta(r)$ – ступінчаста функція Хевісайда і дельта-функція Дірака, відповідно;

γ – питома електропровідність середовища зі струмом,

ε_0 – діелектрична проникність вакууму.

Позначимо області з однорідними електрофізичними характеристиками:

а) область 1, магнітний метал, $z \leq 0$, з питомою електропровідністю $\gamma_1 \neq 0$ і відносною магнітною проникністю – $\mu_{r1} > 1$;

б) область 2, магнітний діелектрик, $z \geq 0$, з питомою електропровідністю $\gamma_2 = 0$ і відносною магнітною проникністю – $\mu_{r2} > 1$.

Із системи рівнянь Максвелла (2.1) – (2.3) можна отримати диференціальні рівняння для азимутальної компоненти напруженості електричного поля, які після інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя, приймають вид:

а) область 1, магнітний метал, $z \leq 0$

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - q^2(p, \lambda) \cdot E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = 0, \quad (2.6)$$

де $E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z)$ – Фур'є-Бесселів L-образ азимутальної компоненти напруженості електричного поля в області – 1,

$$E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = \int_0^{\infty} E_{\varphi}^{(1)}(p, r, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) r dr,$$

λ – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя,

$J_1(\lambda \cdot r)$ – функція Бесселя 1го порядку,

$q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p(\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1}$ – параметр, що має фізичне значення

хвильового числа,

$F(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r J_1(\lambda \cdot r) dr$ – Фур'є-Бесселев образ функції рівномірного

радіального розподілу струму в індукторі.

Загальний інтеграл рівняння (2.6), що задовольняє умові обмеженості для $z \rightarrow -\infty$, має вид:

$$E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = A(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)z}, \quad (2.7)$$

де $A(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування;

б) область 2, магнітний діелектрик, $z \geq 0$

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z - h), \quad (2.8)$$

де $E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z)$ – Фур'є-Бесселів L-образ азимутальної компоненти напруженості електричного поля в області – 2,

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = \int_0^{\infty} E_{\varphi}^{(2)}(p, r, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) r dr,$$

λ – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя,

$J_1(\lambda \cdot r)$ – функція Бесселя 1го порядку,

$$K(p, \lambda) = (\mu_0 \mu_{r2}) \cdot p \cdot j_i(p) \cdot F(\lambda),$$

$$F(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r J_1(\lambda \cdot r) dr \quad - \quad \text{Фур'є-Бесселів образ функції рівномірного}$$

радіального розподілу струму в індукторі.

Загальний інтеграл рівняння (2.8), що задовольняє умові обмеженості для $z \rightarrow +\infty$, має вид:

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \left(\eta(z-h) \cdot sh(\lambda(z-h)) - 0,5 \cdot e^{\lambda(z-h)} \right), \quad (2.9)$$

де $B(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування.

За допомогою виразів (2.7), (2.9) та рівняння Максвелла (2.3) знаходимо, що

а) область 1, $z \leq 0$

$$H_r^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{q(p, \lambda)}{p(\mu_0 \mu_{r1})} \cdot A(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)z}, \quad (2.10)$$

б) область 2, $z \geq 0$

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p(\mu_0 \mu_{r2})} \times \left[-B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \left(\eta(z-h) \operatorname{sh}(\lambda(z-h)) - 0,5 e^{\lambda(z-h)} \right) \right], \quad (2.11)$$

Невідомі $A(p, \lambda)$ та $B(p, \lambda)$ у виразах для компонент вектору збуджуваного електромагнітного поля можна визначити з умов безперервності тангенціальних складових $\vec{E}$ та $\vec{H}$ на межах розділу різних середовищ.

Прирівнюючи тангенціальні складові електричної і магнітної напруженості на границі розділу середовищ $-z = 0$ отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) щодо зазначених невідомих.

$$\begin{cases} A(p, \lambda) = B(p, \lambda) - 0,5 \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \\ - \left(\frac{q(p, \lambda) \cdot \mu_{r2}}{\lambda \cdot \mu_{r1}} \right) A(p, \lambda) = B(p, \lambda) + 0,5 \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \end{cases}, \quad (2.12)$$

Із СЛАР (2.12) знаходимо, що

$$A(p, \lambda) = - \frac{K(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \cdot q(p, \lambda) + \lambda \right)}. \quad (2.13)$$

Вираз (2.13) підставимо до формули (2.7). Результат помножимо на питому електропровідність металу $-\gamma_1$. Після виконання всіх необхідних підстановок отримаємо формулу для густини індукованого струму в просторі зображень, визначених прийнятими інтегральними перетвореннями.

$$j_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda) = -((\mu_0 \cdot \mu_{r2}) \cdot \gamma_1) \cdot F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{p \cdot j_i(p) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot z}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \cdot q(p, \lambda) + \lambda \right)}. \quad (2.14)$$

Повний струм індукований в металі, знаходиться інтегруванням виразу (2.14) за $z \in (-\infty, 0]$. Із урахуванням його напрямку у прийнятій системі координат отримаємо, що

$$J_{\varphi}(p, \lambda) = -((\mu_0 \cdot \mu_{r2}) \cdot \gamma_1) \cdot \frac{p \cdot j_i(p) \cdot F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{q(p, \lambda) \cdot \left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \cdot q(p, \lambda) + \lambda \right)}. \quad (2.15)$$

У виразі (2.15) виконаємо зворотне інтегральне перетворення Фур'є-Бесселя. Отримаємо, що

$$J_{\varphi}(p, r) = -((\mu_0 \cdot \mu_{r2}) \cdot \gamma_1) \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{p \cdot j_i(p) \cdot F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{q(p, \lambda) \cdot \left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \cdot q(p, \lambda) + \lambda \right)} \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (2.16)$$

Спочатку проаналізуємо отриманий результат у вкрай протилежних фізичних ідеалізаціях. Реальна ситуація має місце між ними.

Перша з них – це режим збудження індукованого струму в ідеальному провіднику. Як було вже зазначено раніше, на практиці дана ідеалізація відповідає режиму з досить високими частотами, коли має місце різкий поверхневий ефект.

У виразі (2.15) виконаємо граничний перехід при $\gamma_1 \rightarrow \infty$. Отримаємо, що

$$\lim_{\gamma_1 \rightarrow \infty} J_\varphi(p, \lambda) = \left\| q(p, \lambda) \approx \sqrt{p \cdot (\mu_0 \cdot \mu_{r1}) \gamma_1} \rightarrow \infty \right\| = -j_i(p) \cdot F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}. \quad (2.17)$$

Зворотнє перетворення Лапласа у виразі (2.17) після необхідних підстановок дає з точністю до позначень залежність, що описує збудження вихрових струмів в ідеальному провіднику. Таким чином, виконаний граничний перехід повністю підтверджує достовірність проведених обчислень для металу з реальним значенням питомої електропровідності.

Друга – це режим досить низьких робочих частот, коли метал області – 1 «прозорий» для діючих полів.

Теоретично, «прозорість» металевого шару товщиною – d забезпечується за умови $\frac{\delta}{d} \gg 1$, де $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot (\mu_0 \mu_{r1}) \cdot \gamma_1}}$ – ефективна глибина проникнення

поля [77,81]. Звідси відповідний діапазон робочих частот: $\omega \ll \frac{2}{d^2 \cdot (\mu_0 \mu_{r1}) \cdot \gamma_1}$. У

разі металу, як півпростору з $d \rightarrow \infty$ і питомою електропровідністю – γ_1 , «прозорість» для даного поля може мати місце лише за достатньо низької провідності, тобто, при $\gamma_1 \rightarrow 0$.

Слід зазначити, що практична реалізація даного режиму не можлива фізично. І ось чому. Внаслідок масивності металу що нагрівається, ідеалізація «прозорості» за його нескінченної протяжності вимагає суворого виконання хоча б одної з двох умов. Перша з них, це прагнення до нуля питомої електропровідності металу ($\gamma_1 \rightarrow 0$), що швидше за все відповідає не провіднику, а діелектрику. Або друга, це прагнення до нуля частоти збуджуючого сигналу ($\omega \rightarrow 0$), що відповідає постійному струму в обмотці індуктора, коли неможливі ніякі індукційні ефекти.

Проте, ідеалізація «прозорості» цікава саме з практичних міркувань, оскільки, нехай якісно, але встановлює можливі орієнтири для реалізації індукційного нагріву досить масивних і погано провідних об'єктів.

Виконаємо в (2.15) граничний перехід при $\gamma_1 \rightarrow 0$. Після зворотного перетворення Лапласа отримаємо, що

$$J_\varphi(p, r) = -\frac{dj_i(t)}{dt} \cdot \frac{(\mu_0 \mu_{r2}) \gamma_1}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right) + 1\right)} \cdot \int_0^\infty \frac{F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (2.18)$$

Приведемо вираз (2.18) до виду, зручного для практичних оцінок.

Перше. Як правило, збуджуючий сигнал має гармонічну форму в часі, тобто, $j_i = j_{im} \cdot \sin(\omega t)$, де j_{im} – амплітуда густини струму в індукторі.

Відповідно, $\frac{dj_i(t)}{dt} = j_{im} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$ і максимум похідної дорівнюватиме – $j_{im} \cdot \omega$.

Друге. Інтегруванням виразу (2.18) по $r \in [0, R_2]$ можна знайти величину струму індукovanого в колі радіуса – R_2 . Отже,

$$\int_0^{R_2} J_1(\lambda r) dr = \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - J_0(\lambda R_2)).$$

Виконуючи відповідні підстановки до формули (2.18), знаходимо максимум струму індукovanого в металі за інтенсивного проникнення збуджуваного поля.

$$I_{\varphi m} = -j_{im} \cdot \frac{(\mu_0 \mu_{r2}) \gamma_1}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right) + 1\right)} \cdot \int_0^\infty \frac{F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda^2} \cdot (1 - J_0(\lambda R_2)) d\lambda. \quad (2.19)$$

Проаналізуємо отриманий результат.

Залежність від магнітних властивостей виділених середовищ визначається множителем $\beta = \frac{\mu_{r2}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right) + 1\right)}$. Його величина встановлює вплив намагніченості

на процес збудження індукованого струму в металі зразка.

$$\beta = \frac{\mu_{r2}}{\left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right) + 1\right)} \approx \begin{cases} (0,5 \cdot \mu_{r1,2}), & \text{при } \mu_{r2} \approx \mu_{r1} \\ \mu_{r1}, & \text{при } \mu_{r2} \gg \mu_{r1} \\ \mu_{r2}, & \text{при } \mu_{r2} \ll \mu_{r1} \end{cases} \quad (2.20)$$

З оцінок (2.20) випливає, що:

- при однаковому рівні намагніченості середовищ (відносні магнітні проникності дорівнюють одна одній) кількісна залежність індукованого струму визначається величиною, яка дорівнює половині відносної магнітної проникності;
- при намагніченості діелектричного середовища, що набагато перевищує намагніченість металу, кількісно, індукований струм визначається величиною магнітної проникності тільки металу;
- при намагніченості діелектричного середовища, що набагато менше намагніченості металу, індукований струм визначається величиною магнітної проникності саме діелектричного середовища, а не металу.

У термінах реального стану речей висновки з (2.20) можна переформулювати наступним чином.

- Основа обмотки індуктора і метал не намагнічені, тобто $\mu_{r2} = \mu_{r1} = 1$. Природно, що величина індукованого струму визначається множителем $\left(\frac{\mu_0}{2}\right)$.

- Основа обмотки індуктора – магнітний матеріал з $\mu_{r2} > 1$, але метал – немагнітний, $\mu_{r1} = 1$. Амплітуда індукованого струму визначається

множником μ_0 , не залежить від рівня намагніченості основи обмотки індуктора (величини $\mu_{r2} > 1$), але в 2 рази перевищує аналог попереднього випадку немагнітної основи індуктора. Таким чином, рівень індуктивного зв'язку системи «індуктор з магнітним заповненням – немагнітний метал» в 2 рази вище за рахунок впливу магнітних властивостей основи обмотки індуктора.

– Основа обмотки індуктора і метал – феромагнетики. Залежно від рівнів їх намагніченості можливий визначальний вплив магнітних властивостей, як основи обмотки, так і металу. Але множник, що визначає амплітуду індукovanого струму, на відміну від ситуації з неферомагнетиками, буде містити вже відносну магнітну проникність, відмінну від одиниці.

2.1.3 Чисельні оцінки та можливість підвищення інтенсивності індукційних ефектів

Для розрахунку показників індукційних ефектів на довільних частотах діючих полів у виразі (2.16) необхідно виконати зворотне перетворення Лапласа (перехід до простору оригіналів). Ця математична операція здійснюється в кілька послідовних етапів.

У підінтегральному виразі виділимо множник виду:

$$G(p, \lambda) = \frac{1}{q(p, \lambda) \cdot \left(\left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \cdot q(p, \lambda) + \lambda \right)}. \quad (2.21)$$

Із урахуванням (2.21) оригінал лінійної густини індукovanого струму запишеться як функція радіальної координати та часу.

$$J_{\varphi}(p, r) = -(\mu_0 \cdot \mu_{r2}) \cdot \gamma_1 \cdot \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda r) \cdot g(t, \lambda) d\lambda, \quad (2.22)$$

де $g(t, \lambda) = \left(\frac{dj_i(t)}{dt} \cdot G(t, \lambda) \right)$ – згортка функцій,

$$G(t, \lambda) = L^{-1} \{ G(p, \lambda) \}.$$

Знайдемо $G(t, \lambda)$. Вираз (2.21) перетворимо до вигляду, зручного для подальших перетворень.

Оскільки метал розглядається як нескінченний провідний напівпростір, введемо ефективну глибину проникнення поля – $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot (\mu_0 \cdot \mu_{r1}) \cdot \gamma_1}}$, за допомогою якої в залежності (2.21) можна виділити два безрозмірних алгебраїчних доданки.

$$G(p, \lambda) = \delta^2 \cdot (G_1(p, \lambda) - G_2(p, \lambda)), \quad (2.23)$$

де $G_1(p, \lambda) = \frac{1}{\tau_1 \cdot \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right)} \cdot \frac{1}{\left(p + \frac{\alpha}{\tau_1} \right)}, \quad \alpha = (\lambda \cdot \delta)^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} \right)^2 \right),$

$\tau_1 = \mu_{r1} \cdot \gamma_1 \cdot \delta^2$ – характерний час проникнення поля до скін-шару металу,

$$G_2(p, \lambda) = \frac{(\lambda \cdot \delta)}{\tau_1^{3/2} \cdot \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{p + \beta} \cdot \left(p + \frac{\alpha}{\tau_1} \right)}, \quad \beta = \frac{(\lambda \cdot \delta)^2}{\tau_1}.$$

Оригінали доданків у сумі (2.23) після необхідних тотожних перетворень визначатимуться наступними виразами:

$$\left\{ \begin{aligned} G_1(t, \lambda) &= L^{-1}\{G_1(p, \lambda)\} = \frac{1}{\tau_1 \cdot \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right)} \cdot e^{-\alpha \cdot \frac{t}{\tau_1}}, \\ G_2(t, \lambda) &= L^{-1}\{G_2(p, \lambda)\} = \frac{e^{-\alpha \cdot \frac{t}{\tau_1}}}{\tau_1 \cdot \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right)} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{(\lambda\delta)\left(\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}\right) \cdot \sqrt{\frac{t}{\tau_1}}} e^{-\psi^2} d\psi. \end{aligned} \right. \quad (2.24)$$

Із урахуванням (2.23) оригінал алгебраїчної суми (2.22) приймає вид:

$$G(t, \lambda) = \delta^2 \cdot \frac{e^{-\alpha \frac{t}{\tau_1}}}{\tau_1 \cdot \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right)} \cdot \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{(\lambda\delta)\left(\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}\right) \cdot \sqrt{\frac{t}{\tau_1}}} e^{-\psi^2} d\psi \right]. \quad (2.25)$$

Тепер згортка функцій в залежності (2.22) для гармонічного у часі збуджуючого струму індуктора – $j_i(t) = j_{im} \cdot \sin(\omega t)$ запишеться у вигляді визначеного інтегралу:

$$g(t, \lambda) = j_{im} \frac{(\delta^2 \cdot \omega)}{\tau_1 \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}\right)} \cdot \int_0^t \cos(\omega(t - \zeta)) e^{-\alpha \zeta} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{(\lambda\delta)\left(\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}\right) \cdot \sqrt{\frac{\zeta}{\tau_1}}} e^{-\psi^2} d\psi \right] d\zeta. \quad (2.26)$$

Із урахуванням виразу (2.26) та введенням нових змінних інтегрування просторово-часову залежність для лінійної густини індукovanого струму можна представити формулою, зручною для виконання чисельних оцінок:

$$J_\varphi(\theta, r) = -j_{im} \cdot \int_0^\infty F(x) \cdot e^{-x \frac{h}{\delta}} \cdot x \cdot J_1\left(x \cdot \frac{r}{\delta}\right) \cdot g(\theta, x) dx, \quad (2.27)$$

де $\theta = \omega \cdot t$ – фаза у часовій залежності збуджуючого струму індуктора,
 $x = \lambda \delta$ – змінна інтегрування в інтегралі Фур'є-Бесселя,

$$x \in [0, \infty), F(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{\left(x \cdot \frac{R_1}{\delta}\right)}^{\left(x \cdot \frac{R_2}{\delta}\right)} y \cdot J_1(y) dy,$$

$$g(\theta, x) = \int_0^\theta \cos(\theta - \alpha) e^{-x^2 \left(1 - \left(\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}\right)^2\right) \cdot \frac{\alpha}{(\omega \tau_1)}} \cdot \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x \cdot \left(\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}\right) \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{(\omega \tau_1)}}} e^{-\psi^2} d\psi \right] d\alpha$$

$\alpha \in [0, \theta]$ – змінна інтегрування у часовій залежності індукovanого струму.

Із виразу (2.27) знаходимо коефіцієнт пропорційності між максимумами густини індукovanого струму та густини збуджуючого струму в індукторі.

$$K = \left| \frac{J_\varphi(r)|_{\max}}{j_{im}} \right| = \left| \int_0^\infty F(x) \cdot e^{-x \frac{h}{\delta}} \cdot x \cdot J_1 \left(x \cdot \frac{r}{\delta} \right) \cdot g(\theta, x) dx \right|_{\max}, \quad (2.28)$$

де $J_\varphi(r)|_{\max} = J_\varphi(\theta, r)|_{\theta=\frac{\pi}{2}}$

Відзначимо, що величина коефіцієнту K кількісно характеризує інтенсивність індукованих процесів у системі що розглядається.

Розрахунки виконаємо для одного із варіантів систем індукційного нагріву створеного в ЛЕТ ХНАДУ.

Вихідні дані для розрахунків.

1. Геометрія індукторної системи:

- радіальні розміри – $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м,
- відстань від індуктора до металу – $h = 0,001$ м.
- 2. Частота збуджуючого струму – $f = 25$ кГц.
- 3. Величина відносної магнітної проникності [114]: $\mu_r \in [1, 1000]$.

Окремі результати чисельних оцінок, виконаних за допомогою співвідношень (2.27) та (2.28), представлені графічно на рис. 2.2. і рис. 2.3.

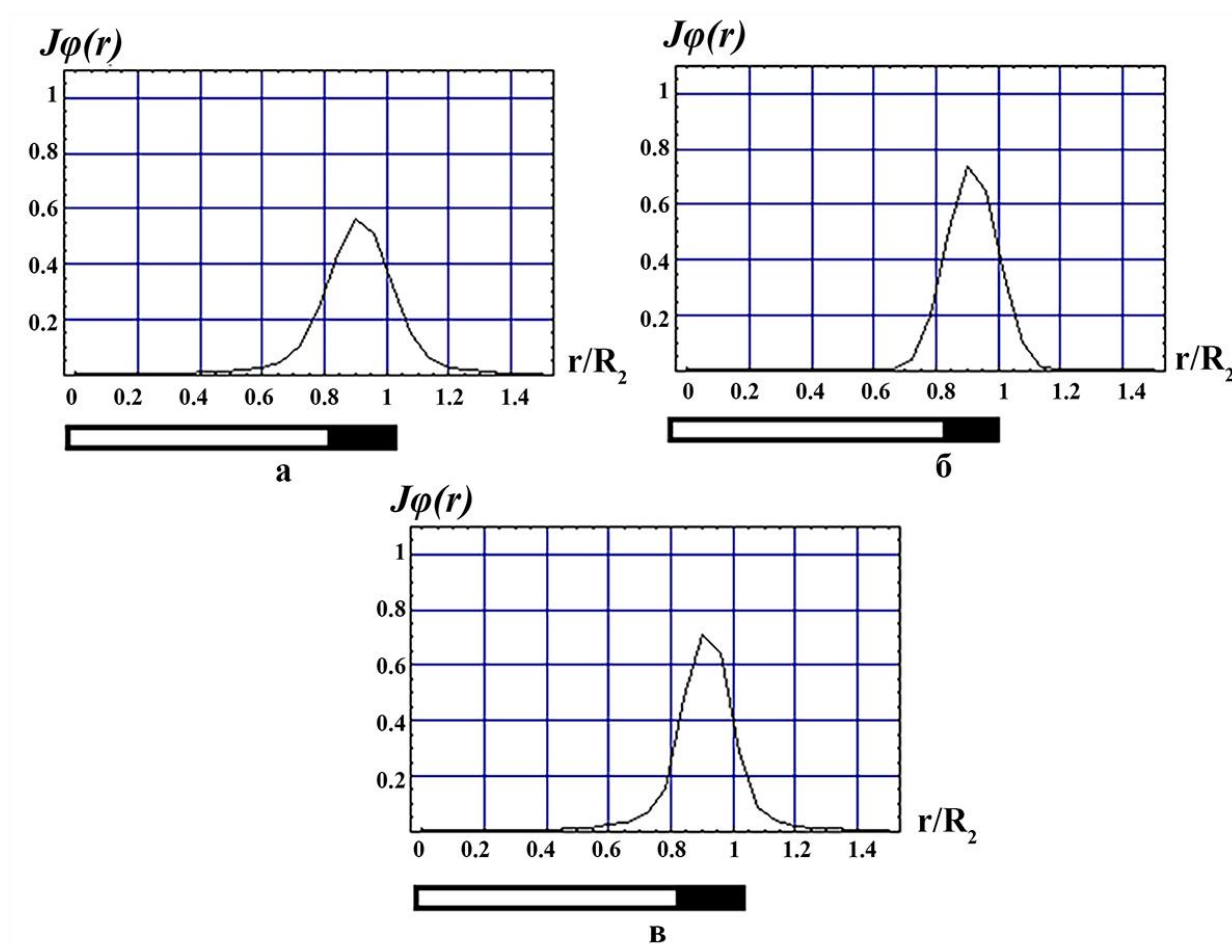


Рис. 2.2. Радіальний розподіл часових максимумів лінійної густини індукованого струму у відносних одиницях

- а) середовище з індуктором та метал об'єкту нагріву – немагнітні, відносні магнітні проникності: $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$;
- б) середовище з індуктором намагнічене до $\mu_{r2} = 100$, об'єкт нагріву – немагнітний метал $\mu_{r1} = 1$;
- в) середовище з індуктором та метал об'єкту нагріву однаково намагнічені, $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 10$

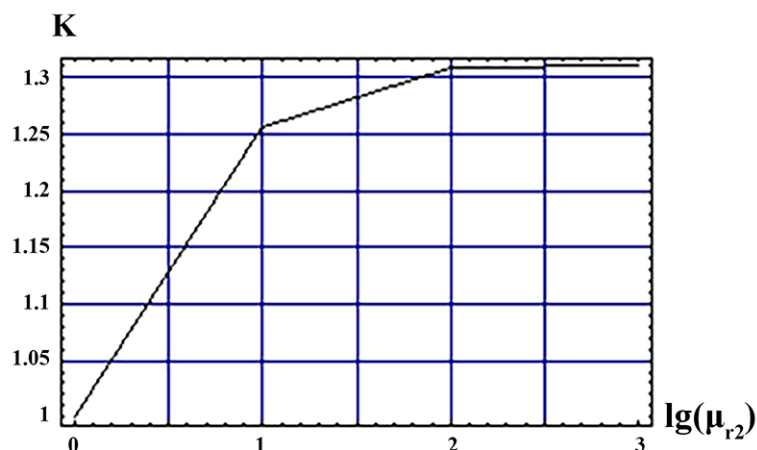


Рис. 2.3. Інтенсивність індукційного процесу у залежності від рівня намагніченості середовища з індуктором

Оцінки, виконані для реальних конструктивних, часових та електрофізичних даних, показали, що у діапазоні намагніченості середовища з індуктором – $\mu_{r2} \in [1, 1000]$ мають місце наступні характеристики індукційного процесу:

- коефіцієнт пропорційності між амплітудами густини індукованого та збуджуючого струмів не перевищує $K \leq 1.31$, тобто кількісно, оцінка впливу магнітних властивостей середовища з індуктором на величину індукованого струму приймає значення у діапазоні 0...31%;
- ріст рівня намагніченості середовища з індуктором різко підвищує інтенсивність індукційного процесу при $\mu_{r2} \leq 10$, але подальше зростання намагніченості не має істотного впливу на збудження індукованих струмів;
- у випадку однакової намагніченості середовища з індуктором та масивного металу показники процесу індукції приблизно співпадають з аналогами, коли об'єкт що нагрівається не має магнітних властивостей, тобто інтенсивність процесу збудження вихрових струмів визначається виключно рівнем намагніченості середовища з індуктором.

Незважаючи на відсутність залежності індукованих струмів в металі від рівня його намагніченості, його нагрів все ж таки повинен залежати від цієї електрофізичної характеристики. Дійсно, збільшення магнітної проникності

призводить до зменшення величини скін-шару, що означає ріст активного опору контурів протікання індукованих струмів та, відповідно, ріст температурних показників процесу індукційного нагріву.

Збільшити амплітуду густини індукованих струмів можна за допомогою відповідного конструктивного рішення, що передбачає введення другого ідентичного плоского індуктору.

Обидва джерела магнітного поля розташовуються в одній площині. Послідовне електричне з'єднання їх обмоток повинно забезпечувати таку направленість збуджуючих струмів, щоб у центральній області системи індуковані струми підсумувалися. Схематично, запропоноване конструктивне рішення та відповідна розрахункова модель системи представлені на рис. 2.4.

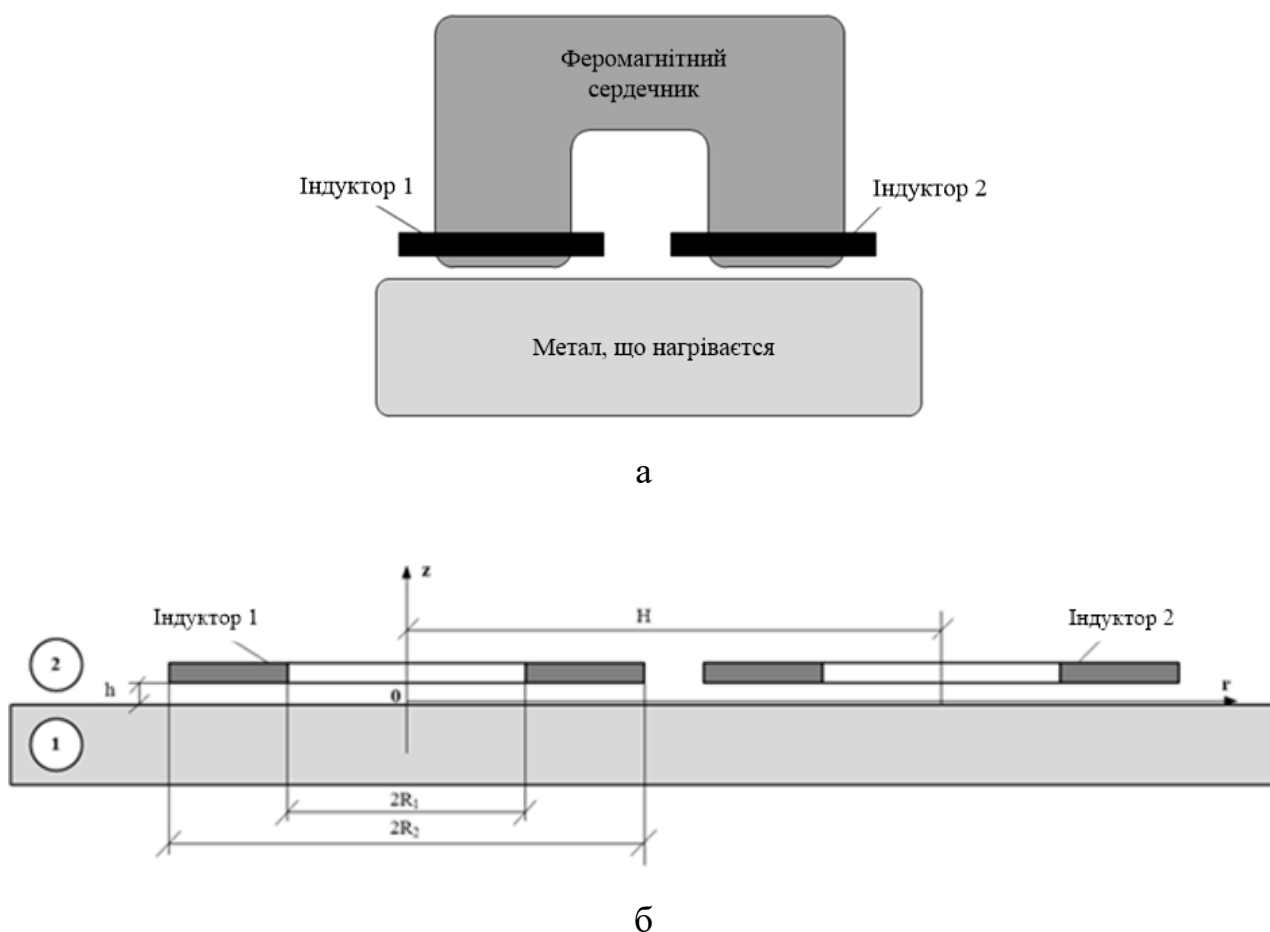


Рис. 2.4. Ілюстрація можливості збільшення інтенсивності індукційних ефектів: а) схема конструктивного виконання системи, б) розрахункова модель ($H \geq 2R_2$)

Розрахункові співвідношення для кількісної оцінки індукованих ефектів у запропонованій конструкції з двома індукторами легко отримати із виразу (2.27).

Згідно до розрахункової моделі на рис. 2.4а, лінійну густину струму, індукованого другим індуктором можна представити наступною залежністю:

$$J_{\varphi}^{(2)}(\theta, r) = -j_{im} \cdot \int_0^{\infty} F(x) \cdot e^{-x \frac{h}{\delta}} \cdot x \cdot J_1\left(x \cdot \frac{(H-r)}{\delta}\right) \cdot g(\theta, x) dx. \quad (2.29)$$

Скористаємося принципом суперпозиції.

Підсумуємо вирази (2.27) та (2.29). У фазову залежність підставимо $\theta = \frac{\pi}{2}$, що відповідає максимуму збуджуючого струму.

Нескладні тотожні перетворення отриманого результату дозволяють записати радіальну залежність амплітуд відносної лінійної густини струму індукованого полями двох індукторів.

$$\begin{aligned} J_{\varphi}(r) &= \frac{J_{\varphi}^{(s)}\left(\theta = \frac{\pi}{2}, r\right)}{j_{im}} = \\ &= -\int_0^{\infty} F(x) \cdot e^{-x \frac{h}{\delta}} \cdot x \left[J_1\left(x \cdot \frac{r}{\delta}\right) + \right. \\ &\quad \left. + J_1\left(x \cdot \frac{(H-r)}{\delta}\right) \right] \cdot g\left(\theta = \frac{\pi}{2}, x\right) dx \end{aligned} \quad (2.30)$$

Чисельні оцінки проведемо для тих самих вихідних даних, що і раніше, із додаванням величини відстані між індукторами. Очевидно, що максимальний ефект за суперпозиції їх полів повинен мати місце за мінімального значення відстані, рівній подвоєному радіусу однакових індукторів, тобто $H = 2R_2$.

Напишемо всі вихідні дані для розрахунку.

1. Геометрія:

- радіальні розміри – $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м;
- відстань від індуктора до металу – $h = 0,001$ м;
- 2. Частота збуджуючого струму – $f = 25$ кГц.
- 3. Величина відносної магнітної проникності [114]: $\mu_r \in [1, 100]$.
- 4. Відстань між центрами обмоток індукторів: $H = 0,06$ м.

Результати чисельних оцінок розподілу густини індукованих струмів вздовж діаметрів індукторів системи що розглядається, виділених за допомогою співвідношень (2.27), (2.29) та (2.30) представлені на рис. 2.5 і рис. 2.6.

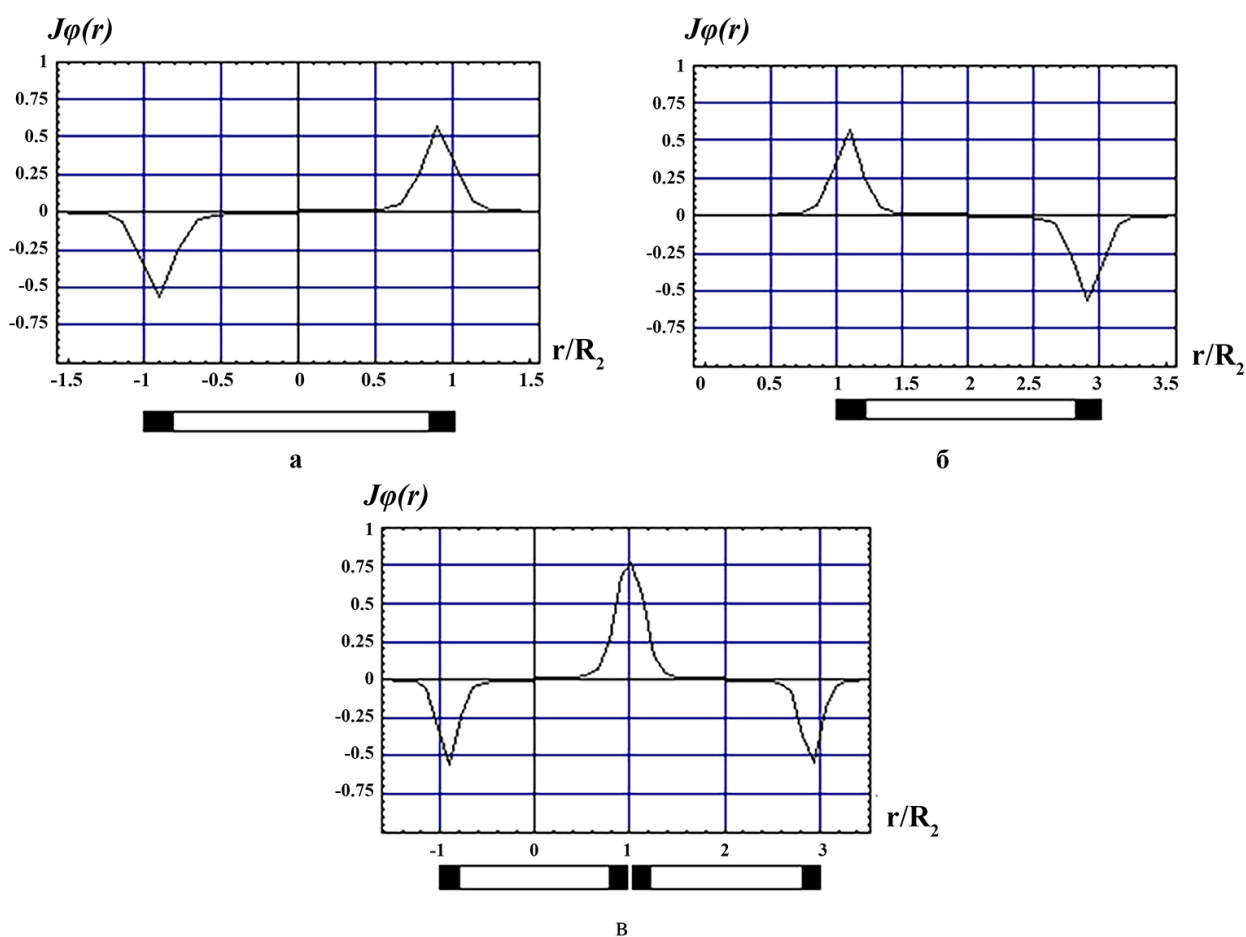


Рис. 2.5. Радіальний розподіл часових максимумів відносної лінійної густини індукованих струмів

у випадку немагнітних середовищ з індукторами та металу, $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$:

- а) підключений лише індуктор 1, б) підключений лише індуктор 2,
- в) підключені індуктор 1 та індуктор 2

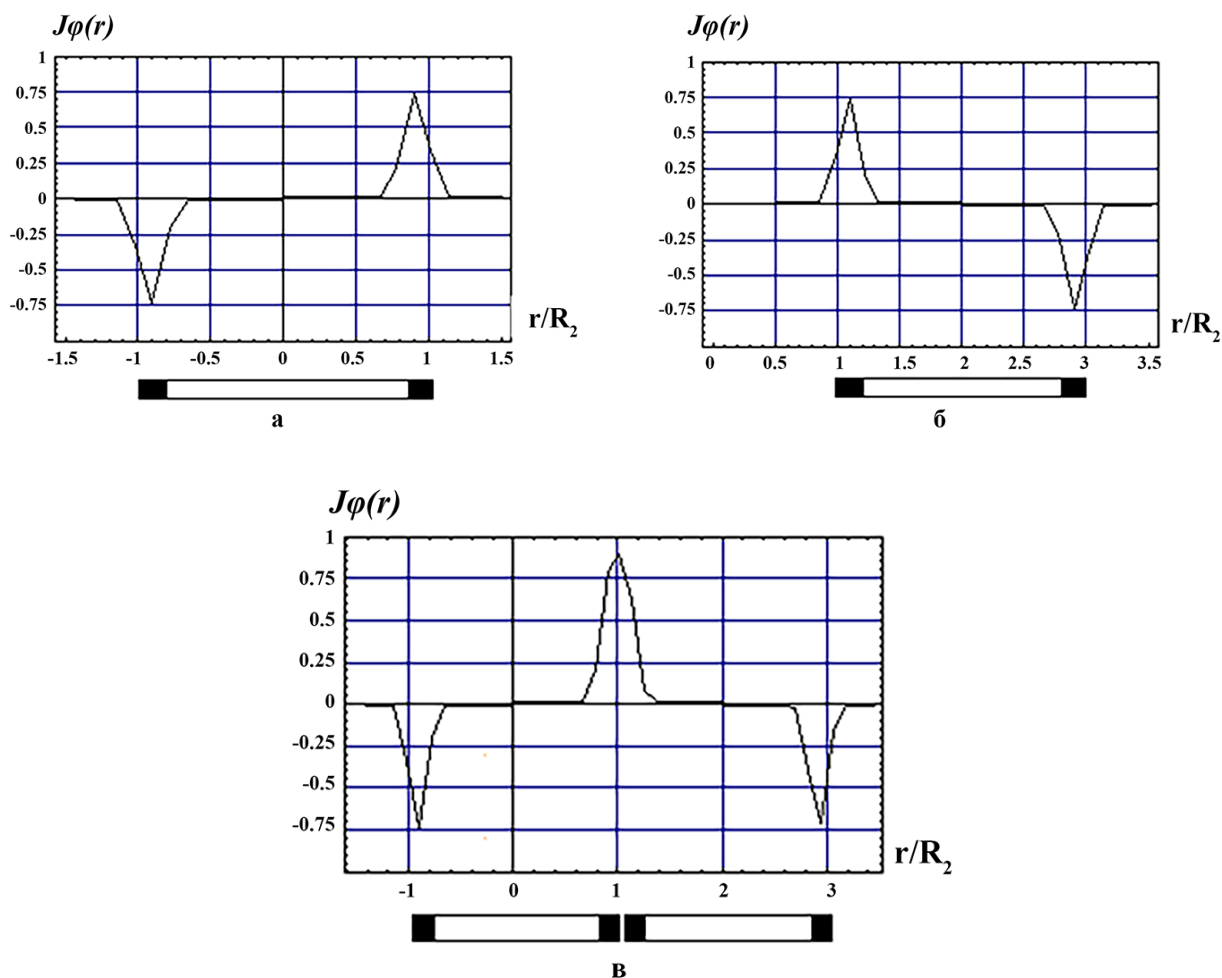


Рис. 2.6. Радіальний розподіл часових максимумів відносної лінійної густини індукованих струмів у випадку магнітного середовища з індукторами ($\mu_{r2} = 100$) та немагнітного металу ($\mu_{r1} = 1$):
 а) підключений лише індуктор 1, б) підключений лише індуктор 2,
 в) підключені індуктор 1 та індуктор 2

Проведені розрахунки дали наступні оцінки амплітуд індукованих струмів.

1. Введення до системи індукційного нагріву додаткового джерела магнітного поля дозволяє реально підвищити інтенсивність індукційних процесів.

— у випадку немагнітних середовища із двома індукторами та металу масивного об'єкту ($\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$), в порівнянні з аналогічною ситуацією при підключенні одного індуктора, має місце збільшення амплітуди вихрових струмів більше ніж у $\sim 1,3$ рази;

– у випадку намагніченого середовища з двома індукторами ($\mu_{r2} = 100$) та немагнітного металу об'єкту нагріву ($\mu_{r1} = 1$), в порівнянні із аналогічною ситуацією при підключенні одного індуктора, має місце збільшення амплітуди вихрових струмів більше ніж у $\sim 1,2$ рази;

– в системі з двома індукторами у магнітному середовищі над немагнітним металом в порівнянні із системою, де один індуктор та немагнітні складові, можливе підвищення інтенсивності індукційного процесу більше ніж у $\sim 1,5$ рази.

2. У формуванні індукованого сигналу визначну роль має рівень намагніченості середовища із джерелами магнітного поля, наявність або відсутність магнітних властивостей у метала масивного об'єкта що нагрівається практично не впливає на амплітуди збуджуваних вихрових струмів.

В запропонованих конструкціях інструментів індукційного нагріву масивних металевих об'єктів, візуально простежуються замкнуті контури для збуджуваних основних магнітних потоків з мінімумом потоків розсіяння. Це перша умова ефективності індукційних процесів. Другою обов'язковою умовою є існування замкнутих контурів для протікання вихрових струмів. Остання обставина вимагає ретельного вибору місця для розташування інструменту аби забезпечити замкнутість ліній індуктованих струмів по провідним елементам об'єкту що нагрівається.

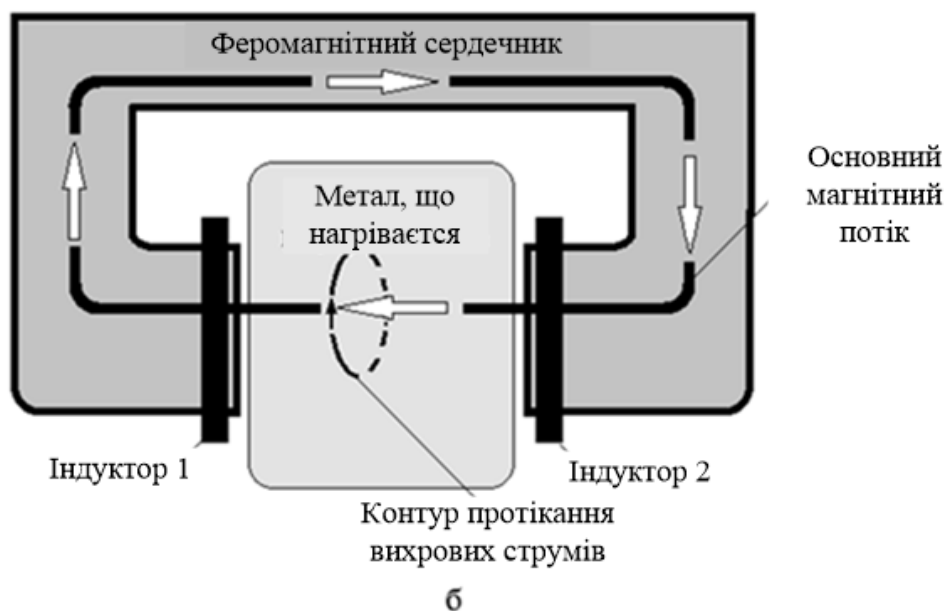
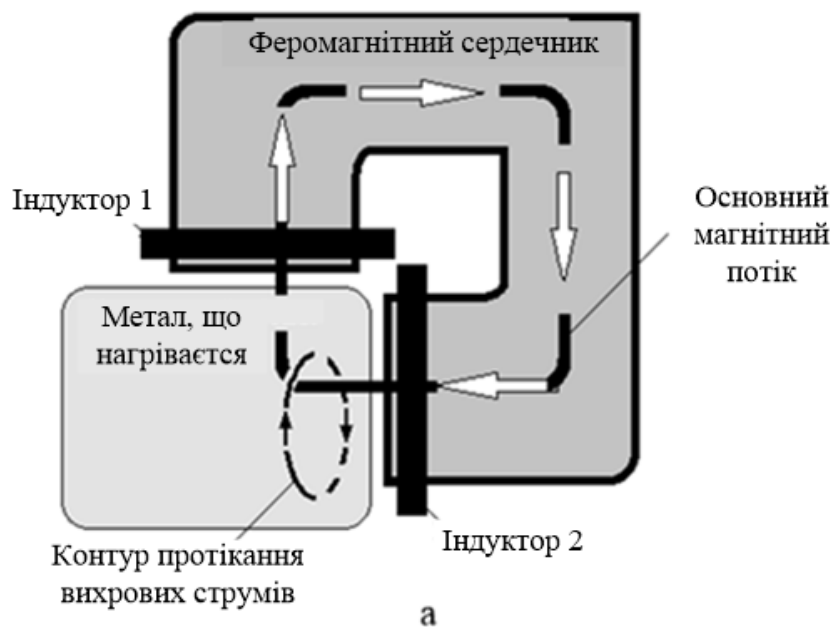
Важливими зауваженнями до функціонування такого інструменту будуть наступні.

1. Електричне включення обмоток індукторів повинне забезпечувати збудження однонаправлених магнітних потоків.

2. Обмотки можуть підключатися до окремих незалежних джерел потужності, що дозволяє роздільне регулювання параметрів збуджуваних струмів.

3. Можливе послідовне або паралельне підключення обмоток до одного джерела потужності.

4. Вибір конкретної схеми живлення визначається виходячи із конкретних умов технічного завдання на інструмент індукційного нагріву (рис. 2.7).



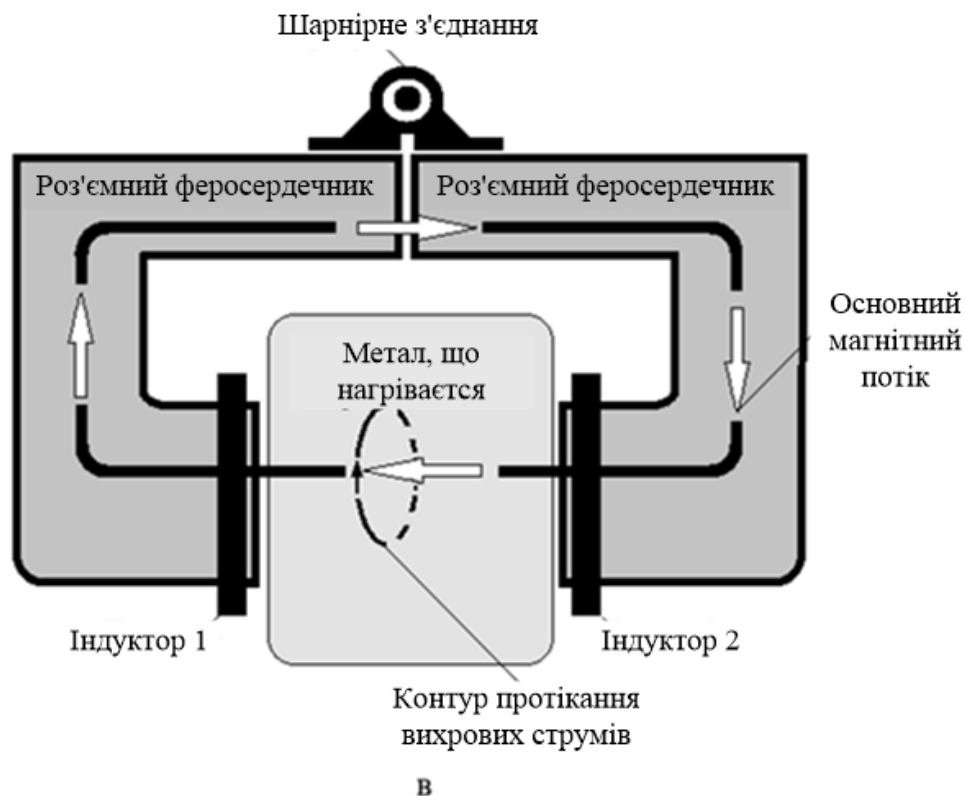


Рис. 2.7. Варіанти конструктивного виконання інструментів із феромагнітними сердечниками:

а), б) – нероз'ємні сердечники, в) – роз'ємний сердечник

2.2 Об'єкт нагріву – тонкостінний листовий метал

Використання індукційного нагріву для вирішення значного класу виробничих проблем описано у чисельних наукових публікаціях [26,70-72,74-76,109,110]. Серед них особливий інтерес представляють пропозиції інженерів концерну «Betaginnovation» для рихтовки невеликих вм'ятин на кузовних панелях автомобілів використовувати індукційний нагрів замість інструментів що базуються на застосуванні джерел відкритого вогню [71]. Його інструментами, як відомо, можуть бути кругові соленоїди з обмоткою або на діелектричних, або на феромагнітних сердечниках. У останньому випадку, із апріорних фізичних уявлень, повинен зростати рівень електромагнітного зв'язку між джерелом поля – соленоїдом та металом об'єкта обробки, що повинно

призвести до підвищення амплітуд збуджуваних вихрових струмів та, у підсумку, до зростання ефективності індукційного нагріву безпосередньо [3].

Однак пропозиція використовувати явище індукції для нагріву саме тонкостінних металів, якими є кузовні панелі автомобілів, ставить ряд питань не освітлених у сучасній науковій періодиці. Мова йде про особливості властиві процесам проникнення електромагнітних полів крізь тонкі провідні феромагнетики [3,110,114]. Тому необхідний окремий аналіз, що враховує геометричні та електрофізичні характеристики об'єкта індукційного нагріву.

Мета представлених досліджень – аналіз електромагнітних процесів у тонкостінному листовому металі (як з магнітними властивостями, так і без них) за збудження поля плоским соленоїдом із феромагнітним сердечником. Отримані оцінки, як було вказано раніше, складають практичний інтерес для створення ефективних систем індукційного нагріву в прогресивних технологіях ремонту сучасного автомобільного транспорту.

2.2.1 Формулювання задачі, інтегрування рівнянь Максвелла

Основний інтерес представляє оцінка впливу магнітних властивостей сердечника обмотки плоского кругового індуктора – джерела збуджуваного поля, на електромагнітні процеси у тонкостінному металевому зразку. Тому для аналізу можна прийняти адекватну розрахункову модель із трьох умовних складових: «нескінченне непровідне (в сердечниках не повинні збуджуватися вихрові струми) магнітне середовище з індуктором – джерелом поля», «тонкостінний провідний листовий феромагнетик» та «діелектричний напівпростір».

Прийнята розрахункова модель представлена на рис. 2.8.

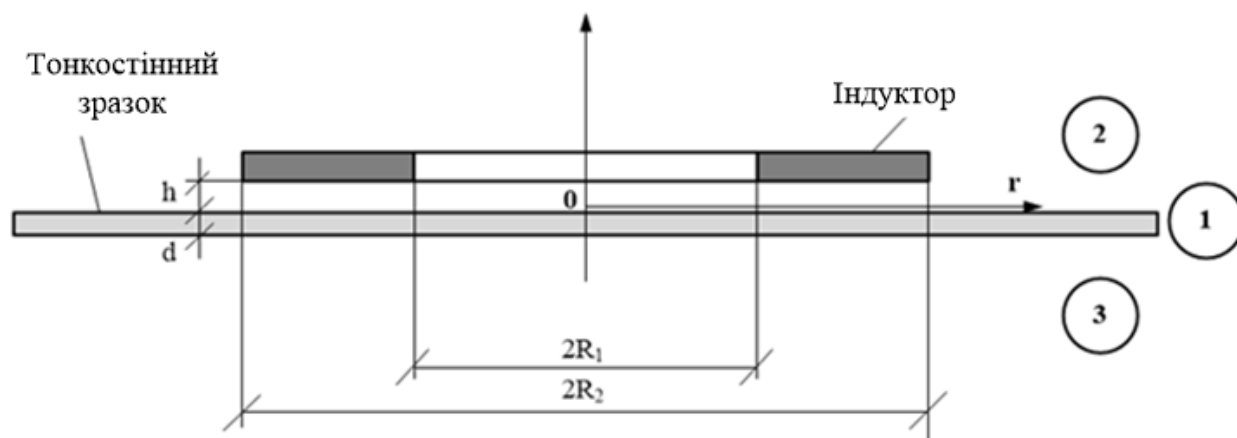


Рис. 2.8. Розрахункова модель у циліндричній системі координат:

1 – лист магнітного металу $\gamma_1 \neq 0$, $\mu_{r1} > 1$;

2 – діелектричне магнітне середовище – ферит $\gamma_2 = 0$, $\mu_{r2} \geq 1$;

3 – вільний напівпростір $\gamma_3 = 0$, $\mu_{r3} = 1$

Рішення задачі проведемо аналогічно до робіт [91,111,112], де достатньо детально описаний використаний математичний апарат. Більш докладний опис його особливостей можна знайти у науковому керівництві [113]. Слід відзначити, що подібний розгляд освітлений у вище цитованих роботах, але їх результати не дозволяють отримати оцінки, що відповідають меті дослідження.

Постановка задачі, прийняті припущення.

1. Область 1, $z \in [-d, 0]$ лист магнітного металу з питомою електропровідністю $\gamma_1 \neq 0$, відносною магнітною проникністю $\mu_{r1} > 1$ і товщиною – d .

2. Напівпростір 2, $z \in [0, +\infty)$, діелектричне магнітне середовище – ферит з питомою електропровідністю $\gamma_2 = 0$ та відносною магнітною проникністю $\mu_{r2} \geq 1$.

3. Напівпростір 3, $z \in (-\infty, -d]$ з питомою електропровідністю $\gamma_3 = 0$ та відносною магнітною проникністю $\mu_{r3} = 1$.

4. Має місце азимутальна однорідність, так що $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$.

5. Круговий індуктор товщиною якого можна знехтувати, і яка не має впливу на електромагнітні процеси у системі, розміщений над межею розділу «ферромагнетик – лист металу» на $z = h$.

6. У індукторі протікає рівномірно розподілений по радіусу струм із густиною $-j_i(t)$, t – час, спектр якого містить частоти, що задовольняють умові квазістаціонарності процесів, що протікають у системі: $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$, ω – циклічна частота, c – швидкість світла у вакуумі, l – найбільший характерний розмір системи що розглядається.

Рівняння Максвелла для ненульових складових напруженостей електромагнітного поля, перетворених за Лапласом, із урахуванням початкових умов мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z), \end{array} \right. \quad (2.31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu \cdot p \cdot H_z(p, r, z), \end{array} \right. \quad (2.32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu \cdot p \cdot H_r(p, r, z), \end{array} \right. \quad (2.33)$$

де p – параметр перетворення Лапласа

$$E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\},$$

$$H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\},$$

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\}.$$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, μ_0 – магнітна стала, μ_r – відносна магнітна проникність середовища.

У загальному випадку густина струму у правій частині рівняння (2.31) записується у вигляді:

$$j_{\varphi}(p, r, z) = (p \cdot \varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_{\varphi}(p, r, z) + j_{\varphi i}(p, r, z), \quad (2.34)$$

де $j_{\varphi i}(t, r, z)$ – густина стороннього струму у індукторі,

$$j_{\varphi i}(p, r, z) = j_i(p) \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \cdot \delta(z - h).$$

$j_i(p) = L\{j_i(t)\}$, $j_i(t)$ – амплітудно-часова залежність густини збуджуючого струму;

$\eta(r)$, $\delta(r)$ – ступінчата функція Хевісайда та дельта-функція Дірака, відповідно;

γ – питома електропровідність середовища зі струмом,

ε_0 – діелектрична проникність вакууму.

Під час вирішення поставленої задачі виділимо області із однорідними електрофізичними характеристиками:

а) область 1, лист металу, $z \in [-d, 0]$, з питомою електропровідністю – $\gamma_1 \neq 0$ та відносною магнітною проникністю – $\mu_{r1} > 1$;

б) область 2, магнітний діелектрик – ферит, $z \geq 0$, з питомою електропровідністю – $\gamma_2 = 0$ та відносною магнітною проникністю – $\mu_{r2} > 1$.

в) область 3, $z \in (-\infty, -d]$, вільний напівпростір з питомою електропровідністю $\gamma_3 = 0$ та відносною магнітною проникністю – $\mu_{r3} = 1$.

Із системи Максвелла (2.31) – (2.33) можна отримати диференційні рівняння для азимутальної компоненти напруженості електричного поля, що після інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя, приймають наступний вид:

а) область 1, лист магнітного металу, $z \in [-d, 0]$

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - q^2(p, \lambda) \cdot E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = 0, \quad (2.35)$$

де $E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z)$ – Фур'є-Бесселів L-образ азимутальної компоненти напруженості електричного поля у області 1,

$$E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = \int_0^{\infty} E_{\varphi}^{(1)}(p, r, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) r dr,$$

λ – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя,

$J_1(\lambda \cdot r)$ – функція Бесселя 1го порядку,

$q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p(\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1}$ – параметр, що має фізичне значення хвильового числа у середовищі із електрофізичними параметрами $(\mu_0 \mu_1), \gamma_1$;

б) область 2, магнітний діелектрик – ферит, $z \geq 0$,

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z - h), \quad (2.36)$$

де $E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z)$ – Фур'є-Бесселів L-образ азимутальної компоненти напруженості електричного поля у області – 2,

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = \int_0^{\infty} E_{\varphi}^{(2)}(p, r, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) r dr,$$

λ – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя

$J_1(\lambda \cdot r)$ – функція Бесселя 1го порядку,

$$K(p, \lambda) = (\mu_0 \cdot \mu_{r2}) \cdot p \cdot j_i(p) \cdot F(\lambda),$$

$$F(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda \cdot r) dr \quad - \text{Фур'є-Бесселів образ функції рівномірного}$$

радіального розподілу струму в індукторі;

в) область 3, вільний напівпростір, $z \in (-\infty, -d]$

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(3)}}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}^{(3)}(p, \lambda, z) = 0. \quad (2.37)$$

Вирішення звичайних лінійних диференціальних рівнянь другого порядку (2.35) – (2.37) дає вирази наступного виду.

а) Область 1, $z \in [-d, 0]$

Загальний інтеграл рівняння (2.35) має вид:

$$E_{\varphi}^{(1)}(p, \lambda, z) = A_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)z} + A_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda)z}, \quad (2.38)$$

де $A_{1,2}(p, \lambda)$ – довільні сталі інтегрування.

б) Область 2, $z \geq 0$

Загальний інтеграл рівняння (2.36), що задовольняє умові обмеженості для $z \rightarrow \infty$, має вид:

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \left(\eta(z-h) \cdot sh(\lambda(z-h)) - 0,5 \cdot e^{\lambda(z-h)} \right) \quad (2.39)$$

де $B(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування.

2.2.2 Індукційні процеси в ідеалізації зверхпровідності листового металу

Найбільш простий та прозорий результат аналізу впливу магнітних властивостей середовища із збуджуючим струмом на індукційні процеси у тонкостінному металі можна отримати у припущенні його «ідеальної» провідності, тобто вважаючи $\gamma_1 \rightarrow \infty$. Практично, дана ідеалізація відповідає випадку надвисоких частот, коли у металі реалізується різкий поверхневий ефект [3,112].

Із граничної умови на поверхні розділу двох середовищ – $E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z=0)=0$ можна легко визначити довільну сталу інтегрування – $B(p, \lambda)=0,5 \cdot e^{-\lambda h}$, після підстановки якої до виразу (2.39) отримаємо, що

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, \lambda, z)=\frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \left[e^{-\lambda h} \cdot sh(\lambda z) - \eta(z-h) \cdot sh(\lambda(z-h)) \right]. \quad (2.40)$$

Із рівняння Максвелла (2.33) знаходимо тангенціальну компоненту вектору напруженості збуджуваного магнітного поля.

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z)=\frac{K(p, \lambda)}{p(\mu_0 \cdot \mu_{r2})} \cdot \left[e^{-\lambda h} \cdot ch(\lambda z) - \eta(z-h) \cdot ch(\lambda(z-h)) \right]. \quad (2.41)$$

У виразі (2.41) припустимо $z=0$. В отриманому результаті виконаємо зворотні перетворення Фур'є-Бесселя та Лапласа. Після всіх необхідних підстановок знайдемо лінійну густину струму, індукованого у ідеально провідному металі та сконцентрованого на його граничній поверхні:

$$j_{\varphi}^{(1)}(t, r)=-j_i(t) \cdot \int_0^{\infty} e^{-\lambda h} \cdot \left[\int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda \cdot r) dr \right] \cdot J_1(\lambda r) \cdot \lambda d\lambda. \quad (2.42)$$

При $h \rightarrow 0$ як слідує з (2.42), $j_{\varphi}^{(2)}(t, r) = -j_i(t) \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_1)]$.

Тобто, індукований сигнал є дзеркальним відображенням збуджуючого струму в індукторі. Даний висновок узгоджується із добре відомим фактом електродинаміки та, відповідно, є доказом достовірності проведеного аналізу.

У формулі (2.42) для густини індукованого сигналу відсутні характеристики магнітних властивостей діелектричного та провідного середовищ (як μ_{r1} , так і μ_{r2}). Звідси витікає, що у прийнятій ідеалізації, практично відповідній режиму надвисоких частот процесів що протікають, магнітні властивості середовищ не впливають на індукційні процеси.

2.2.3 Індукційні процеси в листових металах із скінченним значенням питомої електропровідності

Повернемося до випадку скінченного значення питомої електропровідності листового металу.

в) Область 3, $z \in (-\infty, -d]$.

Загальний інтеграл рівняння (2.37), що задовольняє умові обмеженості для $z \rightarrow -\infty$, має вид:

$$E_{\varphi}^{(3)}(p, \lambda, z) = C(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z}, \quad (2.43)$$

де $C(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування.

Далі, визначимо тангенціальні складові напруженості збуджуваного магнітного поля.

За допомогою виразів (2.37), (2.38) та рівняння Максвелла (2.33) знаходимо, що

а) область 1, $z \in [-d, 0]$,

$$H_r^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{q(p, \lambda)}{p(\mu_0 \cdot \mu_{r1})} \cdot [A_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)z} - A_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda)z}]. \quad (2.44)$$

б) область 2, $z \geq 0$,

$$H_r^{(2)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p(\mu_0 \mu_{r2})} \cdot \left[-B(p, \lambda) e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} (\eta(z-h) \cdot sh(\lambda(z-h)) - 0,5 e^{\lambda(z-h)}) \right]. \quad (2.45)$$

в) область 3, $z \in (-\infty, -d]$

$$H_r^{(3)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot C(p, \lambda) \cdot e^{\lambda z}. \quad (2.46)$$

Невідомі довільні сталі інтегрування можна визначити із відомих умов безперервності тангенціальних складових вектору збуджуваного електромагнітного поля на границях розділу різних середовищ [3].

Прирівнюючи тангенціальні компоненти електричної та магнітної напруженості на границях розділу середовищ – $z = 0$ та $z = -d$ отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно зазначених невідомих.

$z = 0$.

$$\begin{cases} A_1(p, \lambda) + A_2(p, \lambda) = B(p, \lambda) - 0,5 \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \\ - \left(\frac{q(p, \lambda) \cdot \mu_{r2}}{\lambda \cdot \mu_{r1}} \right) [A_1(p, \lambda) - A_2(p, \lambda)] = \\ = B(p, \lambda) + 0,5 \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \end{cases}. \quad (2.47)$$

$$z = -d.$$

$$\begin{cases} A_1(p, \lambda) e^{-q(p, \lambda)d} + A_2(p, \lambda) e^{q(p, \lambda)d} = C(p, \lambda) e^{-\lambda d} \\ \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \cdot \mu_{r1}} \right) \begin{bmatrix} A_1(p, \lambda) e^{-q(p, \lambda)d} \\ -A_2(p, \lambda) e^{q(p, \lambda)d} \end{bmatrix} = C(p, \lambda) e^{\lambda d} \end{cases} \quad (2.48)$$

Загалом нас цікавлять процеси у листовому металі. Тому в рівняннях (2.47), (2.48) виключимо невідомі $B(p, \lambda)$ та $C(p, \lambda)$.

Отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно $A_{1,2}(p, \lambda)$.

$$\begin{cases} A_1(p, \lambda) \left[1 + \left(\frac{q(p, \lambda) \mu_{r2}}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] + \\ + A_2(p, \lambda) \left[1 - \left(\frac{q(p, \lambda) \mu_{r2}}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] = -e^{-\lambda h} \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \\ A_1(p, \lambda) e^{-q(p, \lambda)d} \left[1 - \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \cdot \mu_{r1}} \right) \right] + \\ + A_2(p, \lambda) e^{q(p, \lambda)d} \left[1 + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \cdot \mu_{r1}} \right) \right] = 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

Із системи (2.49) знаходимо, що

$$\begin{cases} A_1(p, \lambda) = -e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda \cdot \Delta(p, \lambda)} \cdot \left[1 + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] \cdot e^{q(p, \lambda)d} \\ A_2(p, \lambda) = e^{-\lambda h} \cdot \frac{K(p, \lambda)}{\lambda \cdot \Delta(p, \lambda)} \cdot \left[1 - \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] \cdot e^{-q(p, \lambda)d} \end{cases} \quad (2.50)$$

де $\Delta(p, \lambda)$ – визначник однорідної системи

$$\Delta(p, \lambda) = \left[1 + \left(\frac{q(p, \lambda) \mu_{r2}}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] \cdot e^{q(p, \lambda) d} - \left[1 - \left(\frac{q(p, \lambda) \mu_{r2}}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_{r1}} \right) \right] \cdot e^{-q(p, \lambda) d}.$$

Вирази із (2.49) та значення $K(p, \lambda)$ із (2.36) підставимо до загального інтегралу (2.38). Результат помножимо на питому електропровідність листового металу – γ_1 . У отриманому виразі виконаємо зворотнє перетворення Фур'є-Бесселя.

Після нескладних тотожних перетворень отримаємо L-образ просторово-часової залежності густини індукованого струму.

$$j_\varphi(p, r, \zeta) = -\frac{(\mu_0 \mu_{r2} \cdot \gamma_1)}{2} \cdot \int_0^\infty F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{(p \cdot j_i(p)) \cdot M(p, \lambda, \zeta)}{G(p, \lambda)} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (2.51)$$

де

$$M(p, \lambda, \zeta) = sh\left((q(p, \lambda) d) \left(1 - \frac{\zeta}{d}\right)\right) + \frac{1}{\mu_{r1}} \cdot \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right) \cdot ch\left((q(p, \lambda) d) \left(1 - \frac{\zeta}{d}\right)\right),$$

$\zeta \in [0, d]$ – просторова змінна в системі відліку, пов'язаній із листовим металом,

$$G(p, \lambda) = \left(1 + \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}^2} \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)^2\right) sh(q(p, \lambda) d) + \frac{(1 + \mu_{r2})}{\mu_{r1}} \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right) ch(q(p, \lambda) d).$$

Відзначимо, що за $\mu_{r2} = 1$ залежність (2.51) цілком узгоджується з аналогічним результатом, отриманим авторами робіт [111,112] для випадку, коли індуктор розміщений у немагнітному середовищі.

Вираз (2.51) проінтегруємо по $\zeta \in [0, d]$. Отримаємо L-образ лінійної густини вихрового струму, індукованого у тонкостінному листовому металі.

$$J_{\varphi}(p, r) = -(\mu_0 \mu_{r2} \cdot \gamma_1) p \cdot j_i(p) \cdot \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{M(p, \lambda)}{q(p, \lambda) \cdot G(p, \lambda)} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda \quad (2.52)$$

де
$$M(p, \lambda) = \left[\left(1 - \operatorname{ch}(q(p, \lambda)d) \right) - \frac{1}{\mu_{r1}} \cdot \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \right) \cdot \operatorname{sh}(q(p, \lambda)d) \right].$$

2.2.4 Індукційні процеси в ідеалізації «прозорості» листового металу

Простий результат аналізу впливу магнітних властивостей середовища із збуджуючим струмом на індукційні процеси у тонкостінному металі можна отримати у припущенні його достатньо низької провідності, тобто вважаючи $\gamma_1 \rightarrow 0$. Практично, дана ідеалізація за реальних значень питомої електропровідності відповідає випадку наднизьких робочих частот –

$$\omega \ll \frac{2}{d^2 \cdot (\mu_0 \mu_{r1}) \cdot \gamma_1}, \text{ коли листовий метал є абсолютно «прозорим» для діючих}$$

полів. У такому випадку $q(p, \lambda) \approx \lambda$ [112,113].

Для немагнітного сталевго листа товщиною $d = 0,001$ м фіксуємо оцінку – $f = \frac{\omega}{2\pi} \ll 31,66$ кГц, тобто робоча частота буде складати $\sim 31,66$ кГц. Слід зазначити, що для магнітного металу допустимою вимогою низькочастотності є значення робочої частоти що зменшується внаслідок росту його намагніченості під впливом діючого поля.

Виконуючи відповідний граничний перехід та зворотне перетворення Лапласа, отримаємо що

$$J_{\varphi}^{(нч)}(t, r) = \lim_{\substack{\omega, \gamma_1 \rightarrow 0 \\ q(p, \lambda) \rightarrow \lambda}} J_{\varphi}(t, r) =$$

$$= -\frac{\mu_{r2}(\mu_0 \mu_{r1} \gamma_1)}{2} \cdot \frac{dj_i(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} \frac{F(\lambda) e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot \frac{M(\lambda)}{G(\lambda)} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2.53)$$

де $M(\lambda) = [\mu_{r1} \cdot (1 - ch(\lambda d)) - sh(\lambda d)],$

$$G(\lambda) = [(\mu_{r1}^2 + \mu_{r2}) \cdot sh(\lambda d) + \mu_{r1} \cdot (1 + \mu_{r2}) \cdot ch(\lambda d)].$$

Для порівняння із результатами у відомих публікаціях, припустимо, що середовище з індуктором та листовий метал немагнітні, тобто $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$.

У такому випадку вираз (2.53) приймає вид:

$$J_{\varphi}^{(нч)}(p, \lambda) \Big|_{\mu_{r1}=\mu_{r2}=1} = \frac{(\mu_0 \gamma_1)}{2} \cdot \frac{dj_i(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} \frac{F(\lambda) e^{-\lambda h} (1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (2.54)$$

Залежність (2.54) із точністю до позначень співпадає із аналогом, отриманим авторами робіт [111,112].

Перше, що слід відзначити, це часова форма індукованого струму у виразі (2.53). Як і варто було очікувати, в режимі наднизьких робочих частот його часова залежність є похідною від часової залежності збуджуючого струму [111,112].

Оскільки струм у індукторі представлений гармонічною функцією із частотою « ω », вираз (2.53) можна записати у найбільш зручному для аналізу виді:

$$J_{\varphi \max}^{(нч)}(r) = -\mu_{r2} \frac{(\omega \mu_0 \mu_{r1} \gamma_1)}{2} \cdot j_{im} \cdot \int_0^{\infty} \frac{F(\lambda) e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot \frac{M(\lambda)}{G(\lambda)} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2.55)$$

де j_{im} – амплітуда густини збуджуючого струму.

Проаналізуємо отриманий результат для різних можливих та найбільш цікавих для практики фізичних станів системи що розглядається.

1. Намагнічений сердечник індуктора та немагнітний листовий метал, $\mu_{r2} \geq 1, \mu_{r1} = 1$.

$$J_{\varphi \max}^{(нч)}(t, r) \approx \frac{\mu_{r2}}{(1 + \mu_{r2})} \cdot \frac{(\omega \mu_0 \gamma_1)}{2} \cdot j_{im} \cdot \int_0^{\infty} \frac{F(\lambda) e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda d}) \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (2.56)$$

Із залежності (2.56) випливає, що за $\mu_{r2} \gg 1$, на відміну від $\mu_{r2} \rightarrow 1$, величина густини індукованого струму зростає в ~ 2 рази незалежно від рівня намагніченості сердечника індуктора. Це означає, що використання сердечника із магнітного металу може істотно підвищити інтенсивність індукційних процесів.

Слід відзначити ще один цікавий висновок із залежності (2.56). Так, коли $d \rightarrow \infty$ можливе підвищення густини індукованого струму зберігається таким самим (в ~ 2 рази для $\mu_{r2} \gg 1$). Тобто, індукційні процеси в немагнітних, але достатньо масивних тонкостінних листових металах, при збудженні соленоїдами з феритовим наповненням, протікають з однаковою інтенсивністю.

2. Намагнічені сердечник індуктора та листовий метал, $\mu_{r2} \geq 1, \mu_{r1} \geq 1$. Для простоти додатково припустимо, що $\mu_{r2} \approx \mu_{r1} \approx 1$.

$$J_{\varphi \max}^{(нч)}(t, r) \approx \mu_r \cdot \frac{(\omega \mu_0 \gamma_1)}{2} \cdot j_{im} \cdot \int_0^{\infty} \frac{F(\lambda) e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda d})^2 \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (2.57)$$

Із залежності (2.57) слідує, що амплітуда густини індукованого струму повинна зростати із ростом рівня намагніченості сердечника та металу листа що нагрівається.

Такий самий висновок можна було зробити і для масивного металу ($d \rightarrow \infty$). Але він був би несправедливий. Виходячи із фізичних уявлень, очевидно, що намагніченість масивного металу що нагрівається повинна зменшуватися по товщині відповідно до величини поля що проникає, але у представленому розгляді цей факт не враховується і магнітна складова вважається $\mu_r = \text{const}$.

2.2.5 Чисельні оцінки

Для реальних показників індукційних процесів необхідно отримати просторово-часову залежність збуджуваного струму за довільних частот електромагнітних процесів, ніяк не пов'язаних з геометрією та електрофізичними характеристиками металів що підлягають нагріву.

Повернемося до L-образу лінійної густини вихрового струму, індукованого у тонкостінному листовому металі. Вираз (2.52) перепишемо у вигляді більш зручному для подальших тотожних перетворень.

$$J_{\varphi}(p, r) = -\frac{(\mu_0 \mu_{r2} \gamma_1)}{2} \cdot \int_0^{\infty} F(\lambda) e^{-\lambda h} \frac{(p \cdot j_i(p)) \cdot M(p, \lambda)}{q(p, \lambda) \cdot G(p, \lambda)} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2.58)$$

$$\text{де} \quad M(p, \lambda) = \left[\left(1 - \text{ch}(q(p, \lambda)d) \right) - \frac{1}{\mu_{r1}} \cdot \left(\frac{(q(p, \lambda)d)}{(\lambda d)} \right) \text{sh}(q(p, \lambda)d) \right]$$

$$G(p, \lambda) = \left(1 + \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}^2} \left(\frac{(q(p, \lambda)d)}{(\lambda d)} \right)^2 \right) \text{sh}(q(p, \lambda)d) + \frac{(1 + \mu_{r2})}{\mu_{r1}} \left(\frac{(q(p, \lambda)d)}{(\lambda d)} \right) \text{ch}(q(p, \lambda)d)$$

У виразі (2.58) перейдемо до простору оригіналів. Отримаємо просторово-часову залежність за довільних просторово-часових частотних характеристик електромагнітних процесів.

Для обчислення особливих точок підінтегральної функції добуток повздовжнього хвильового числа на товщину листової заготовки представимо як уявну величину:

$$(q(p, \lambda)d) = i\beta_k. \quad (2.59)$$

Підставляючи (2.59) до знаменника, отримуємо рівняння для величин β_k :

$$\left(1 - \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}^2} \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)}\right)^2\right) \sin \beta_k + \frac{(1 + \mu_{r2})}{\mu_{r1}} \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)}\right) \cos \beta_k = 0. \quad (2.60)$$

Рівнянню (2.60) задовольняють пари рішень $\pm \beta_k$. Це значить, що доданки які містять величини β_k , повинні подвоюватися, за виключенням кореня $\beta_k = 0$. Можна додати, що для достатньо тонкостінних листових металів, коли $(\lambda d) \rightarrow 0$, наближені значення коренів будуть визначатися залежністю:

$$\beta_k \approx \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} \cdot (1 + \mu_{r2}) \cdot (\lambda d)} + k\pi, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.61)$$

Як впливає із (2.60) та (2.59), особливими точками функції комплексної змінної під знаком інтегралу у виразі (2.58) є прості відмінні від нуля полюси $-p_k$:

$$p_k = -\frac{(\beta_k^2 + (\lambda d)^2)}{\tau_1}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.62)$$

де $\tau_1 = (\mu_0 \mu_{r1}) \gamma_1 d^2$ – характерний час дифузії поля в листовий метал [91,113].

Далі, у відповідності до теореми об інтегралі дрібно-раціональної функції і з теоремою звернення згортки з виразу (2.58) знаходимо відповідну часову залежність:

$$\frac{p \cdot j(p) \cdot M(p, \lambda)}{G(p, \lambda)} \leftrightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \frac{M(p, \lambda)}{\frac{dG(p, \lambda)}{dp}} \bigg|_{p=p_k} \cdot \left(\frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{p_k \cdot t} \right). \quad (2.63)$$

Загалом, після підстановки (2.59), (2.63) до (2.58) та необхідних тотожних перетворень знаходимо оригінал для лінійної густини індукованого струму.

$$J_{\varphi}(r, t) = j_{im} \left(\frac{2}{d} \cdot \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \times \\ \times \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot J_1(\lambda r) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{M_k(\lambda d)}{\Phi_k(\lambda d)} \left(\frac{dj_i(t)}{dt} \cdot e^{p_k \cdot t} \right) d\lambda. \quad (2.64)$$

де j_{im} та $j(t)$ – амплітуда і часова залежність струму в індукторі, β_k – корені рівняння (2.60),

$$M_k(\lambda d) = \left[(1 - \cos \beta_k) + \frac{1}{\mu_{r1}} \cdot \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} \right) \sin \beta_k \right],$$

$$\Phi_k(\lambda d) = \cos \beta_k \left(1 + \frac{(1 + \mu_{r2})}{\mu_{r1}} \left(\frac{1}{(\lambda d)} \right) - \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}^2} \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} \right)^2 \right) - \\ - \sin \beta_k \frac{1}{\mu_{r1}} \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} \right) \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \frac{2}{(\lambda d)} + (1 + \mu_{r2}) \right).$$

Вираз (2.64) приведемо до вигляду зручного для обчислень.

Введемо нову безрозмірну змінну інтегрування – $x = (\lambda d)$, $x \in [0, \infty)$, і врахуємо гармонічну часову залежність струму в індукторі,

$$j(t) = \sin(\omega t) \rightarrow \frac{dj(t)}{dt} = \omega \cdot \cos(\omega t).$$

Після виконання необхідних тотожних перетворень знайдемо відносну лінійну густину індукованого струму (нормування на максимум збуджуючого сигналу за $\omega \cdot t = 0,5\pi$):

$$J_{\varphi 0}(r, \psi) = \frac{J_{\varphi}(r, t) \Big|_{t=\frac{\psi}{\omega}}}{j_{im}} = 2 \cdot \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \times \\ \times \int_0^{\infty} F(x) \cdot e^{-x \frac{h}{d}} \cdot J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{M_k(x)}{\Phi_k(x)} \cdot f_k(x, \psi) dx \quad , \quad (2.65)$$

де $F(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \frac{R_1}{d}}^{x \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) dy$, β_k – корені рівняння:

$$\left(1 - \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}^2} \left(\frac{\beta_k}{x} \right)^2 \right) \sin \beta_k + \frac{(1 + \mu_{r2})}{\mu_{r1}} \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \cos \beta_k = 0,$$

$$M_k(x) = \left[(1 - \cos \beta_k) + \frac{1}{\mu_{r1}} \cdot \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \sin \beta_k \right],$$

$$\begin{aligned} \Phi_k(x) = & \cos \beta_k \left(1 + \frac{(1 + \mu_{r2})}{\mu_{r1}} \cdot \left(\frac{1}{x} \right) - \frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}^2} \cdot \left(\frac{\beta_k}{x} \right)^2 \right) - \\ & - \sin \beta_k \cdot \frac{1}{\mu_{r1}} \cdot \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \cdot \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \cdot \frac{2}{x} + (1 + \mu_{r2}) \right), \end{aligned}$$

$$f_k(x, \psi) = \frac{1}{[1 + g_k^2(x)]} \cdot \left(\sin \psi + g_k(x) \cdot (\cos \psi - e^{-g_k(x) \cdot \psi}) \right),$$

$$g_k(x) = \frac{(\beta_k^2 + x^2)}{\omega \cdot \tau_1}.$$

Із виразу (2.65) знаходимо коефіцієнт пропорційності між максимумами густини індукованого струму та густини збуджуючого струму в індукторі. Його величина визначає трансформацію енергії у досліджуваній системі «індуктор – тонкостінний листовий метал».

$$K = \left| J_{\varphi 0}(r, \psi) \right|_{\max} = \left| J_{\varphi 0} \left(r, \psi = \frac{\pi}{2} \right) \right|, \quad (2.66)$$

де

$$J_{\varphi 0} \left(r, \psi = \frac{\pi}{2} \right) = 2 \left(\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}} \right) \cdot \int_0^{\infty} F(x) \cdot e^{-x \frac{h}{d}} \cdot J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{M_k(x)}{\Phi_k(x)} f_k \left(x, \psi = \frac{\pi}{2} \right) dx.$$

Обчислення проведемо для інструментів для індукційного нагріву створених в ЛЕТ ХНАДУ.

Вихідні дані для розрахунків.

1. Геометрія індукторної системи:

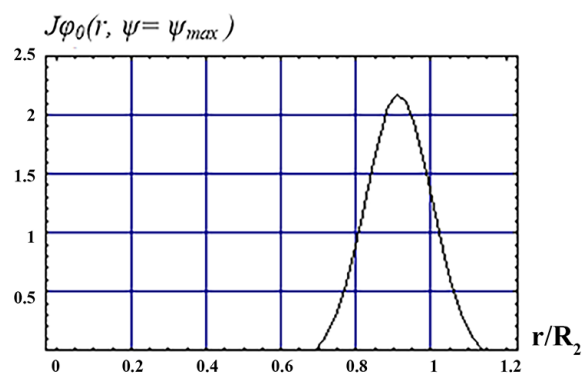
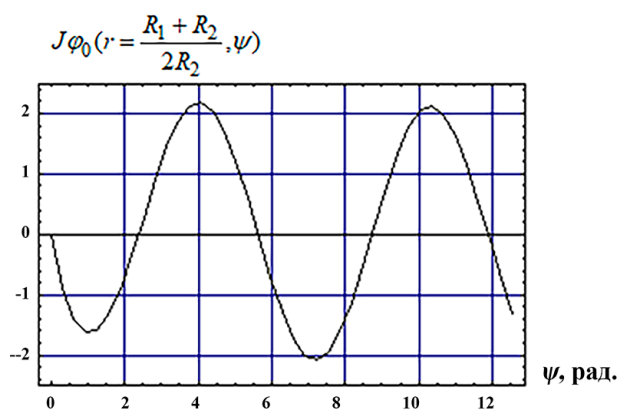
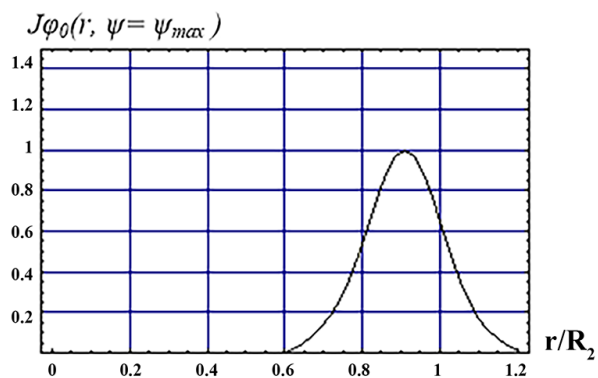
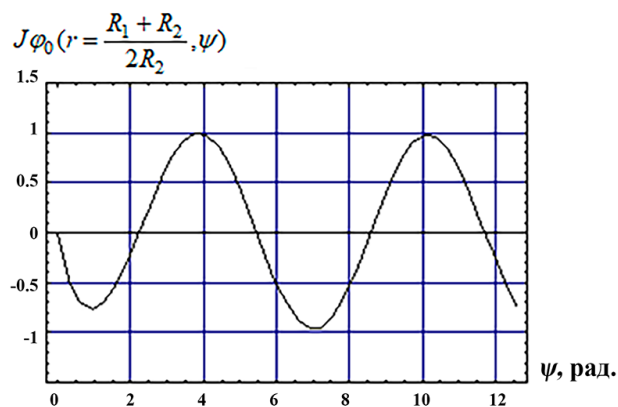
Радіальні розміри – $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,03$ м,

Відстань від індуктора до металу – $h = 0,001$ м

2. Частота збуджуючого струму: $f = 25$ кГц

3. Величина відносної магнітної проникності [114]: $\mu_r \in [1, 1000]$

Результати розрахунків, виконаних за допомогою отриманих аналітичних залежностей графічно наведені нижче.



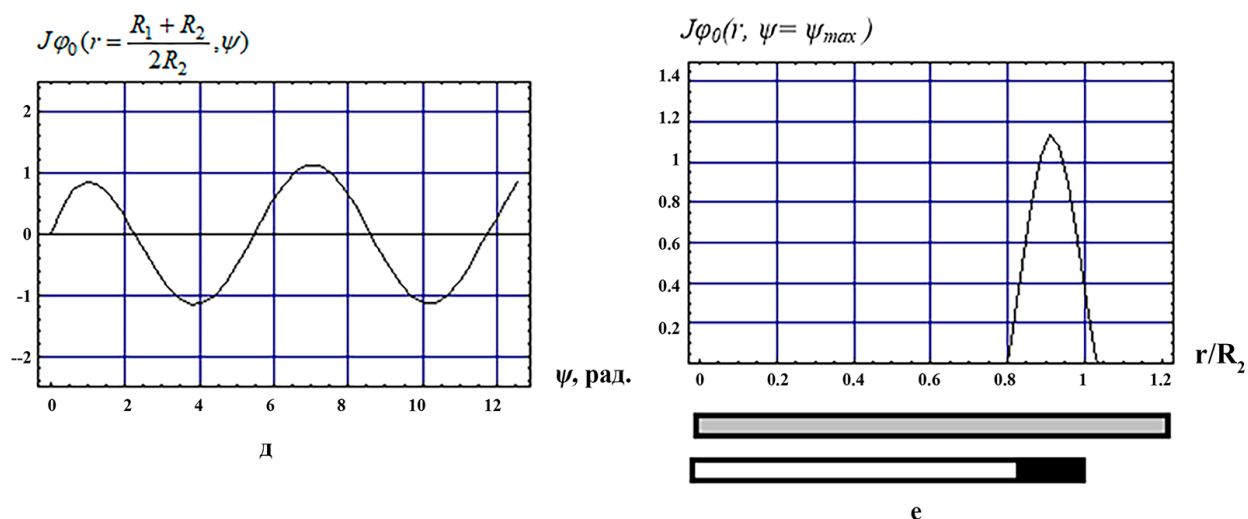


Рис. 2.9. Просторово-часові розподіли величин індукованих струмів за різних рівнів намагніченості сердечника індуктора і листового металу

(нормування на максимум при $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$):

а), б) – фазова і радіальна залежності для $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$,

в), г) – фазова і радіальна залежності для $\mu_{r1} = 1$, $\mu_{r2} = 100$

д), е) – фазова і радіальна залежності для $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 5$

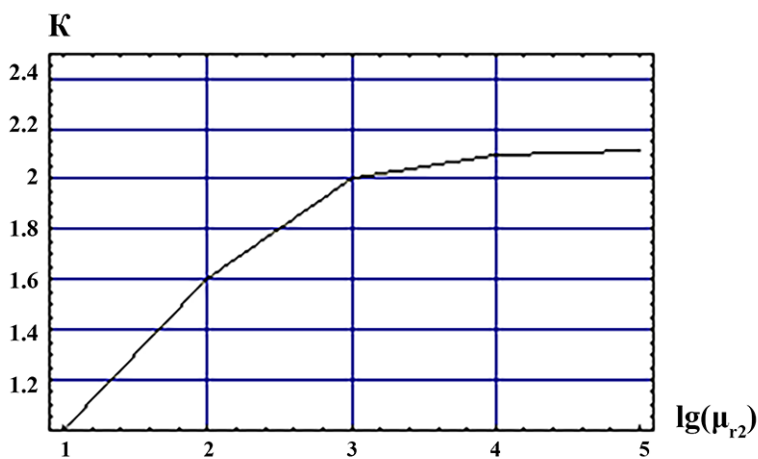


Рис. 2.10. Інтенсивність індукційного процесу в залежності від рівня намагніченості середовища з індуктором

Прокоментуємо графічні ілюстрації проведених обчислень:

– при всіх рівнях можливої намагніченості фазова форма індукованих струмів на початкових ділянках, де $\varphi < 2\pi$, має характерне спотворення,

обумовлене тонкостінністю листового металу. Проте для процесу збудження вихрових струмів у реальних часових інтервалах це спотворення не є суттєвим (рис. 2.9.а,в,д);

- при збільшенні рівня намагніченості об'єктів системи що розглядається (особливо у випадку намагнічування металу листової заготовки) падає умовна ширина радіального розподілу індукованих струмів (рис. 2.9.б,г,е);

- у випадку однакової намагніченості сердечника індуктора та тонкостінного металу величини збуджуваних вихрових струмів практично не залежать від магнітних властивостей об'єктів системи, тобто інтенсивність процесу збудження визначається виключно рівнем намагніченості середовища з індуктором;

- коефіцієнт пропорційності між амплітудами густини індукованого та збуджуючого струмів не перевищує величини $K \leq 2.15$, тобто кількісно оцінка впливу магнітних властивостей середовища з індуктором на індукованого струму приймає значення у діапазоні 0...115% (розрахунки для практично нереальних $\mu_{r2} \gg 1000$ на рис. 2.10 виконані виключно для демонстрації асимптоти функції $K(\mu_{r2})$);

- основний ріст інтенсивності процесу збудження вихрових струмів спостерігається при рівнях намагніченості до $\mu_{r2} < 1000$, подальший ріст магнітної проникності сердечника індуктора не впливає на величини індукованих струмів (рис. 2.10.).

Висновки за розділом 2

1. Досліджені електромагнітні процеси у масивному металевому зразку при збудженні поля плоским соленоїдом з феритовим сердечником – інструментом індукційного нагріву.

2. Показано, що для реальних конструктивних, часових та електрофізичних даних у діапазоні намагніченості феритового сердечника в

індукторі – $\mu_{r2} \in [1, 1000]$ має місце дійсний ріст інтенсивності індукційного процесу.

3. Показано, що при введенні додаткового джерела магнітного поля з феритовим наповненням має місце подальше зростання амплітуд індукованих струмів. Так, у системі з двома індукторами можливе збільшення інтенсивності індукційного процесу більше ніж у $\sim 1,5$ рази.

4. Запропоновані експериментальні конструкції ефективних інструментів індукційного нагріву з феритовими сердечниками.

5. Досліджені електромагнітні процеси у тонкостінному листовому зразку при збудженні поля плоским соленоїдом з феритовим сердечником – інструментом індукційного нагріву.

6. Показано, що у діапазоні намагніченості фериту в індукторі – $\mu_{r2} \in [1, 1000]$ так само, як і у випадку масивного металевого зразка, має місце дійсний ріст інтенсивності індукційного процесу.

Узагальнення результатів виконаного аналізу показало, що у формуванні індукційного сигналу визначну роль має намагніченість середовища із джерелами магнітного поля.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора: [7,11,15,16,24]

РОЗДІЛ III. МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ ПРИТЯГАННЯ ЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ ІЗ «ПРЯМИМ ПРОПУСКАННЯМ СТРУМУ»

Дослідження електродинамічних процесів передбачає освітлення принципу дії, постановку та вирішення задач, кінцевим результатом яких повинні стати фізико-математичні залежності для характеристик процесів що протікають, в умовах інтенсивного проникнення діючих електромагнітних полів. Аналіз цих залежностей дозволить визначити вимоги, виконання яких забезпечить не лише дієвість, але і ефективність інструменту пропонованого принципу дії. Відзначимо, що вплив проникнення на силові характеристики процесів притягання за «прямого пропускання струму» і, відповідно, вибір прийняттого діапазону робочих частот відсутні у відомих публікаціях [106,107]. Хоча, очевидно, що часові параметри збуджуваних полів повинні грати визначну роль у процесах силового впливу на об'єкт притягання [112].

3.1 Принцип дії, постановка задачі

На рис. 3.1 представлена одна із схем реалізації магнітно-імпульсного притягання з «прямим пропусканням струму» через оброблюваний метал.

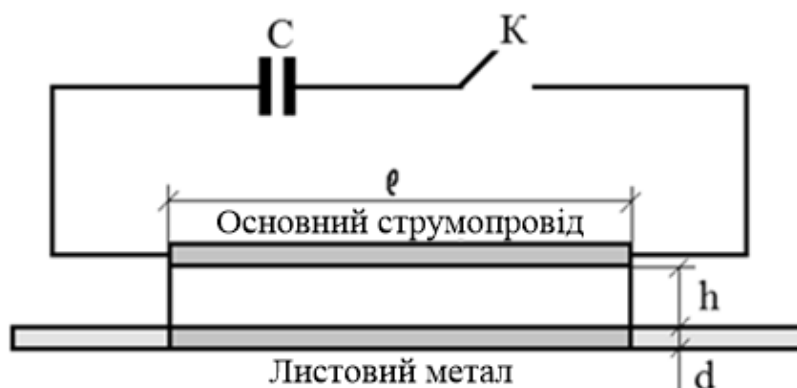


Рис. 3.1. Принципова схема реалізації магнітно-імпульсного притягання з «прямим пропусканням струму» через оброблюваний метал,
С – батарея ємнісних накопичувачів енергії, К – комутатор розрядного кола

Центральним елементом інструменту силового притягання представленого принципу дії є «основний струмопровід». Згідно до схеми, останній під'єднується паралельно до оброблюваної ділянки металу. Після включення комутатору – К попередньо заряджений ємнісний накопичувач розряджається на навантаження – магнітно-імпульсну систему, що включає основний струмопровід та задану ділянку листового металу.

Паралельні провідники (основний струмопровід та оброблюваний метал) з однонаправленими струмами будуть зазнавати взаємного притягання (за законом Ампера [3]). Оскільки основний струмопровід жорстко зафіксований, оброблювана ділянка металу буде притягнута до його поверхні.

Як впливає із [1,2,106,112], дієвість будь-якого методу магнітно-імпульсного притягання визначається вибором робочих частот збуджуваного поля. Ефект притягання можливий лише у низькочастотному режимі, доволі грубе наближення до якого описується нерівністю (1.1).

Фізично, пояснення такому висновку ілюструється схемою на рис. 3.2, де провідники зі струмами «прозорі для діючих полів».

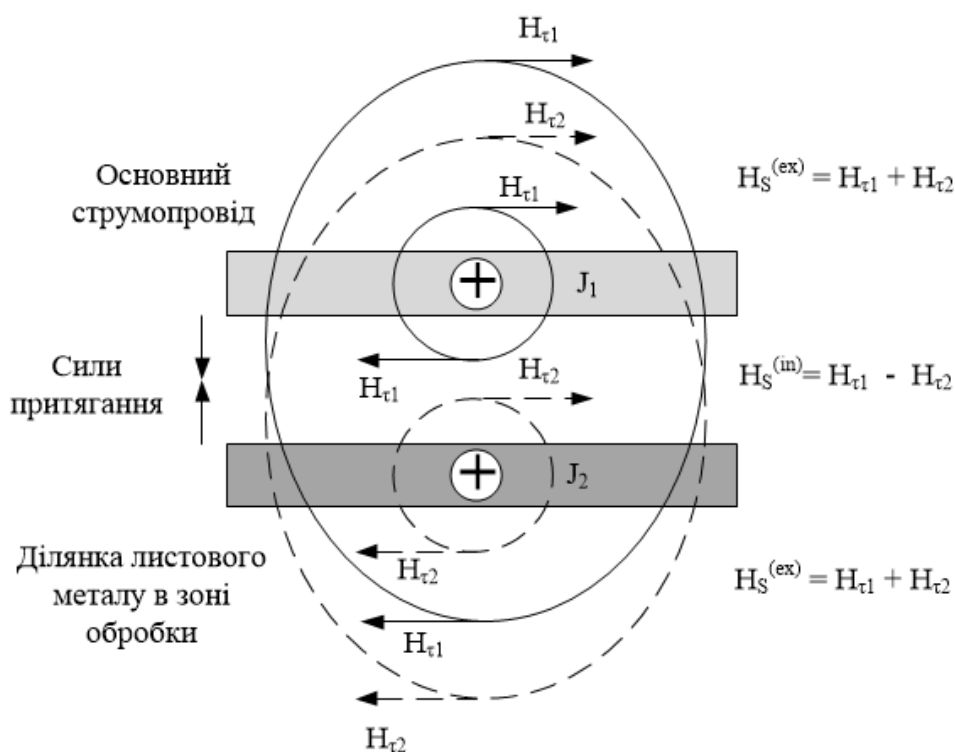


Рис. 3.2. Ілюстрація розподілу магнітних полів та сил притягання:

$J_{1,2}$ – струми що протікають, $H_{\tau 1,2}$ – тангенціальні компоненти напруженостей, $H_S^{(ex)}$ – сумарна напруженість поза системою, $H_S^{(in)}$ – сумарна напруженість всередині системи

Згідно до схеми на рис. 3.2., струми що протікають – $J_{1,2}$ збуджують проникаючі магнітні поля із тангенціальними складовими напруженостей – $H_{\tau 1,2}$. Якщо струми однонаправлені, тоді результуючі поля будуть дорівнювати сумі та різниці напруженостей, що відповідають кожному із струмів що протікають:

$$\begin{cases} H_S^{(ex)} = H_{\tau 1} + H_{\tau 2} - \text{поза системою,} \\ H_S^{(in)} = H_{\tau 1} - H_{\tau 2} - \text{всередині системи.} \end{cases}$$

В ідеалі, коли струми рівні між собою, рівні й напруженості збуджуваних полів, $H_{\tau 1} = H_{\tau 2} = H$. Відповідно, поза системи – $H_S^{(ex)} = 2H$, всередині – $H_S^{(in)} = 0$. Розподілені сили притягання, обумовлені магнітним тиском на провідники ззовні, будуть визначатися відомим співвідношенням:

$$F_{attr} = \frac{\mu_0}{2} \cdot (2H)^2 \quad [3,90].$$

Доречне зауваження щодо відштовхування різнонаправлених струмів. Якщо знову ж таки вони рівні, але направлені протилежно, результуючі напруженості поза та всередині системи конвертуються так, що $H_S^{(ex)} = 0$ та $H_S^{(in)} = 2H$. Збуджувані сили магнітного тиску будуть відштовхувати провідники один від одного з силою: $F_{rep} = \frac{\mu_0}{2} \cdot (2H)^2 \quad [3,90]$.

Отже, висновки фізичного обґрунтування дієвості системи із «прямим пропусканням струму» повністю узгоджуються із фундаментальними положеннями закону Ампера [3], що свідчить про достовірність проведеного аналізу.

Як було вказано раніше, публікації присвячені магнітно-імпульсному притяганню за «прямого пропускання струму» через оброблюваний листовий метал, вельми нечисельні [106,107].

Найбільш цікавими у цитованих роботах є наступні виділені положення:

- Запропонована та принципово апробована конструкція інструменту магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» для видалення вм'ятин у плоских листових зразках [106].
- Чисельні оцінки за відсутності дифузних ефектів показали можливість отримання достатньо високих амплітуд сил взаємного притягання [107].

3.2 Електродинамічні процеси, співвідношення для струмів та сил

Під час вирішення поставленої задачі будемо слідувати алгоритмам, що представлені та розвинуті у роботах [1,2,112].

Справедливо буде відзначити, що подібна задача вже розглядалася авторами наукових видань [84,90]. Однак безпосереднє використання отриманих ними формул та співвідношень для проведення дійсних розрахунків не уявляється можливим через обмеженість знайдених результатів умовами постановки та вирішення задач.

3.2.1 Фізико-математична модель, прийняті припущення

Для аналізу електромагнітних процесів візьмемо розрахункову модель (рис. 3.3), що відповідає поперечним перерізам системи у ортогональних напрямках.

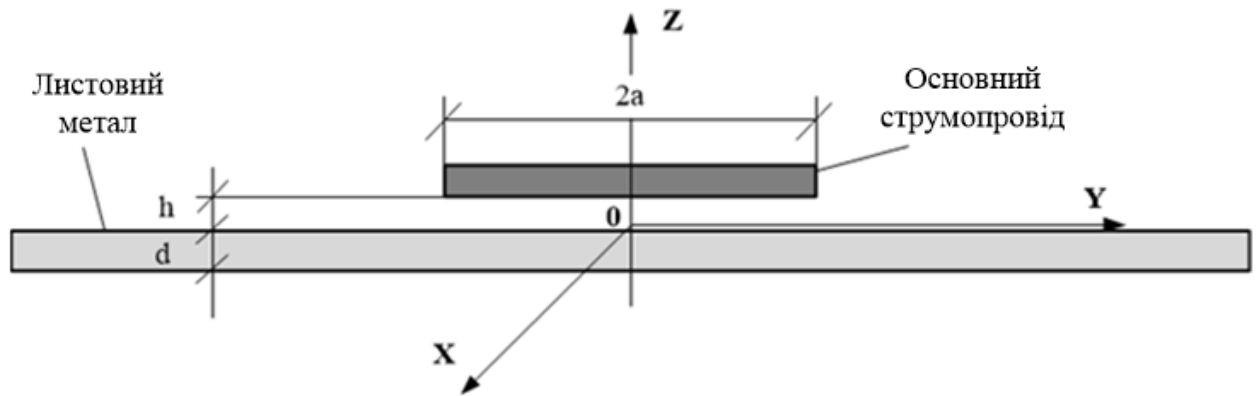


Рис. 3.3. Розрахункова модель

Сформулюємо припущення, доволі адекватні реальній ситуації та такі, що дозволяють отримати аналітичні залежності у квадратурах.

- Заготовка це листовий немагнітний метал із достатньо великими поперечними розмірами, товщиною – d та питомою електропровідністю – γ .

- Основний струмопровід «прозорий» для діючих полів, так що його метал не чинить ніякого впливу на електромагнітні процеси у системі.

- Має місце геометрична симетрія системи відносно координатної площини ZOX .

- Вздовж осі абсцис система має достатньо велику протяжність, таку що $\frac{\partial}{\partial x} = 0$.

- В основному струмопроводі у напрямку осі OX тече рівномірно розподілений струм із густиною $j(t) = j_m \cdot j_t(t)$, де $j_m = \frac{I_m}{2a}$ – амплітуда (I_m – максимум струму), $j_t(t)$ – часова залежність.

- Частотні характеристики збуджуваного струму такі, що виконується умова квазістаціонарності за Ландау $\frac{\omega}{c} \cdot b \ll 1$ [115], тут ω – циклічна частота процесу, c – швидкість світла у вакуумі, b – довільний характерний розмір системи.

В системі збуджується електромагнітне поле із ненульовими компонентами напруженості: $E_x \neq 0$, $H_{y,z} \neq 0$.

3.2.2 Інтеграли рівнянь Максвелла в L-просторі

В рамках прийнятих припущень рівняння Максвелла для ненульових складових напруженостей електромагнітного поля, перетворених за Лапласом (L-перетворення) із урахуванням нульових початкових умов приймають вид [113,115,116]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z), \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z), \end{array} \right. \quad (3.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z). \end{array} \right. \quad (3.3)$$

де p – параметр перетворення Лапласа,

$$E_x(p, y, z) = L\{E_x(t, y, z)\},$$

$$H_{y,z}(p, y, z) = L\{H_{y,z}(t, y, z)\},$$

$$j_x(p, y, z) = L\{j_x(t, y, z)\}$$

μ_0 – магнітна проникність вакууму.

У загальному випадку густина струму у правій частині рівняння (3.1) записується у вигляді:

$$j_x(p, y, z) = (p \cdot \varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_x(p, y, z) + j_{xi}(p, y, z), \quad (3.4)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму,

$j_{xi}(p, y, z)$ – густина струму в основному струмопроводі,

$$j_{xi}(p, y, z) = j(p) \cdot f(y) \cdot \delta(z - h), \quad j(p) = j_m \cdot j_t(p), \quad j_t(p) = L\{j_t(t)\}$$

$j_t(t)$ – часова залежність збуджуваного струму,

$f(y)$ – функція поперечного розподілу густини струму,

$\delta(z - h)$ – імпульсна функція Дірака

Під час вирішення поставленої задачі в прийнятій моделі розрахунку слід виділити області з однорідними електрофізичними характеристиками.

Геометрична та електродинамічна симетрія досліджуваної системи відповідно рис. 3.1 дозволяє вважати, що такими є:

а) вільний напівпростір над листовим металом заготовки зі сторони основного струмопроводу, де $z \in [0, \infty)$;

б) область листового металу заготовки, де $z \in [-d, 0)$;

в) вільний напівпростір із зовнішньої сторони листового металу, де $z \in (-\infty, 0]$.

Із диференціальних рівнянь (3.1) – (3.3) з урахуванням виразу (3.4) отримаємо рівняння для повздовжньої компоненти напруженості електричного поля $E_x(p, y, z)$ у виділених областях:

а) вільний напівпростір із основним струмопроводом, $z \in [0, \infty)$

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = p \cdot \mu_0 \cdot j_x(p, y, z), \quad (3.5)$$

б) листовий метал, $z \in [-d, 0)$

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = \gamma \cdot E_x(p, y, z), \quad (3.6)$$

в) вільний напівпростір із зовнішньої сторони листового металу заготовки
 $z \in (-\infty, 0]$

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = 0. \quad (3.7)$$

Для рівнянь (3.5) – (3.7) використаємо інтегральне косинус-перетворення Фур'є [113,116], допустимість якого обумовлена геометричною та електричною симетрією задачі що розглядається відносно площини ZOX .

Таким чином, маємо

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x(p, y, z) = \int_0^{\infty} E_x(p, \lambda, z) \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \end{array} \right. \quad (3.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} j_x(p, y, z) = \int_0^{\infty} j_x(p, \lambda, z) \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \end{array} \right. \quad (3.9)$$

де
$$j_x(p, y, z) = \int_0^{\infty} j_x(p, \lambda, z) \cdot \cos(\lambda y) dy = j_m \cdot f(\lambda) \cdot \delta(z - h),$$

$$f(\lambda) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} f(y) \cdot \cos(\lambda y) dy = f(\lambda) = \frac{2a}{\pi} \cdot \frac{\sin(\lambda a)}{(\lambda a)}.$$

Із врахуванням (3.8) та (3.9) рівняння (3.5) – (3.7) перетворюються до виду звичайних лінійних диференціальних рівнянь другого порядку [113]:

а) $z \in [0, \infty)$

$$\frac{d^2 E_x(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 E_x(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z - h), \quad (3.10)$$

де $K(p, \lambda) = \mu_0 \cdot p \cdot j(p) \cdot f(\lambda)$;

б) $z \in [-d, 0)$

$$\frac{d^2 E_x(p, \lambda, z)}{dz^2} - q^2(p, \lambda) \cdot E_x(p, \lambda, z) = 0, \quad (3.11)$$

де $q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p \cdot \mu_0 \cdot \gamma}$ – параметр розподілу,

в) $z \in (-\infty, 0]$

$$\frac{d^2 E_x(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 E_x(p, \lambda, z) = 0. \quad (3.12)$$

Загальні інтеграли рівнянь (3.10), (3.11) та (3.12) для виділених областей мають вид [113,116]:

а) у вільному напівпросторі зі сторони основного струмопроводу, $z \in [0, \infty)$, умові обмеженості за $z \rightarrow \infty$ задовольняє функція:

$$E_x^{(1)}(p, \lambda, z) = C(p, \lambda) e^{-\lambda z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \left(sh(\lambda(z - h)) \cdot \eta(z - h) - 0,5 e^{\lambda(z - h)} \right), \quad (3.13)$$

де $C(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування

б) в листовому металі, $z \in [-d, 0)$:

$$E_x^{(2)}(p, \lambda, z) = D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda)z} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda)z}, \quad (3.14)$$

де $D_{1,2}(p, \lambda)$ – довільні сталі інтегрування

в) в вільному напівпросторі із зовнішньої сторони листового металу заготовки, $z \in (-\infty, 0]$, умові обмеженості за $z \rightarrow -\infty$ задовольняє функція:

$$E_x^{(3)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda(z+d)}, \quad (3.15)$$

де $B(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування.

Зображення дотичних складових напруженості магнітного поля можна знайти за допомогою формул (3.13) – (3.15) та рівняння (3.3):

а) $z \in [0, \infty)$

$$H_y^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot \left(C(p, \lambda)e^{-\lambda z} - \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \left(\operatorname{ch}(\lambda(z-h))\eta(z-h) - 0,5e^{\lambda(z-h)} \right) \right). \quad (3.16)$$

б) $z \in [-d, 0)$

$$H_y^{(2)}(p, \lambda, z) = -\frac{q(p, \lambda)}{p\mu_0} \cdot \left(D_1(p, \lambda)e^{q(p, \lambda)z} - D_2(p, \lambda)e^{-q(p, \lambda)z} \right). \quad (3.17)$$

в) $z \in (-\infty, 0]$,

$$H_y^{(3)}(p, \lambda, z) = -\frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda(z+d)}. \quad (3.18)$$

Із умови безперервності дотичних компонент напруженості електромагнітного поля на границях виділених областей можна отримати системи алгебраїчних рівнянь для визначення довільних сталих інтегрування у виразах (3.13) – (3.18).

У подальшому нас буде цікавити збудження електромагнітного поля лише у листовому металі. Тому обмежимося визначенням невідомих довільних сталих $D_{1,2}(p, \lambda)$.

Опускаючи проміжні математичні перетворення, напишемо вираз для L-образу напруженості електричного поля в листовому металі, $z \in [-d, 0]$.

$$E_x(p, \lambda, z) = -\frac{K(p, \lambda)e^{-\lambda h}}{\lambda} \times \frac{\left(sh(q(p, \lambda)(z + d)) + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \right) ch(q(p, \lambda)(z + d)) \right)}{\Delta(p, \lambda)}. \quad (3.19)$$

$$\text{де} \quad \Delta(p, \lambda) = \left(1 + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \right)^2 \right) \cdot sh(q(p, \lambda)d) + 2 \cdot \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \right) \cdot ch(q(p, \lambda)d).$$

Вираз (3.19) помножимо на питому електропровідність листового металу – γ . Результат підставимо до формули (3.8).

Після всіх необхідних підстановок знайдемо густину індукованого струму в L-просторі.

$$j_x(p, y, \zeta) = -\left(\frac{2a\tau}{\pi d^2} \right) \cdot (p \cdot j(p)) \cdot \int_0^\infty \frac{\sin(\lambda a)}{(\lambda a)} \cdot \frac{e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot \frac{F(p, \lambda, \zeta)}{\Delta(p, \lambda)} \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \quad (3.20)$$

де $\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерний час дифузії в листовий метал [116].

$$F(p, \lambda, \zeta) = \left(\begin{aligned} &sh((q(p, \lambda)d) \cdot (1 - \zeta)) + \\ &+ \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \right) ch((q(p, \lambda)d) \cdot (1 - \zeta)) \end{aligned} \right).$$

$\zeta = \left(-\frac{z}{d} \right)$ – просторова змінна, пов'язана із товщиною листового металу, $\zeta \in [0, 1]$.

3.2.3 Струми та сили в просторі оригіналів

Для виразу (3.20) виконаємо зворотне перетворення Лапласа [113,116].

Для обчислення особих точок підінтегральної функції прирівняємо до нуля знаменник дробу виразу (3.20) та представимо добуток – $q(p, \lambda)$ на товщину листової заготовки як уявну величину:

$$\begin{cases} \Delta(p, \lambda) = 0 \\ (q(p, \lambda) \cdot d) = i \cdot \beta_k \end{cases} \quad (3.21)$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

За допомогою системи (3.21) отримаємо рівняння для величин β_k :

$$ctg \beta_k = 0,5 \cdot \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} - \frac{(\lambda d)}{\beta_k} \right), \quad (3.22)$$

Як випливає із (3.21) та (3.22), особими точками функції комплексної змінної під знаком інтегралу у виразі (3.20) є прості, відмінні від нуля полюси – p_k :

$$p_k = -\frac{1}{\tau} \cdot \left(\beta_k^2 + (\lambda \cdot d)^2 \right), \quad k = 0, \pm 1, 2, \dots \quad (3.23)$$

Далі, у відповідності до теореми про інтеграл раціонального дробу та до теореми звернення згортки функції знаходимо із виразу (3.20) відповідну часову залежність:

$$\begin{aligned} & \frac{p \cdot j(p) \cdot \left(sh\left((q(p, \lambda) \cdot d)(1 - \zeta)\right) + \left(\frac{(q(p, \lambda) \cdot d)}{(\lambda d)} \right) \cdot ch\left((q(p, \lambda) \cdot d)(1 - \zeta)\right) \right)}{\Delta(p, \lambda)} \leftrightarrow \\ & \leftrightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \cdot \left. \frac{i \cdot \left(\sin(\beta_k(1 - \zeta)) + \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} \right) \cdot \cos(\beta_k(1 - \zeta)) \right)}{\frac{d}{dp}[\Delta(p, \lambda)]} \right|_{p=p_k} \cdot \frac{dj_t(t)}{dt} \cdot e^{p_k t}, \quad (3.24) \end{aligned}$$

де $\zeta = -\frac{z}{d}$, $\zeta \in [0, 1]$ – координата, пов’язана із товщиною листового металу, у відносних одиницях;

$$\delta_k = \begin{cases} 1, 0 & , \text{ для } k = 0 \\ 2, 0 & , \text{ для } k \neq 0 \end{cases}.$$

У підсумку, із використанням залежності (3.24) після необхідних тотожних перетворень знаходимо оригінал для густини струму збуджуваного в листовому металі.

$$j_x(t, \zeta, y) = I_m \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^\infty \frac{\sin(\lambda a)}{(\lambda a)} e^{-\lambda h} \sum_{k=0}^\infty \delta_k \frac{F(\beta_k, \lambda, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \lambda)} \left(\frac{dj_t(t)}{dt} \cdot e^{p_k t} \right) \lambda \cos(\lambda y) d\lambda \quad (3.25)$$

де
$$F(\beta_k, \lambda, \zeta) = \beta_k \cdot \left[\sin(\beta_k(1-\zeta)) + \left(\frac{\beta_k}{(\lambda \cdot d)} \right) \cdot \cos(\beta_k(1-\zeta)) \right],$$

$$\Phi(\beta_k, \lambda) = \cos(\beta_k) \cdot [(\lambda d)^2 + 2(\lambda d) - \beta_k^2] + 2\beta_k \cdot \sin(\beta_k) \cdot [(\lambda d) + 1].$$

Вираз (3.25) приведемо до виду, зручного для розрахунків. Введемо нову змінну інтегрування – $\alpha = \lambda d$, $\alpha \in [0, \infty)$, $d\lambda = \frac{1}{d} \cdot d\alpha$.

$$j_x(t, \zeta, y) = I_m \left(\frac{2}{\pi d^2} \right) \int_0^\infty \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} \cdot e^{-\alpha \frac{h}{d}} \times \sum_{k=0}^\infty \delta_k \frac{F(\beta_k, \alpha, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left(\frac{dj_t(t)}{dt} \cdot e^{p_k t} \right) \alpha \cos\left(\alpha \frac{y}{d}\right) d\alpha \quad (3.26)$$

де
$$F(\beta_k, \alpha, \zeta) = \beta_k \cdot \left[\sin(\beta_k(1-\zeta)) + \left(\frac{\beta_k}{\alpha} \right) \cdot \cos(\beta_k(1-\zeta)) \right],$$

$$\Phi(\beta_k, \alpha) = \cos(\beta_k) \cdot [\alpha^2 + 2\alpha - \beta_k^2] + 2\beta_k \cdot \sin(\beta_k) \cdot [\alpha + 1],$$

β_k задовольняє рівнянню: $\operatorname{ctg} \beta_k = 0,5 \cdot \left(\frac{\beta_k}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta_k} \right).$

Залежність (3.26) проінтегруємо по товщині листового металу. Отримаємо формулу для обчислення лінійної густини, що описує поперечний розподіл індукованого струму:

$$J_x(t, y) = I_m \left(\frac{2}{\pi d} \right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{\sin \left(\alpha \frac{a}{d} \right)}{\left(\alpha \frac{a}{d} \right)} e^{-\alpha \frac{h}{d}} \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left(\frac{dj_t(t)}{dt} e^{p_k t} \right) \alpha \cos \left(\alpha \frac{y}{d} \right) d\alpha, \quad (3.27)$$

де $G(\beta_k, \alpha) = \left[(1 - \cos \beta_k) + \left(\frac{\beta_k}{\alpha} \right) \cdot \sin \beta_k \right].$

Інтеграл залежності (3.27) за змінною $-y \in [-a, a]$ дає вираз для величини струму індукованого в металі листової заготовки:

$$I_x(t) = I_m \left(\frac{4a}{\pi d} \right) \cdot \int_0^{\infty} \left(\frac{\sin \left(\alpha \frac{a}{d} \right)}{\left(\alpha \frac{a}{d} \right)} \right)^2 e^{-\alpha \frac{h}{d}} \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left(\frac{dj_t(t)}{dt} e^{p_k t} \right) \alpha d\alpha. \quad (3.28)$$

Нехай зовнішній струм від стороннього джерела подається до листового металу так, що його розподіл по поперечному перерізу області під основним струмопроводом також є рівномірним.

Як результат суперпозиції стороннього та індукованого сигналів, знайдемо залежності для результуючого струму та його густини у зазначеній обмеженій зоні листового металу.

Сумарний струм запишеться в виді:

$$I_x^{(S)}(t) = I_m \cdot \left[j_t(t) - \left(\frac{4a}{\pi d} \right) \times \int_0^\infty \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} e^{-\alpha \frac{h}{d}} \sum_{k=0}^\infty \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left(\frac{dj_t(t)}{dt} e^{p_k t} \right) \alpha d\alpha \right]. \quad (3.29)$$

Результуюча густина струму, що протікає у зазначеній частині листового металу із урахуванням виразу (3.29), запишеться в виді:

$$j_x^{(S)}(t, \zeta, y) = \frac{I_m}{(2ad)} \cdot \left[j_t(t) - \left(\frac{4a}{\pi d} \right) \times \int_0^\infty \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} e^{-\alpha \frac{h}{d}} \sum_{k=0}^\infty \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \alpha, \zeta)} \left(\frac{dj_t(t)}{dt} e^{p_k t} \right) \times \alpha \cos\left(\alpha \frac{y}{d}\right) d\alpha \right]. \quad (3.30)$$

Формула (3.30) дозволяє розрахувати розподіл струму в поперечному перерізі листового металу, де має місце суперпозиція індукованого та стороннього струмів.

Інтегруючи вираз (3.30) по $\zeta \in [0, 1]$ із урахуванням зв'язку $\zeta = -\frac{z}{d}$, $z \in [-d, 0]$, отримаємо, що

$$J_x^{(S)}(t, y) = \frac{I_m}{(2ad)} \cdot \left[j_t(t) - \left(\frac{4a}{\pi d} \right) \times \int_0^\infty \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} e^{-\alpha \frac{h}{d}} \sum_{k=0}^\infty \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \times \left(\frac{dj_t(t)}{dt} e^{p_k t} \right) \alpha \cos\left(\alpha \frac{y}{d}\right) d\alpha \right]. \quad (3.31)$$

Говорячи про електромагнітні процеси у системі, що розглядається при паралельному електричному підключенні основного струмопроводу довжиною – l до ділянки тієї ж довжини на листову металі можна відзначити наступні обставини.

Перше. У постановці задачі вказано, що основний струмопровід «прозорий» для діючих полів та не впливає на електромагнітні процеси у системі. Але допустимо, що він виконаний із того самого металу, що і листова заготовка.

Друге. У першому наближенні, вплив індукційних ефектів на струмові характеристики у джерелі збудження системи – в основному струмопроводі можна врахувати, якщо виходячи із фізичних принципів подібності, припустити, що електромагнітні процеси у ньому і в зоні листового металу під ним ідентичні [2].

Із урахуванням вищезазначених обставин сумарні величини струмових характеристик в основному струмопроводі також можна представити залежностями (3.29), (3.31).

Інтегральна сила притягання збуджувана при взаємодії паралельних струмів, приймає вид [117,118]:

$$F_{attr}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(I_x^{(s)}(t) \right)^2 \cdot \frac{l}{h}. \quad (3.32)$$

Вираз (3.32) у сукупності із залежностями (3.29), (3.31) а також співвідношеннями для лінійної густини збуджуваних струмів представляє із себе рішення поставленої електродинамічної задачі. Вони адекватно описують процеси в інструменті магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний метал.

3.3 Чисельні оцінки, узагальнення результатів розрахунків

Чисельні оцінки проведемо для експериментальних моделей.

1. Листові немагнітні метали – $d = 0,001$ м, $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/Ом·м (сталь) та $\gamma = 3,75 \cdot 10^7$ 1/Ом·м (алюміній).
2. Основний струмопровід виконаний із того ж самого металу і тієї ж товщини, що і оброблюваний об'єкт («сталь – сталь» або «алюміній – алюміній»).
3. Геометрія системи – $l = 0,06$ м, $2a = 0,01 \div 0,06$ м, $h = 0,002$ м, робоча зона інструмента – область $l \times (2a)$.
4. Основний струмопровід і задана ділянка оброблюваного металу – електрично паралельні, таким чином що у колі кожного із них однакові збуджуючі струми однакові та такі, що дорівнюють половині струму, який генерується джерелом потужності.
5. Параметри струмових імпульсів визначаються характеристиками джерела потужності – магнітно-імпульсної установки МІУС-2, розробленої в ЛЕТ ХНАДУ [73,117, 118].
 - 5.1 Максимальна напруга на ємнісному накопичувачі – $U = 2000$ В.
 - 5.2 Максимальна робоча частота при підключенні до безпосереднього електричного виходу МІУС-2 – $f_{\max} = 700$ Гц (відносний декремент загасання – $\delta = 0,3$).
 - 5.3 Робоча частота – $f_p = 1000 \div 1500$ Гц (відносний декремент загасання – $\delta = 0,3$) при підключенні через узгоджувальний пристрій з коефіцієнтом передачі енергії до робочої зони інструмента – $K \approx 4$.
 - 5.4 Магнітно-імпульсна установка МІУС-2 дозволяє працювати у 2-х режимах. Перший – це генерування експоненціально загасаючих (осцилюючих) струмових імпульсів. Другий – це генерування струмових імпульсів аперіодичної (уніполярної) часової форми. Слід відзначити, що останній режим є найбільш бажаним, оскільки робота тиристорних комутаторів із уніполярними сигналами характеризується найбільш тривалим строком експлуатації.

Розрахунки проводилися за допомогою стандартного програмного пакету «Mathematica 5.1».

Алгоритм розрахунку.

1. Приблизний інтервал переміни змінної інтегрування $\alpha \in [0, \alpha_{\max}]$ визначається функціональним видом Фур'є-образу поперечного розподілу збуджуючого струму. Для значень $\alpha \in [0, \alpha_{\max}]$ модуль функції розподілу повинен бути відмінним від нуля. Як показали чисельні оцінки по максимуму – $\alpha \in [0, 1]$.

2. В інтервалі значень $\alpha \in [0, \alpha_{\max}]$ обчислюються корені рівняння $-\beta_k = \beta_k(\alpha)$ для значень індексу сумування $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

3. У загальному випадку розрахункову залежність $\beta_k = \beta_k(\alpha)$ можна апроксимувати сукупністю послідовності лінійних функцій.

Як показали чисельні оцінки, для прийнятої геометрії індуктора цілком задовільною уявляється апроксимація аналітичною залежністю: $\beta_k \approx \sqrt{2\alpha} + k \cdot \pi$

4. Знайдена залежність $\beta_k = \beta_k(\alpha)$ підставляється до підінтегрального виразу розрахункових формул.

5. Неособисті інтеграли та доданки рядів розраховуються за допомогою стандартних програм «NIntegrate» та «NSum».

6. Підсумовування в рядах виконується для різного числа вищих гармонік. Їх врахована кількість вважається достатньою, якщо збільшення граничного значення « k » на одиницю не призводить до результату, відмінного від попереднього більше ніж на $5 \div 10 \%$.

Графіки характерних розрахункових залежностей згруповані за видом оброблюваних матеріалів: сталь і алюміній. Для кожного із металів розрахунки розділені у відповідності із варіаціями параметрів джерела потужності, часових форм збуджуючих струмів та геометрії робочої зони.

У відповідності до можливостей джерела потужності генерувати сигнали різної часової форми, чисельні оцінки виконаємо як для осцилюючих, так і для уніполярних струмових імпульсів.

Сталь.

Варіант №1.

Робоча частота – $f = 7000$ Гц, напруга – $U = 2000$ В, робоча зона:
 $l \times (2a) = 0,06 \times 0,06$ м.

Форма збуджуючого струму – експоненціально загасаюча синусоїда.

Результати розрахунків наведені нижче.

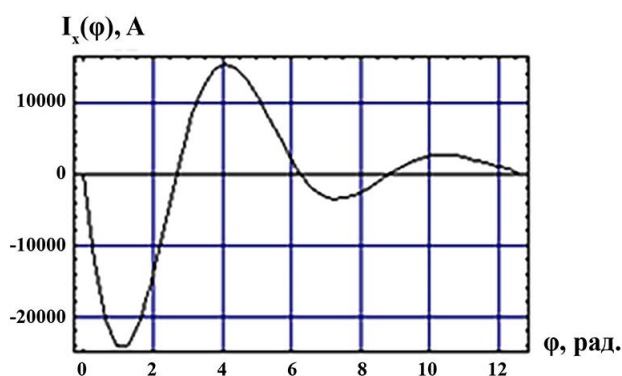


Рис. 3.4. Збуджуючий струм

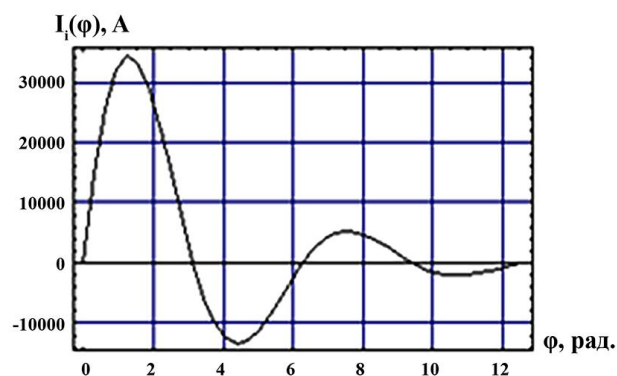


Рис. 3.5. Індукований струм

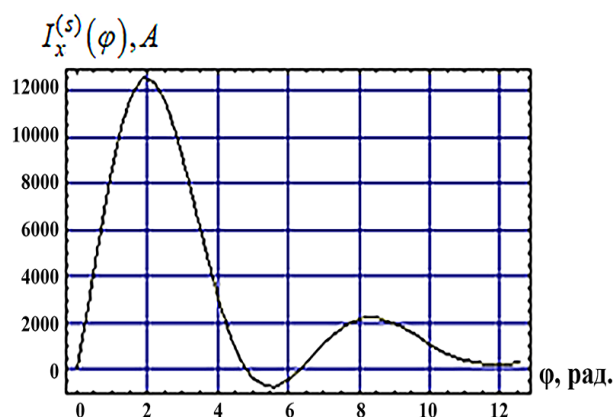


Рис. 3.6. Сумарний струм у колі
кожного із провідників що взаємодіють

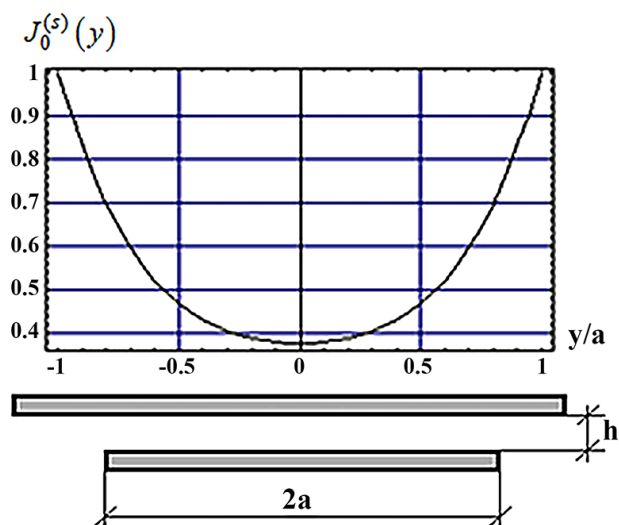


Рис. 3.7. Поперечний розподіл
сумарного струму

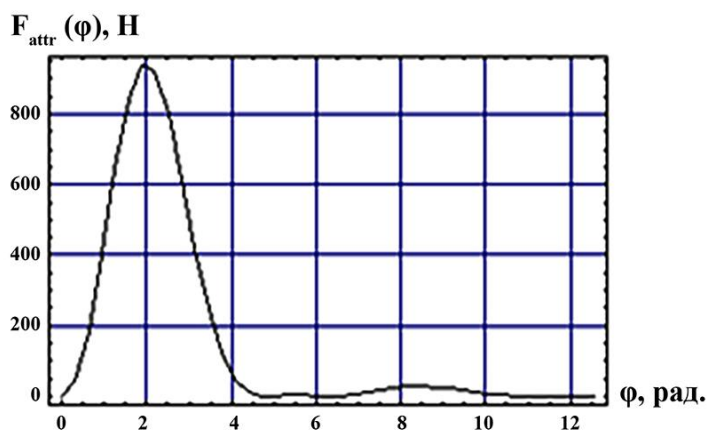


Рис. 3.8. Збуджувана сила притягання

Форма збуджуючого струму – аперіодичний уніполярний сигнал.

Аналогічно до попереднього, результати розрахунків наведені нижче.

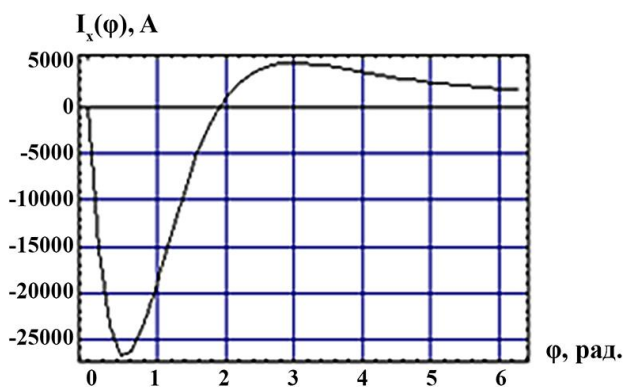


Рис. 3.9. Збуджуючий струм

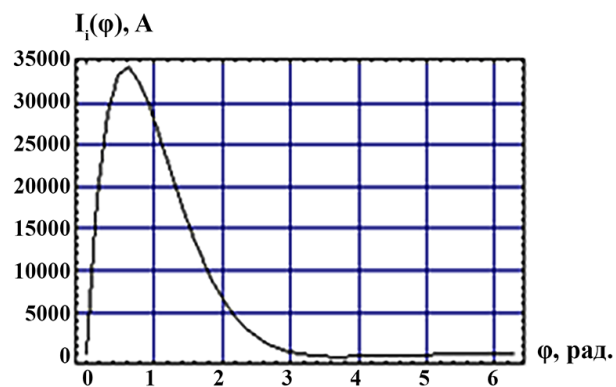


Рис. 3.10. Індукований струм

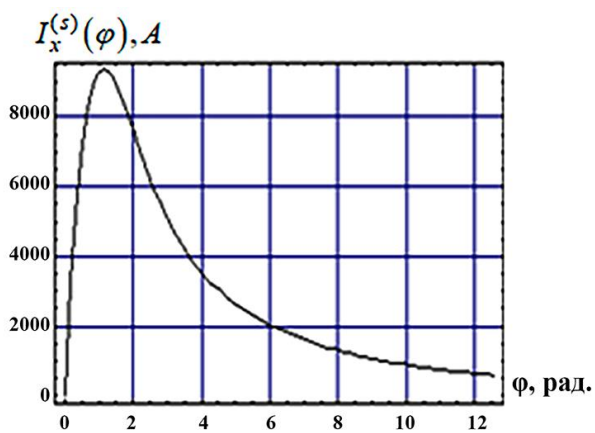


Рис. 3.11. Сумарний струм у колі кожного із провідників системи

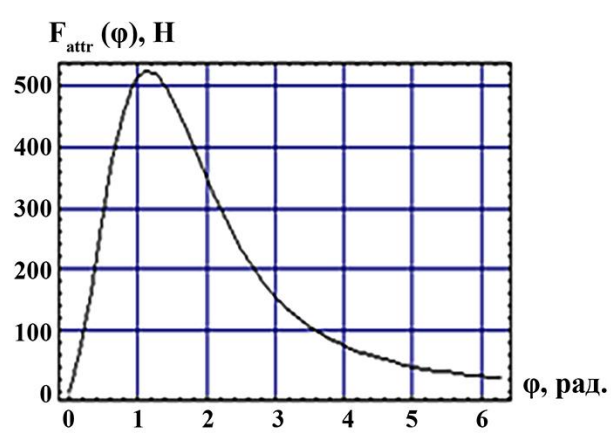


Рис. 3.12. Збуджувана сила притягання

Із результатів розрахунків для високих робочих частот випливає, що:

- в режимі осцилюючих імпульсів збуджуючого струму максимуму можливостей джерела потужності відповідає максимум сили притягання ~ 1000 Н;
- перехід до уніполярного імпульсу збуджуючого струму призводить до зниження амплітуди сили притягання майже у ~ 2 рази, тобто, до ~ 500 Н;
- з фізичної точки зору, причиною зниження сили притягання за аперіодичної форми збуджуючого струму можна вважати зменшення його часової тривалості (рис. 3.4. $\rightarrow \varphi \in [0, 4\pi]$, рис. 3.9 $\rightarrow \varphi \in [0, \pi]$), що, вочевидь, призвело до скорочення часу розвитку електродинамічних процесів;
- неоднорідність поперечного розподілу сумарних струмів, що відображує рівень поперечного розподілу сил притягання, достатньо велика та досягає $\sim 60\%$.

Подальші розрахунки наведені для уніполярної форми збуджуючого струму (безпечність тиристорних комутаторів).

Варіант №2

Робоча частота – $f = 1500$ Гц, напруга – $U = 2000$ В, робоча зона:
 $l \times (2a) = 0,06 \times 0,06$ м.

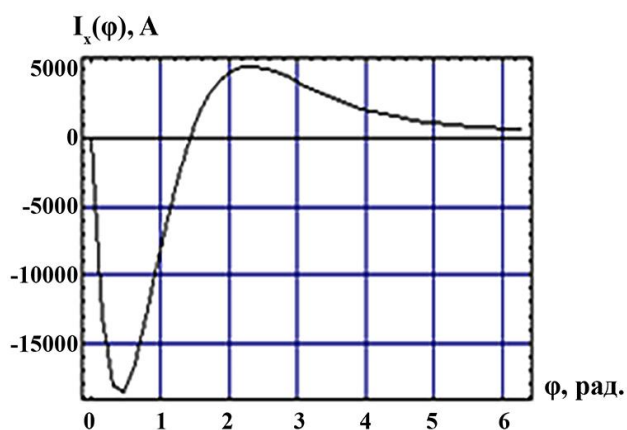


Рис. 3.13. Збуджуючий струм

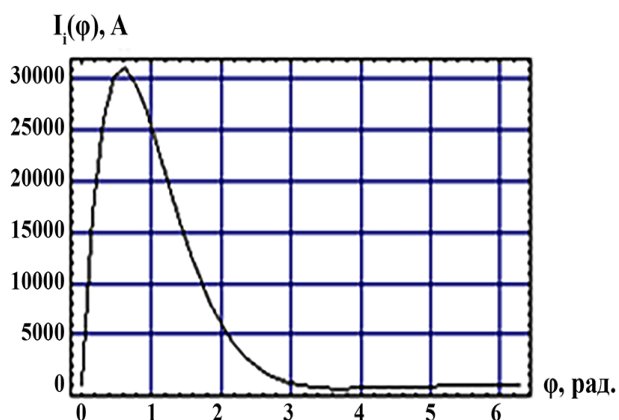


Рис. 3.14. Індукований струм

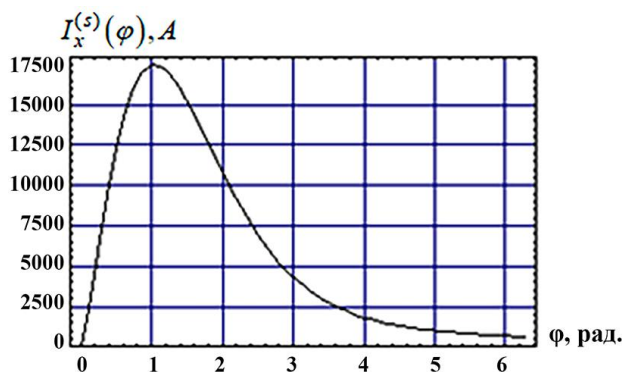


Рис. 3.15. Сумарний струм в колі кожного із провідників системи

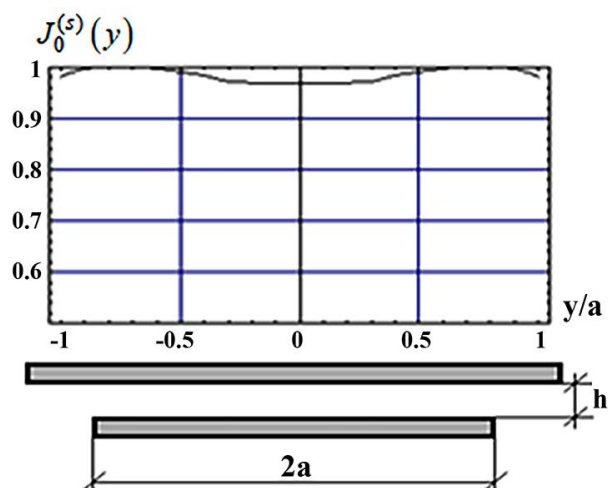


Рис. 3.16. Поперечний розподіл сумарного струму

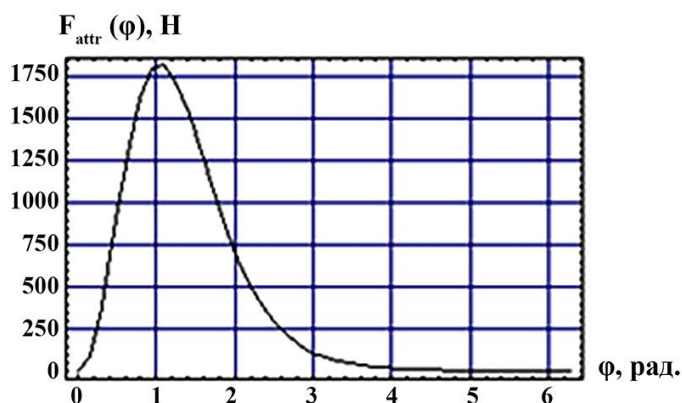


Рис. 3.17. Збуджувана сила притягання

Із результатів розрахунків для низьких робочих частот слідує, що:

- максимуму можливостей джерела потужності відповідає максимум сили притягання ~ 1800 Н, що більше ніж у ~ 3 рази перевищує аналогічний максимум для високих частот збуджуючого струму;
- з фізичної точки зору, причиною збільшення сил притягання за зниження робочих частот можна вважати інтенсифікацію процесів проникнення збуджуваних полів, що вочевидь, призвело до збільшення напруженостей із зовнішньої сторони провідників системи, і відповідно, до росту сил магнітного тиску ззовні (рис. 3.2.);

– неоднорідність поперечного розподілу сумарних струмів, що відображає рівень поперечного розподілу сил притягання, достатньо низька і складає не більше $\sim (5 \div 6) \%$.

Перехід до низьких робочих частот збуджуючих струмів дозволяє істотно підвищити ефективність системи магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний метал.

Варіант №3.

Робоча частота – $f = 1500$ Гц, напруга – $U = 2000$ В, робоча зона:
 $l \times (2a) = 0,06 \times 0,01$ м.

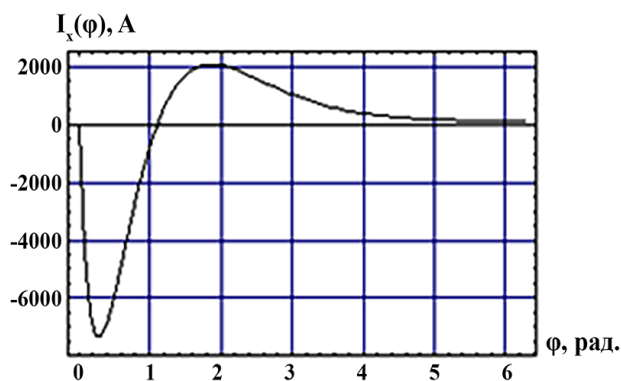


Рис. 3.18. Збуджуючий струм

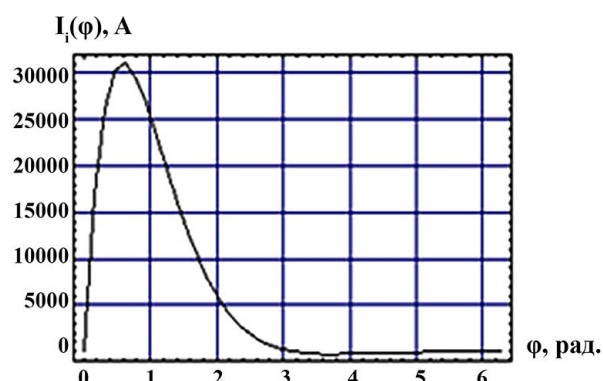


Рис. 3.19. Індукований струм

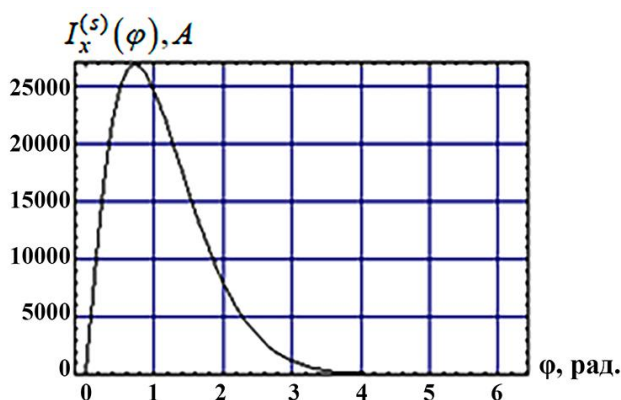


Рис. 3.20. Сумарний струм у колі кожного із провідників системи

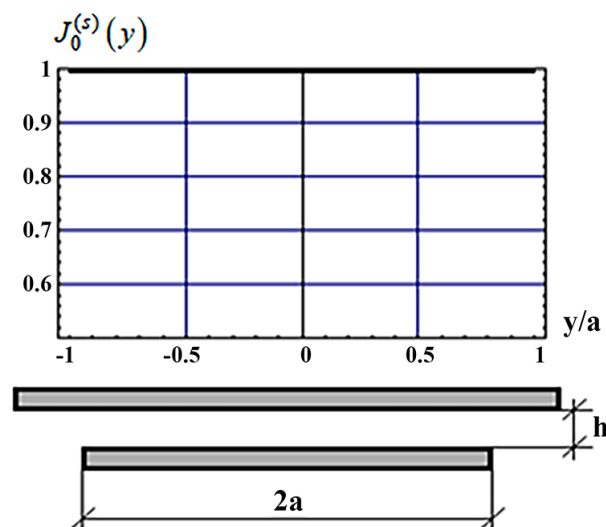


Рис. 3.21. Поперечний розподіл сумарного струму

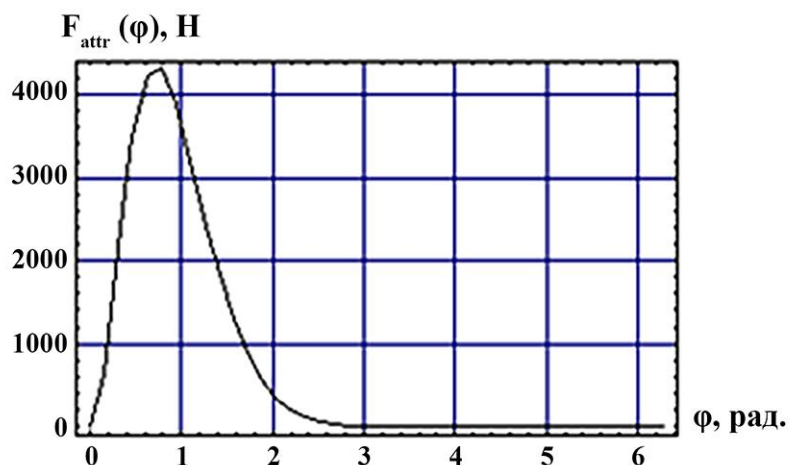


Рис. 3.22. Збуджувана сила притягання

Із результатів розрахунків отримуємо наступне:

- максимуму можливостей джерела потужності за зменшення поперечного розміру основного струмопроводу індуктора до $\sim 0,01$ м відповідає максимум сили притягання ~ 4000 Н, що більше ніж у ~ 2 рази перевищує аналогічний максимум для ширини струмопроводу $\sim 0,06$ м;
- з фізичної точки зору, причиною збільшення сил притягання за зменшення поперечного розміру основного струмопроводу можна вважати ріст амплітуд збуджуваних полів, що вочевидь, призвело до інтенсифікації індукційних процесів;
- поперечний розподіл сумарних струмів, що відображує рівень поперечного розподілу сил притягання, практично однорідний.

Зменшення ширини основного струмопроводу індуктора дозволяє значно збільшити силові показники системи магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний метал.

Наприкінці виконаємо оцінки за зниженої напруги ємнісного накопичувача.

Варіант №4

Робоча частота – $f = 1500$ Гц, напруга – $U = 1000$ В, робоча зона:
 $l \times (2a) = 0,06 \times 0,01$ м.

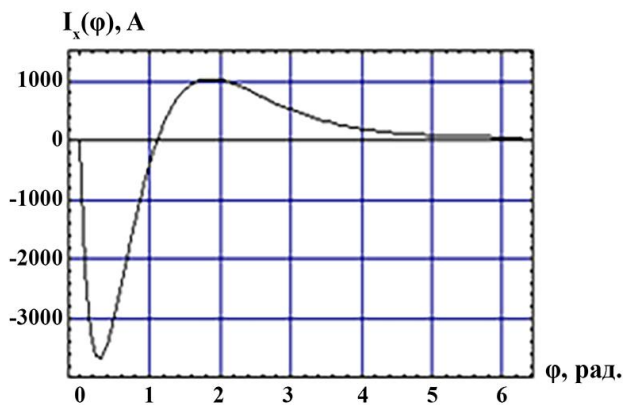


Рис. 3.23. Збуджуючий струм

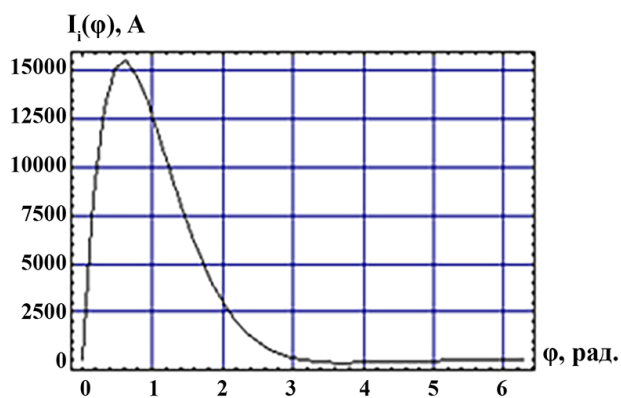


Рис. 3.24. Індукований струм

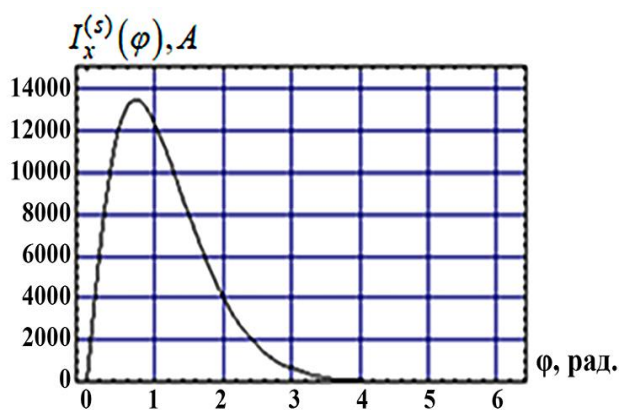


Рис. 3.25. Сумарний струм в колі кожного із провідників системи

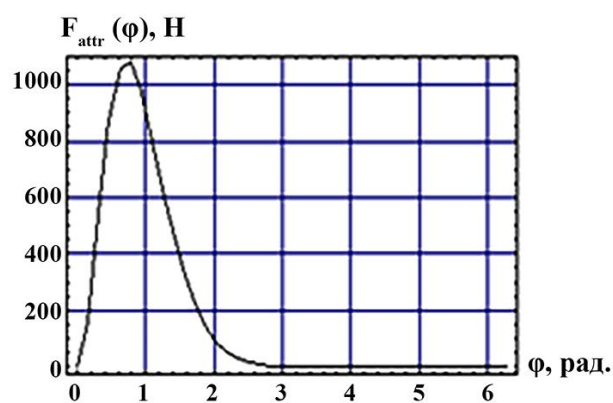


Рис. 3.26. Збуджувана сила притягання

Як видно із рис. 3.26, максимум сили магнітно-імпульсного притягання складає ~ 1100 Н, що свідчить про реальну можливість зниження енергетичних показників джерела потужності для виконання заданої виробничої операції.

Алюміній.

Форма збуджуючого струму, що прийнята у розрахунках, – аперіодичний уніполярний сигнал.

Робоча частота – $f = 1500$ Гц, напруга – $U = 2000$ В, робоча зона: $l \times (2a) = 0,06 \times 0,06$ м.

Мета – оцінка працездатності системи із тим самим технологічним оснащенням, що було прийнято під час роботи зі сталлю.

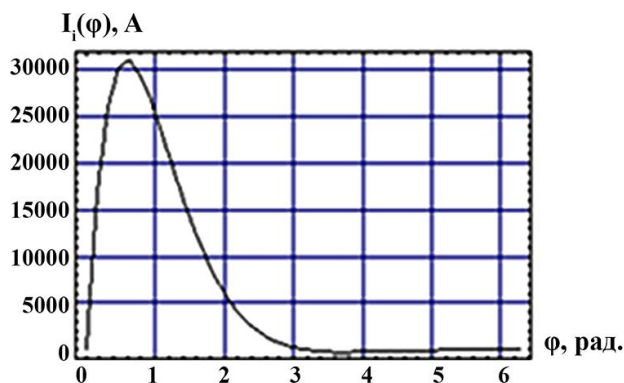


Рис. 3.27. Індукований струм

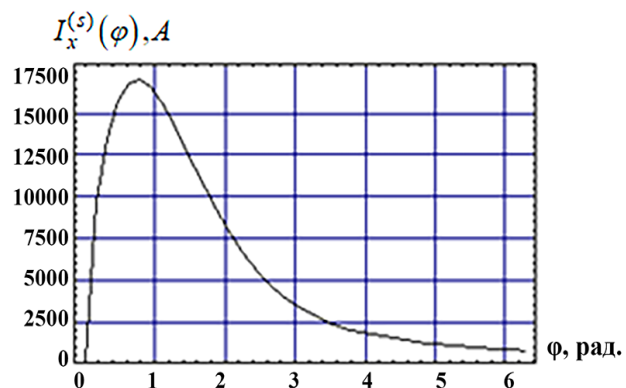


Рис. 3.28. Сумарний струм у кожному із провідників системи

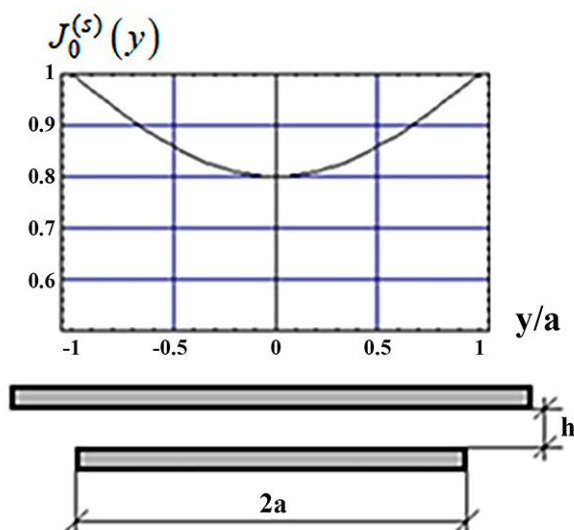


Рис. 3.29. Поперечний розподіл сумарного струму

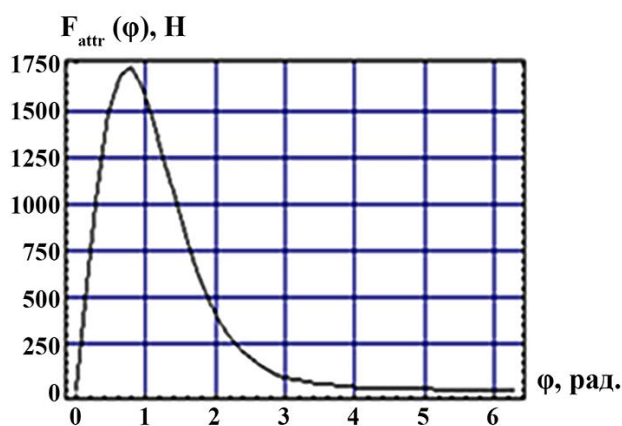


Рис. 3.30. Збуджувана сила притягання

Основні результати:

- максимум сили притягання складає ~ 1750 Н;
- рівень неоднорідності поперечного розподілу сумарного струму, що характеризує ступінь рівномірності поперечного розподілу сил притягання, не перевищує ~ 20 %.

Магнітно-імпульсне притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний алюміній достатньо ефективно під час використання

технологічного оснащення та характерних показників, що були прийняті для деформування сталюого зразка.

Узагальнення результатів розрахунків струмів та сил в системі магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний метал веде до наступних висновків.

1. Перехід до низьких робочих частот збуджуючих струмів дозволяє:
 - істотно збільшити амплітуди сил притягання, наприклад, при $f = 1,5$ кГц силові показники для сталі зростають більше, ніж у ~ 3 рази у порівнянні з $f = 7$ кГц;
 - значно знизити (до $\sim 5 \div 6$ %) неоднорідність поперечного розподілу сумарних струмів, що відображає рівень рівномірності сил притягання.
2. З фізичної точки зору, причиною збільшення сил притягання при зниженні робочих частот можна вважати інтенсифікацію процесів проникнення збуджуваних полів, що веде до зростання сил магнітного тиску на провідники ззовні.
3. Зменшення поперечного розміру основного струмопроводу індуктора дозволяє:
 - істотно збільшити амплітуди сил притягання, так, при ширині основного струмопроводу до $\sim 0,01$ м максимум сили притягання зростає у ~ 2 рази у порівнянні із поперечним розміром $\sim 0,06$ м;
 - досягти практично однорідного розподілу збуджуваних сил магнітно-імпульсного притягання;
 - знизити енергетичні показники джерела для виконання заданої виробничої операції.
4. З фізичної точки зору, причиною збільшення сил притягання при зменшенні поперечного розміру основного струмопроводу можна вважати ріст амплітуд збуджуваних полів, що веде до інтенсифікації індукційних процесів.
5. Максимуму можливостей джерела потужності магнітно-імпульсної установки ($U = 2000$ В, $f = 1500$ Гц) і уніполярній формі збуджуючого струму відповідає максимум сили притягання ~ 4000 Н.

6. Магнітно-імпульсне притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний алюміній може бути достатньо ефективним, так при $U = 2000$ В, $f = 1500$ Гц та уніполярній формі збуджуючого струму сили притягання досягають ~ 1750 Н при рівні неоднорідності поперечного розподілу не більше ~ 20 %.

7. Значне збільшення сил магнітно-імпульсного притягання (в ідеалі, по максимуму 4-кратне) можливо при послідовному електричному включенні основного струмопроводу та оброблюваного металу до розрядного кола джерела потужності.

Перехід від паралельного з'єднання однакових провідників до послідовного дає 2-кратне збільшення збуджуючого струму у кожному з них. Квадратична залежність від струмів дає 4-кратний ріст сили магнітно-імпульсного притягання.

3.4 Приклади можливих експериментальних конструкцій інструментів

Варіант №1. «Паралельне включення провідників»

Розраховані характеристики

1. Робоча частота – $f = 1,5$ кГц, форма імпульсу – аперіодична, напруга – $U = 2$ кВ, ємність – $C = 1200$ мкФ, максимум струму в основному струмопроводі – $J_{\max} = 19$ кА, максимум струму в листовому металі – $J_{\max}^{(\text{лист})} = 10,64$ А, неоднорідність розподілу – до 8 %, максимум сили притягання – $F_m^{(\text{real})} = 1232$ Н.

2. Власна індуктивність системи, розрахована, як індуктивність прямокутної рамки із заданими розмірами, дорівнює – $L \approx 67$ нГн.

3. Максимально можливий приріст температури нагріву за час одного імпульсу складає [1]:

$$\Delta T^{\circ} = \frac{J_{\max}^2}{(\rho \cdot c \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot 2a)} \cdot \int_0^{\infty} j_t^2(t) dt = 4,5^{\circ}\text{C}.$$

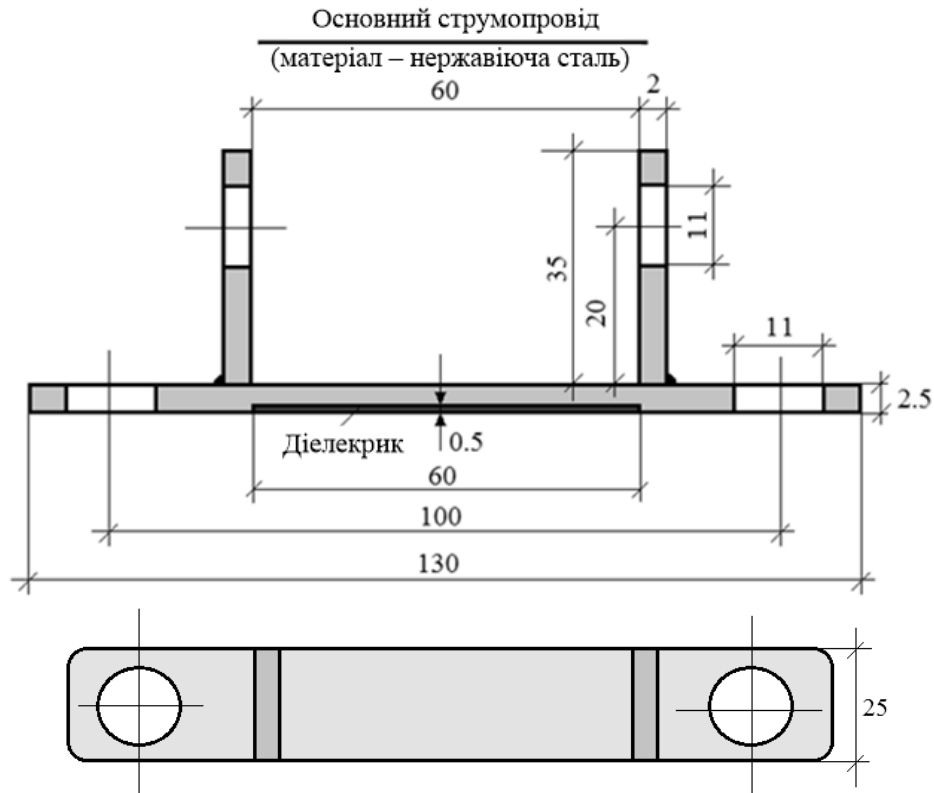


Рис. 3.31. Основний струмопровід системи

Варіант №2. «Послідовне включення провідників»

Розрахункові характеристики

1. Робоча частота – $f = 1,5$ кГц, форма імпульсу – аперіодична, напруга – $U = 2$ кВ, ємність – $C = 1200$ мкФ, максимум струму в основному струмопроводі – $J_{\max} = 48$ кА, максимум струму в листовому металі – $J_{\max}^{(\text{лист})} = 26,88$ А, неоднорідність розподілу $< 1\%$, максимум сили притягання – $F_m^{(\text{real})} = 6832$ Н.

2. Максимально можливий приріст температури нагріву за час одного імпульсу складає [1]:

$$\Delta T^{\circ} = \frac{J_{\max}^2}{(\rho \cdot c \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot 2a)} \cdot \int_0^{\infty} j_t^2(t) dt = 19,94^{\circ} \text{C}$$

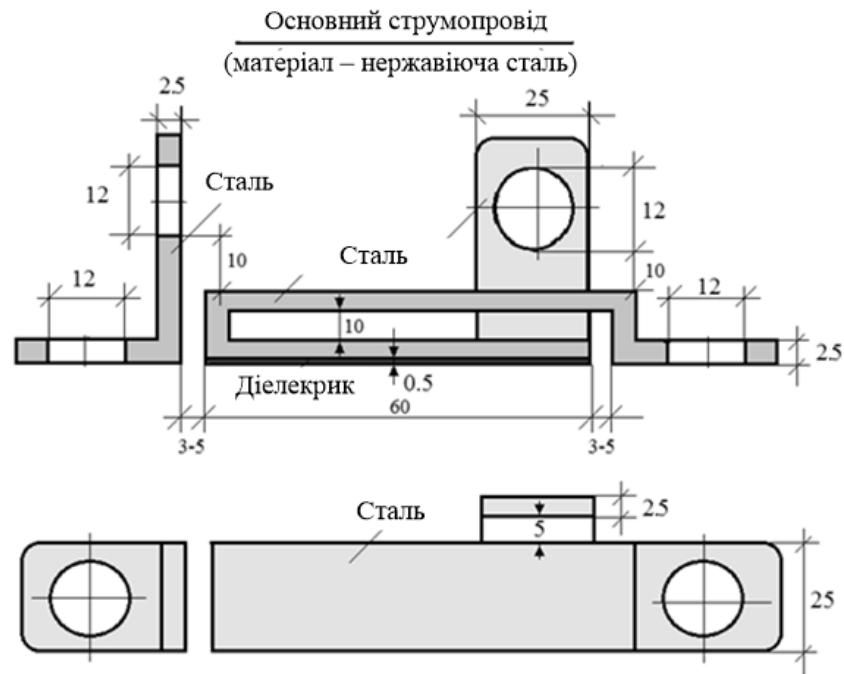


Рис. 3.32. Основний струмопровід системи

Варіант №3. «Кутова» форма основного струмопроводу

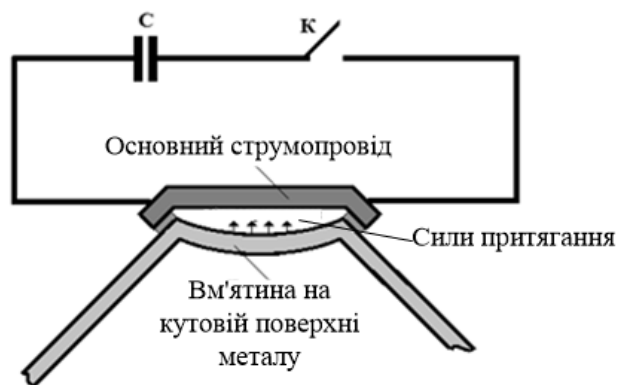


Рис. 3.33 Принципова схема видалення вм'ятини на кутовій поверхні листового металу

Висновки за розділом 3

1. Із долученням схеми збудження сил тиску на провідник у магнітному

полі отримане фізичне обґрунтування працездатності систем із «прямим пропусканням струму», основною умовою якої є вимога низьких робочих частот, що забезпечують режим інтенсивного проникнення збуджуваних електромагнітних полів.

2. Розраховані струми та сили в залежності від часових показників електромагнітних процесів та геометричних параметрів робочої зони інструмента.

3. Запропоновані принципові схеми реалізації магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний метал, що передбачають паралельне або послідовне електричне включення інструменту методу до кола джерела потужності.

4. Для схеми із паралельним включенням до кола джерела потужності показано, що для немагнітних сталевих листів товщиною ~ 1 мм варіація значення робочої частоти (рекомендована $\sim 1,5$ кГц) та ширини основного струмопроводу дозволяє знизити енергетичні показники виробничої операції притягання.

5. Показано, що магнітно-імпульсна взаємодія дозволяє доволі ефективно притягати задані ділянки листового алюмінію товщиною ~ 1 мм в інструментах з «прямим пропусканням струму» для деформування сталевих зразків.

6. Показано, що для схем із послідовним включенням до розрядного кола джерела потужності амплітуди збуджуваних сил притягання зростають у $\sim 3 \div 4$ рази за тих самих енергетичних показників, що і у випадку паралельного включення.

7. Представлені приклади конструктивного виконання основних струмопроводів інструментів магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму».

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора: [5,6,13,23]

РОЗДІЛ IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Загалом, експерименти описані у даному розділі об'єднують дослідження і розробки різних видів обладнання, що призначене для різних промислових технологій, зокрема ремонту елементних складових транспортних засобів.

Перша частина розділу присвячена експериментальним дослідженням електромагнітних і температурних процесів під час індукційного нагріву листових металів за допомогою розроблених модельних конструкцій інструментів із феромагнітними сердечниками.

Друга частина містить опис експериментальних моделей інструментів магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через задану ділянку зразка із листової сталі кузовних панелей легкових автомобілів.

4.1 Індукційний нагрів інструментами з феромагнітними сердечниками

Як було показано раніше, ефективність інструментів індукційного нагріву в різних виробничих операціях, наприклад, у сучасних технологіях ремонту автомобільного транспорту, можна збільшити за рахунок введення феромагнітних сердечників до конструкцій індукторних систем – джерел електромагнітних полів.

Виконані теоретичні дослідження та чисельні оцінки даної пропозиції, що підтвердили позитивний вплив сердечників на інтенсивність індукційного нагріву листових металів слід доповнити відповідними експериментами. Їх проведення дозволить встановити достовірність висновків теорії та розрахунків, а також виробити рекомендації для проектування конструкцій ефективних інструментів індукційного нагріву.

Мета експериментів – вимірювання основних характеристики електромагнітних та теплових процесів у робочих зонах модельних варіантів інструментів індукційного нагріву – індукторних систем із феромагнітними

сердечниками та порівняння отриманих результатів з аналогічними показниками для індукторних систем без сердечників.

4.1.1 Обладнання, експериментальні зразки

Експериментальне обладнання включає наступні складники.

1. Джерела живлення.

У якості джерел живлення експериментальних систем індукційного нагріву (далі, «джерело №1» та «джерело №2») були використані джерела потужності розроблені в ЛЕТ ХНАДУ, що відрізняються між собою вихідними характеристиками та представлені на рис. 4.1 та рис. 4.2 [73].



Рис. 4.1. Зовнішній вид «джерела №1»

Електричні параметри: Живлення: мережа 220 В – 50 Гц;

Максимальна вихідна потужність: 2 кВт;

Діапазон регулювання потужності: 0...2 кВт; Робоча частота: 25 кГц.



Рис. 4.2. Зовнішній вид «джерела №2»,
Електричні параметри: Живлення: мережа 220 В – 50 Гц;
Максимальна вихідна потужність: 4 кВт;
Діапазон регулювання потужності: 0...4 кВт; Робоча частота: 20 кГц.

2. Вимірювальна апаратура:

- цифровий осцилограф – PV6501;
- цифровий електронний інфрачервоний пірометр – WH320;
- плоский індукційний датчик: площа поперечного перерізу – $S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; кількість витків – $n = 100$.

3. Індукторні системи:

- 1) круговий індуктор – циліндричний соленоїд без сердечника ($R_1 = 0,04 \text{ м}$; $R_2 = 0,05 \text{ м}$; кількість витків – $N = 10$);
- 2) круговий індуктор ($R_1 = 0,04 \text{ м}$; $R_2 = 0,05 \text{ м}$; кількість витків – $N = 10$) із сердечником з фериту – цільним циліндром, матеріал якого заповнює внутрішній простір обмотки соленоїда;
- 3) індуктор, обмотка якого розміщена на феромагнітному сердечнику П-образної геометрії (внутрішній поперечний розмір – $D_1 = 0,024 \text{ м}$; зовнішній поперечний розмір – $D_2 = 0,038 \text{ м}$; товщина – $0,014 \times 0,014 \text{ м}^2$, висота – $H = 0,04 \text{ м}$; кількість витків обмотки – $N = 10$).

4. Зразки листових металів:

- 1) пластина із автомобільної сталі автомобілю «Форд» товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \div 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- 2) пластина із алюмінію товщиною $\sim 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
- 3) пластина із міді товщиною $\sim 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
- 4) пластина із заліза товщиною $\sim 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
- 5) пластина із заліза товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

4.1.2 Схеми проведених експериментів

Експерименти з дослідження процесів під час індукційного нагріву заданих ділянок листових металів умовно розділені на окремі групи, що оформлені як варіанти із різними індукторними системами. Детальний опис зразків листових металів конструкцій індукторних систем представлений у попередньому розділі 4.1.1.

Варіант №1. Експерименти з круговим індуктором без сердечника.

Нижче приведені ілюстрації проведення експерименту на рис. 4.3. та рис. 4.4.

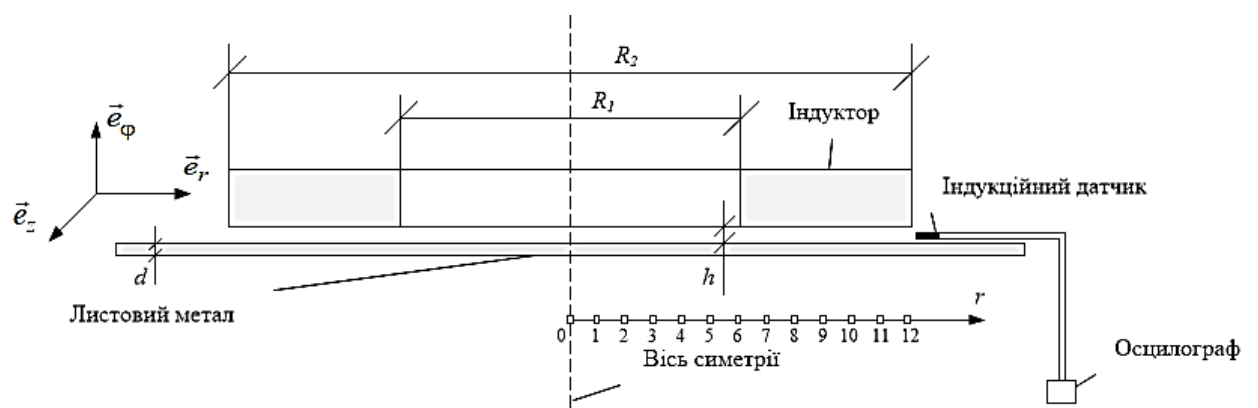


Рис. 4.3. Принципова схема експерименту

(робоча частота інструменту $\sim 24,2 \text{ кГц}$ для заготовки із заліза та $\sim 28 \text{ кГц}$ для заготовки з алюмінію, амплітуда струму у обмотці індуктора $\sim 21 \text{ А}$, $h = 1,5 \text{ мм}$)

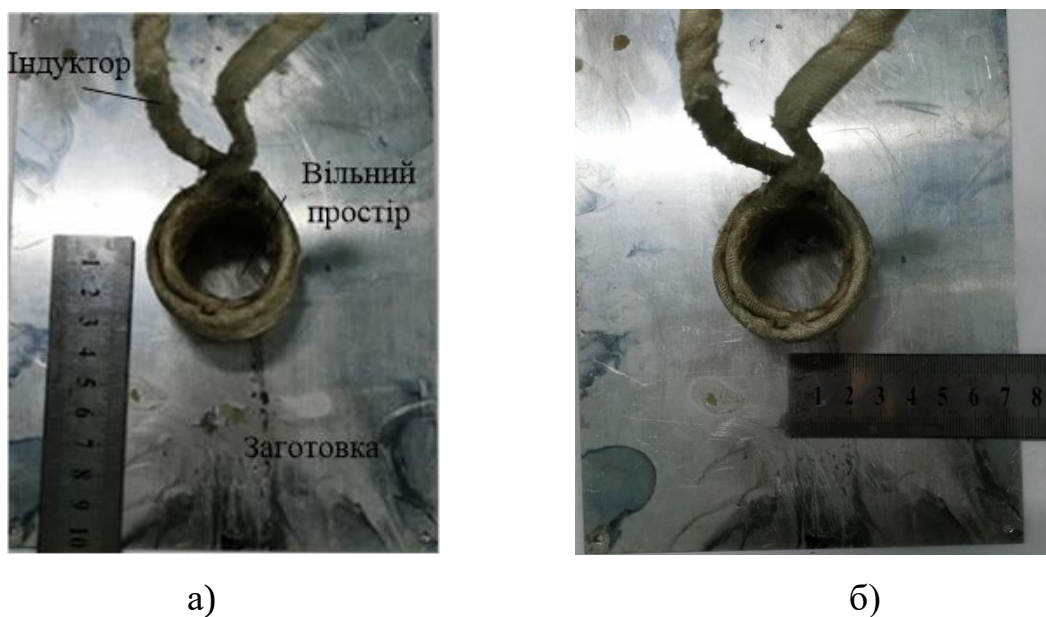


Рис. 4.4 Розташування індуктора на площині листового зразка
(внутрішня порожнина індуктора – вільний простір):
а) повздовжня орієнтація б) поперечна орієнтація

Варіант №2. Експерименти із круговим індуктором, внутрішня порожнина якого містить феритовий сердечник.

Ілюстрації проведеного експерименту на рис. 4.5. та рис. 4.6.

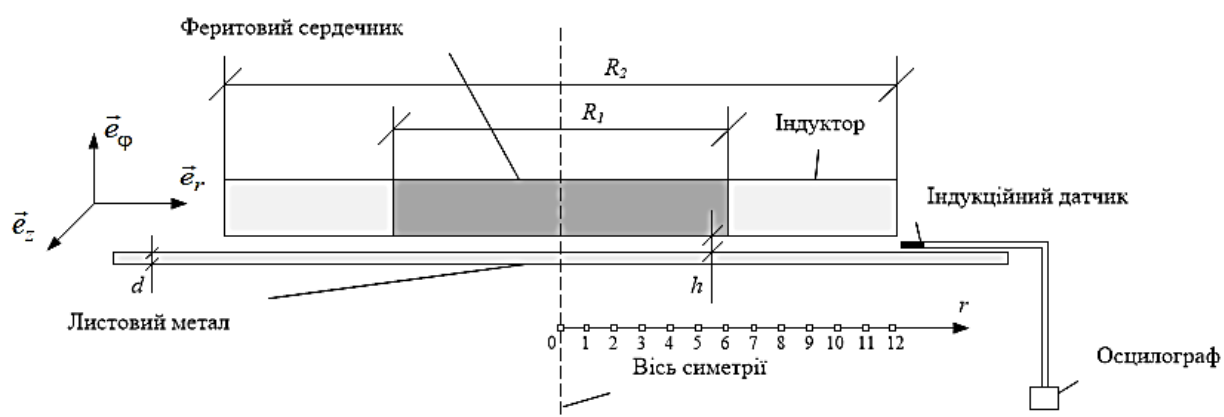


Рис. 4.5. Принципова схема експерименту
(робоча частота інструменту $\sim 24,2$ кГц для заготовки із заліза та ~ 28 кГц для заготовки з алюмінію, амплітуда струму у обмотці індуктора ~ 21 А, $h = 1,5$ мм)



а)



б)

Рис. 4.6. Розташування індуктора на площині листового зразка (внутрішня порожнина індуктора містить феритовий сердечник):

а) повздовжня орієнтація; б) поперечна орієнтація

Варіант №3. Експерименти з індуктором, обмотка якого розміщена на феритовому сердечнику П-образної форми.

Схема експерименту і розміщення індуктора на рис. 4.7. та рис. 4.8.

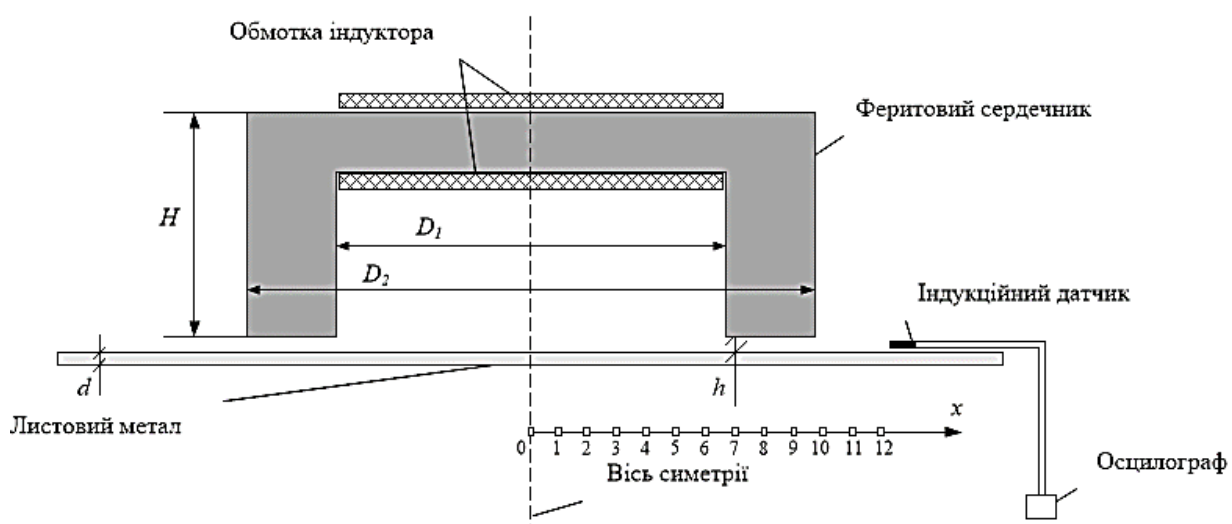


Рис. 4.7. Принципова схема експерименту

(робоча частота інструменту ~ 11 кГц, амплітуда струму в обмотці індуктора $\sim 46,5$ А, $h = 1,5$ мм)

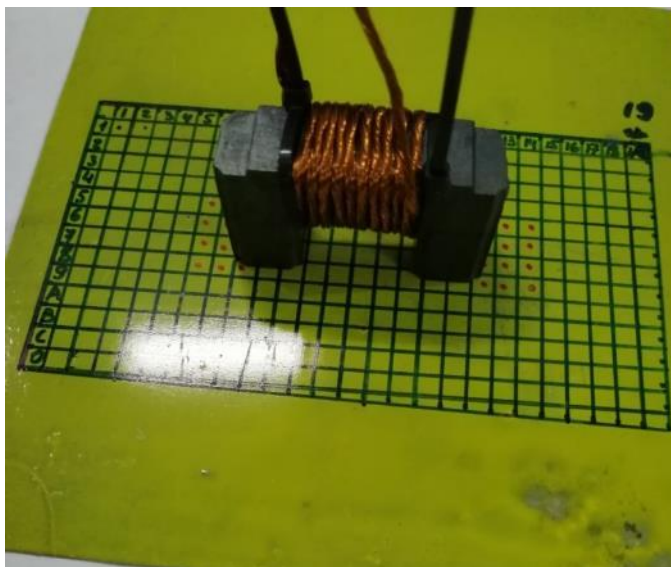


Рис. 4.8. Розміщення індуктора із П-образним феритовим сердечником на площині листового металу («сітка», у комірках якої розміщується датчик)

4.1.3 Моделювання індукційного нагріву методом скінченних елементів в середовищі ANSYS

Здебільшого проектування індукційних установок базується лише на експериментальних даних, що в свою чергу призводить до значних похибок під час розрахунків. Саме тому проектування повинно супроводжуватися етапом моделювання задля перевірки його характеристик.

Метод скінченних елементів (МСЕ) – це чисельний метод, який дає наближене рішення складного завдання. Він заснований на розділенні досліджуваної області за допомогою сітки із комірками тієї чи іншої форми на малі, прості елементи, у яких поведження поля може бути описане не диференціальними рівняннями з частковими похідними, а простими алгебраїчними апроксимаціями. Під час розрахунку до уваги приймається взаємодія лише найближчих елементів, що відповідає теорії близькодії, яка описує розповсюдження полів від точки до точки, їх переломлення та відображення на межах середовищ. Тому аналіз методом скінченних елементів пропонує найкращий підхід для описання електромагнітних процесів всередині системи індуктор – заготовка [21].

У цьому розділі представлені результати розрахунків, отриманих MCE за допомогою студентської версії ANSYS Electronic Desktop що є у вільному доступі на сайті розробників (модуль Maxwell3D, вирішувач EddyCurrent) для спрощеної 3D-моделі експериментальних зразків описаних у пункті 4.1.2 відповідно до робочих параметрів системи на рис. 4.3, рис. 4.5 та рис. 4.7.

На рис. 4.9 представлена схема алгоритму проведення модельного експерименту.

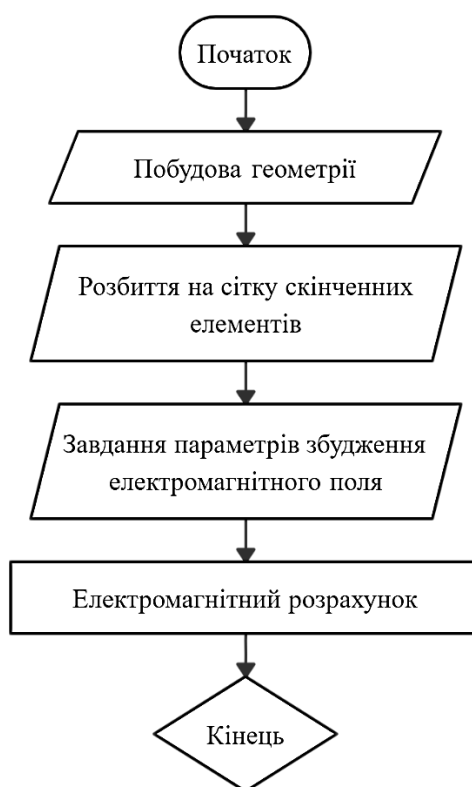


Рис. 4.9. Алгоритм вирішення електромагнітної задачі у середовищі ANSYS Maxwell.

Математична модель в основі вирішення електромагнітної задачі пов'язана із розв'язанням рівнянь Максвелла та визначенням всіх складових магнітного поля на його базисі. У розділі 2 вже проведений повний опис електромагнітних процесів у системі індуктор – заготовка, тому на етапі моделювання нас цікавить лише практична реалізація у програмному середовищі.

Після етапу визначення вхідних параметрів моделі необхідно побудувати геометрію системи для подальшого аналізу. Це можна зробити двома шляхами: імпортувати заздалегідь підготовану геометрію до Maxwell3D із стороннього графічного редактору або скористатися вбудованим редактором, де за допомогою геометричних примітивів (лінії, точки) або об'єктів (циліндр, куб, тороїд тощо) будується необхідна модель чи її частина в залежності від інженерної задачі. Далі така вбудована геометрія за необхідністю може бути експортована до інших пакетів аналізу ANSYS (у студентській версії така можливість відсутня). Для поставленої задачі використано другий варіант та побудовано три блоки моделі: заготівка (листовий метал), індуктор (за схемами на рис. 4.3, 4.5 та 4.7) та навколишнє середовище, на яке на етапі підготовки будуть застосовані граничні умови.

Виходячи із фізичної суті математичної моделі був прийнятий ряд припущень, що дозволили спростити геометрію та отримати задовільний результат розрахунків за короткий проміжок часу:

- електромагнітне поле є квазістаціонарним, тож можна знехтувати струмами зміщення в порівнянні зі струмами в провідниках;
- не враховуються витрати на гістерезис при нагріванні феромагнетиків, оскільки вони є незначними в порівнянні із втратами від вихрових струмів;
- під час завдання магнітопроводу його секційність не враховувалась, тому індуктор представлений у вигляді суцільного циліндричного тіла (кількість витків індуктора враховується на етапі завдання параметрів збудження електромагнітного поля);
- переріз магнітопроводу індуктора квадратний без радіусів заокруглення.

У подальшому для всіх блоків були задані фізичні властивості матеріалів із бібліотеки Maxwell.

Наступний етап моделювання отримання сітки скінченних елементів. Оскільки розмір елементів безпосередньо впливає на час розрахунку та якість

отриманих результатів – чим менший елемент, тим більше необхідно ресурсів комп'ютера на розрахунки та відповідно більше часу – було прийнято рішення задати більш детальну сітку лише для поверхні заготовки, в той час як для інших частин моделі залишити її налаштування за замовчуванням. Окрім того таке рішення було прийнято через те що під час індукційного нагріву майже 90% індуктованих струмів концентруються у тонкому скін-шарі на поверхні об'єкту обробки [27], а скінченні елементи великого розміру можуть давати значно завищені результати на виході моделювання.

На рис. 4.10 представлені 3D моделі після генерації сітки скінченних елементів для індукторних систем.

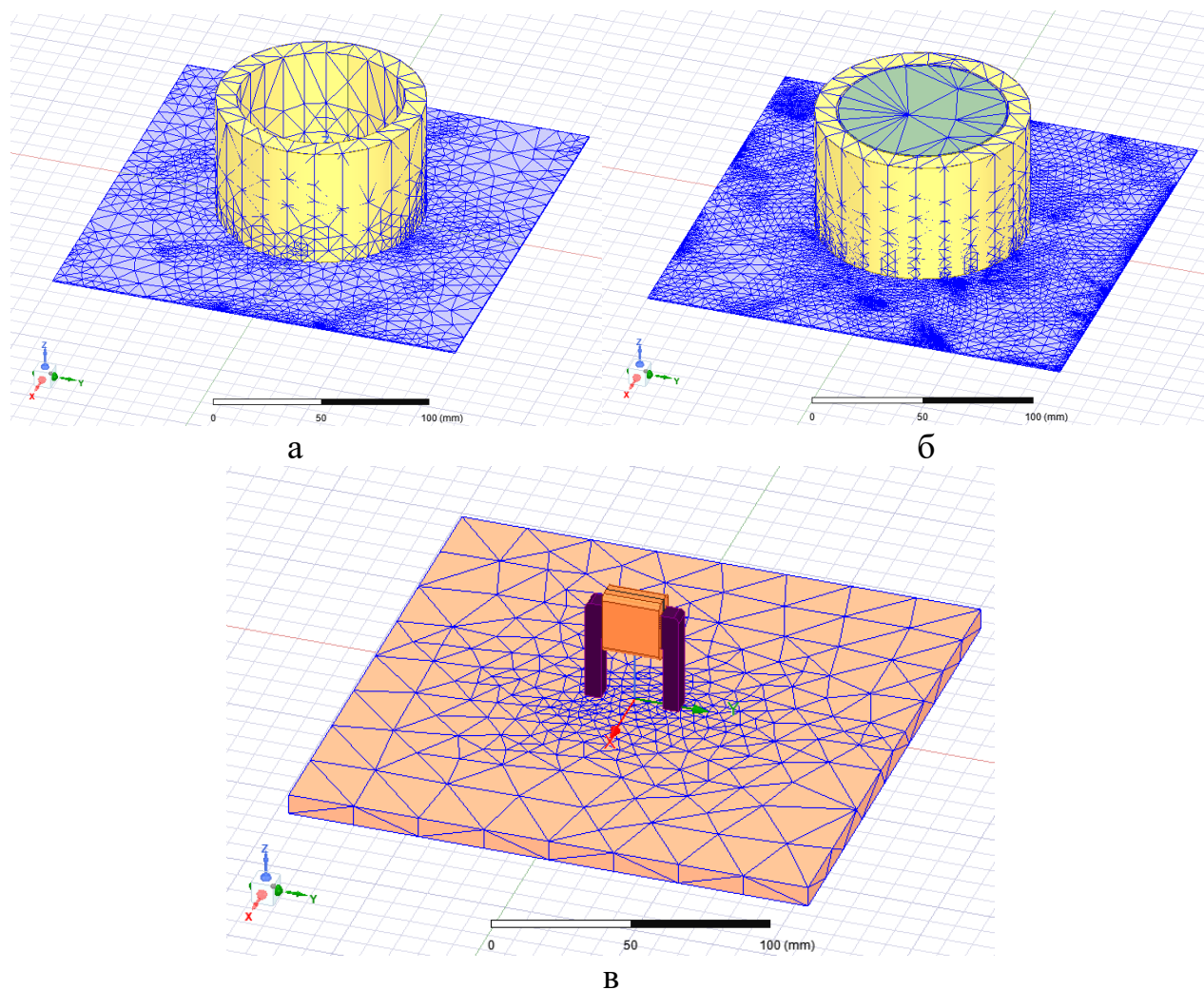


Рис. 4.10. Моделі індукторних систем після генерування сітки скінченних елементів: а) індуктор без сердечника; б) індуктор з феритовим сердечником; в) індуктор з феритовим сердечником П-образної форми

Далі, на етапі підготовки були задані початкові параметри збудження електромагнітного поля та граничні умови його розповсюдження.

Для індуктора задаються параметри роботи, які зазначені раніше на рис. 4.3, 4.5 та 4.7, але з огляду на попередні геометричні спрощення під час завдання струму що протікає через переріз індуктора робиться відмітка, що переріз є багатожильним (10 витків), замість суцільного провідника.

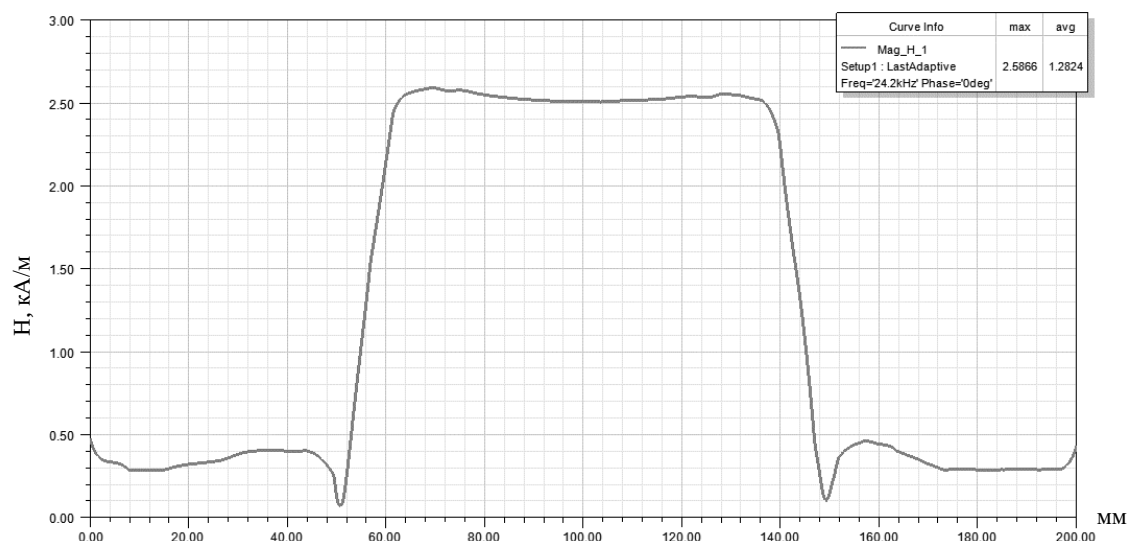
Щодо граничних умов, то вони завдані наступним чином:

- на границях розрахункової області – повне затухання складових електромагнітного поля на даній границі;
- по горизонтальній та вертикальній осях симетрії – рівність нулю дотичної компоненти напруженості магнітного поля.

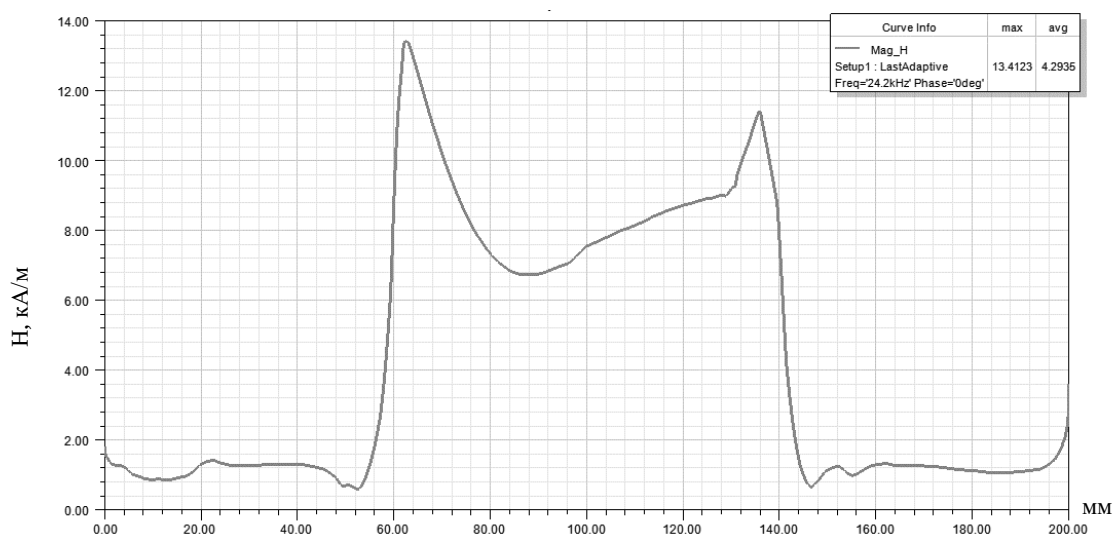
Після проведених налаштувань модель зберігається та валідується на наявність помилок, а вже після цього безпосередньо перед розрахунком у вирішувачі ANSYS (в даному випадку це вирішувач EddyCurrent) задаються його властивості та налаштування (часовий крок, час розрахунку, кількість кроків) і визначається умова сходимості рішення.

На цьому етап розробки моделі завершений та виконується розрахунок.

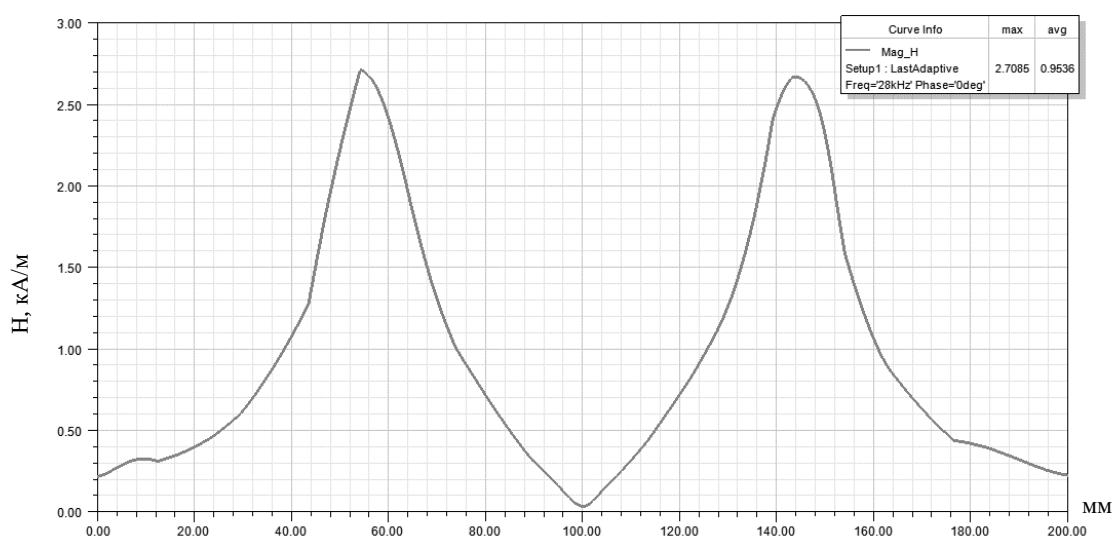
Результати моделювання представлені у вигляді графіків розподілу густини напруженості магнітного поля по повздовжній осі симетрії на рис. 4.11, 4.12 та польових діаграм з ізолініями напруженості магнітного поля на поверхні заготовки у додатку В дисертаційного дослідження.



a



б



B

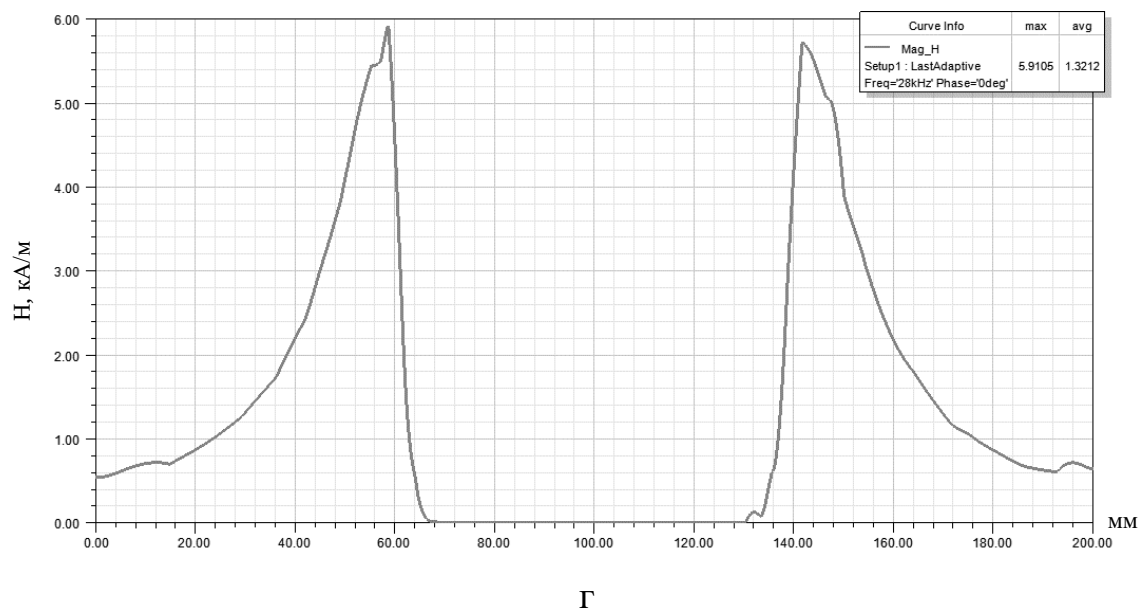
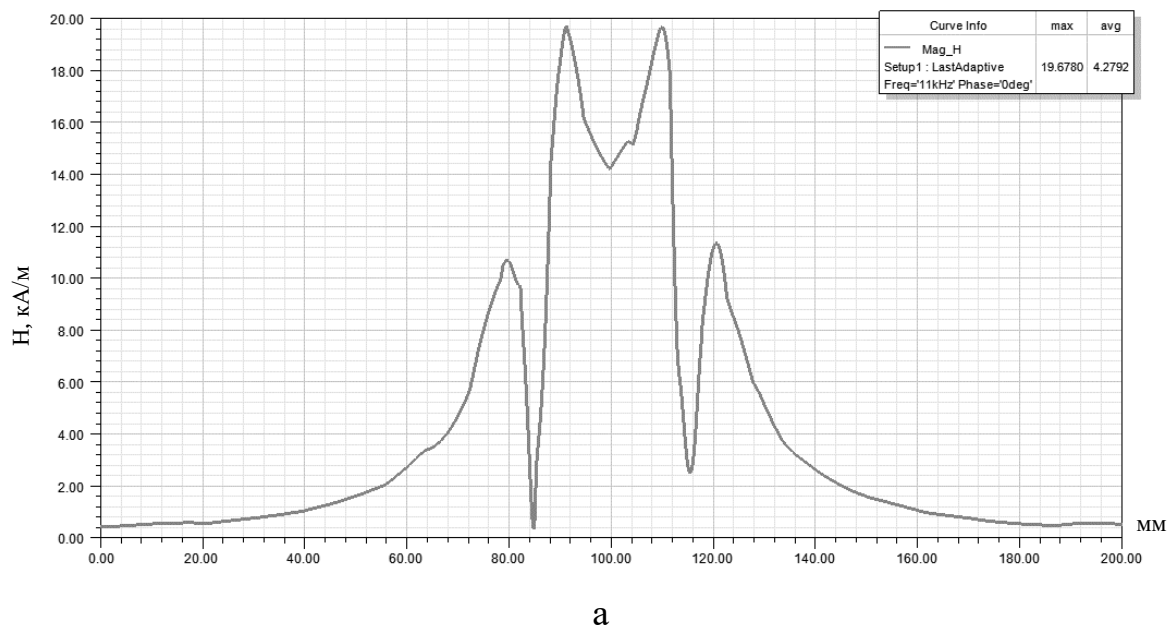
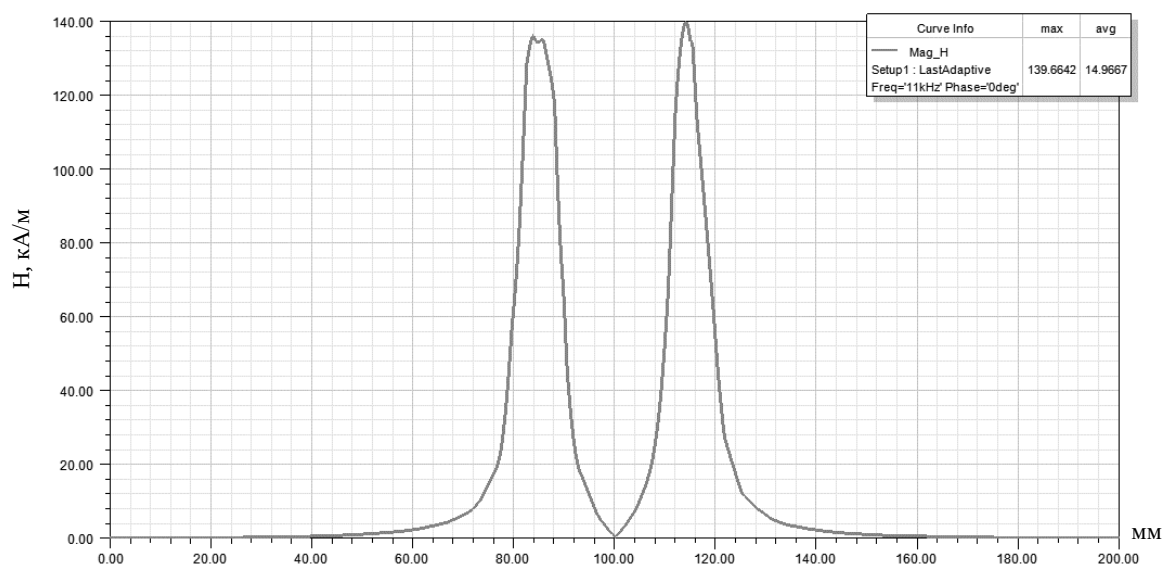


Рис. 4.11. Розподіл густини напруженості магнітного поля на поверхні зразків в полі кругового індуктору:

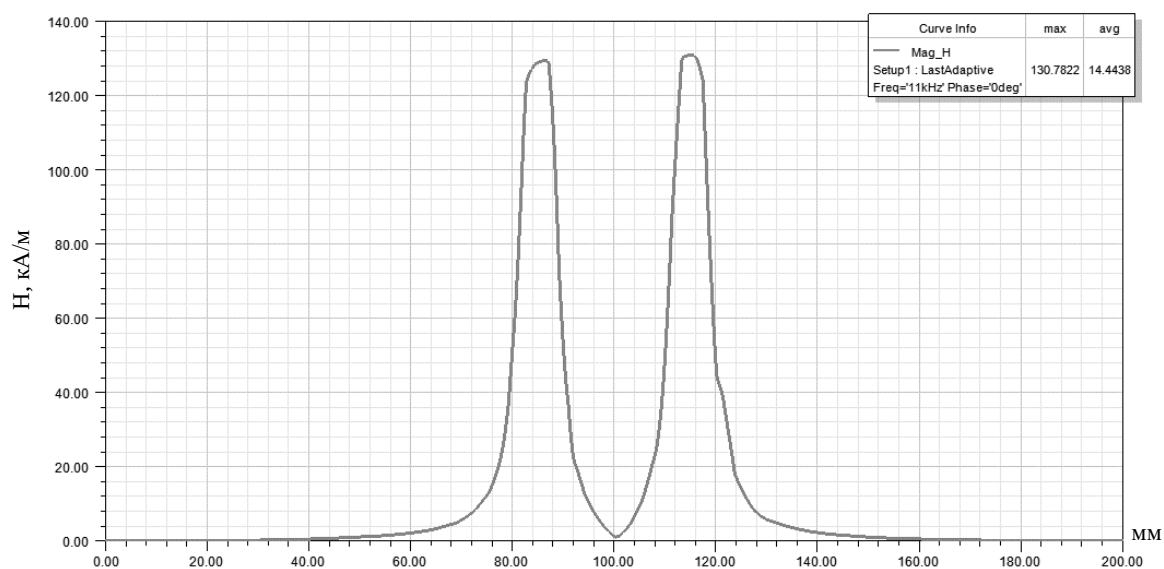
- а) залізо товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м (індуктор без сердечника);
- б) залізо товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м (індуктор з феритовим сердечником);
- в) алюміній товщиною $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м (індуктор без сердечника);
- г) алюміній товщиною $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м (індуктор з феритовим сердечником);



а



б



в

Рис. 4.12. Розподіл густини напруженості магнітного поля на поверхні зразків в полі індуктора з П-образним феритовим сердечником:

а) мідь товщиною $\sim 8 \cdot 10^{-3}$ м; б) залізо товщиною $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ м;

в) залізо товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м

4.1.4 Результати вимірювань

Методика.

Згідно до закону Джоуля–Ленца кількісно тепловиділення пропорційне квадрату струму що протікає [108]. Даний факт при оцінці поверхневого розподілу інтенсивності індукційного нагріву дозволяє спиратися на вимір поверхневого розподілу густини вихрових струмів у металевому зразку, амплітуда якої визначається напруженістю збуджуваного магнітного (рівні за різкого скін-ефекту).

Вимірювання напруженостей магнітних полів проводились за допомогою індукційних датчиків (котушкових зондів), підключених до входу імпульсного осцилографа. За осцилограмами визначалися амплітуди сигналів, індукованих у обмотці датчика. Амплітуди напруженостей діючого поля розраховувались за нижче наведеною схемою [90].

Обґрунтування кількісних показників.

Для металів із високою електропровідністю, у яких спостерігається ярко виражений поверхневий ефект для збуджуваної е.р.с справедлива наступна залежність [119]:

$$\xi(t) = \mu_0 S_s N \frac{dH(t)}{dt} \approx \mu_0 S_s N \frac{di(t)}{dt}, \quad (4.1)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму,
 S_s – площа «вікна» індукційного датчика,
 N – кількість витків індукційного датчика,
 $i(t)$ – лінійна густина індукованого струму.

Абсолютна величина густини струму може бути знайдена наступним чином. Із залежності (4.1) отримаємо, що

$$i(t) = \frac{1}{\mu_0 S_s N} \int \xi(t) dt. \quad (4.2)$$

Для гармонічної часової залежності амплітудно-часова функція густини вихрового струму визначається як:

$$i(t) = \left| \xi(t) = \xi_m \sin(\omega t) \right| = \frac{\xi_m}{\mu_0 S_s N \omega} \cos(\omega t) \quad (4.3)$$

де ξ_m – амплітуда збуджуваної е.р.с.

ω – частота гармонічного сигналу.

Сила струму, як інтегральний показник, знаходиться, виходячи із припущення – $i(t) \approx H(t)$ [121].

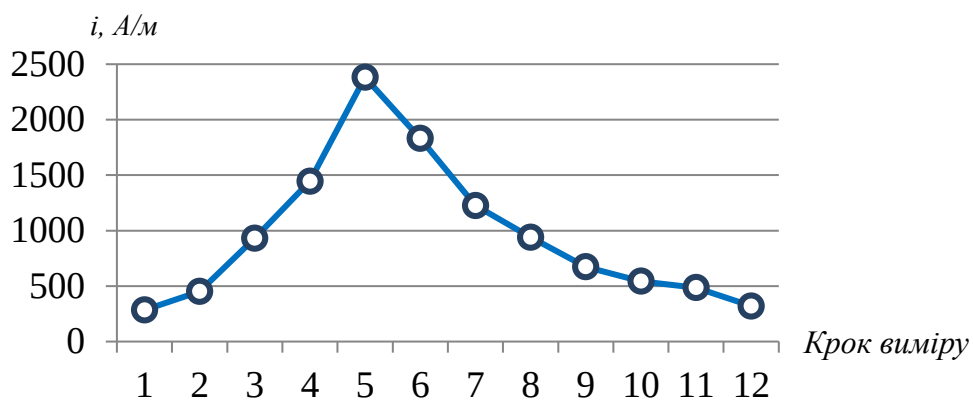
$$I(t) = \sum_{i=0}^n i_i(t) \cdot \Delta x_i \quad (4.4)$$

де Δx_i – величина шагу вимірювання у інтервалі вимірювання сигналу.

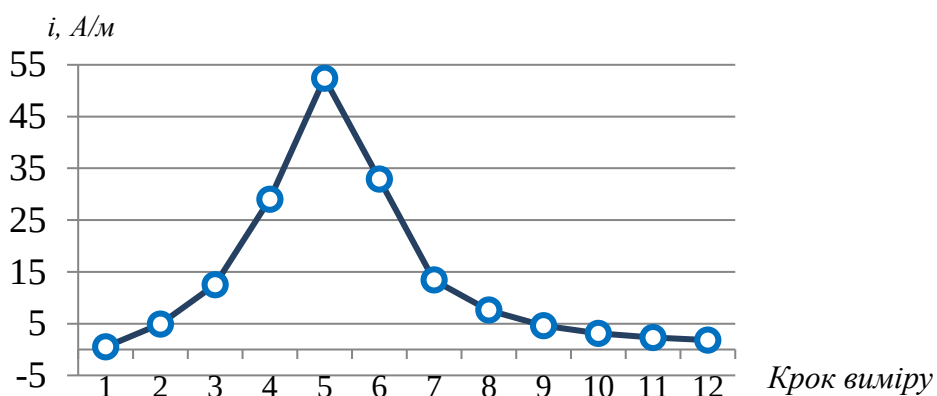
В ході вимірів були отримані наступні дані по розподілу індукованих струмів у зразках, представлені на рис. 4.13. – 4.18. та в табл. 4.1. і табл. 4.2.

Вимірювання.

Варіант №1.



а

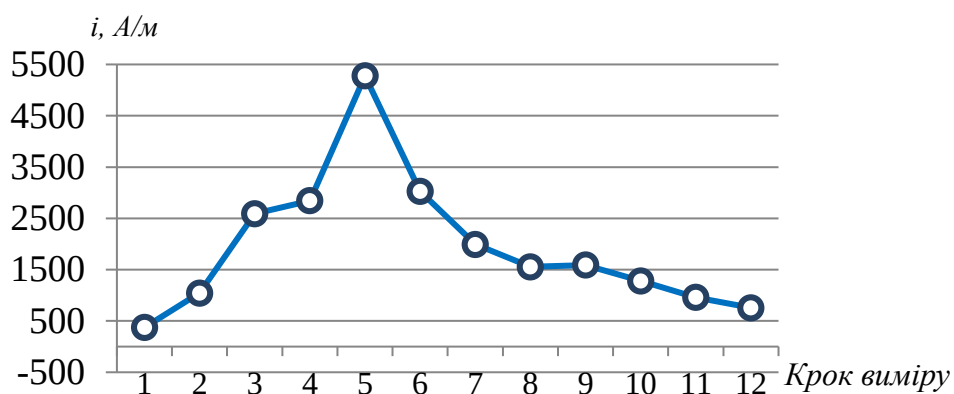


б

Рис. 4.13. Розподіл густини індукованих струмів на поверхні зразків
в полі кругового індуктору без сердечника:

а) залізо товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м б) алюміній товщиною $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м

Варіант №2.



а

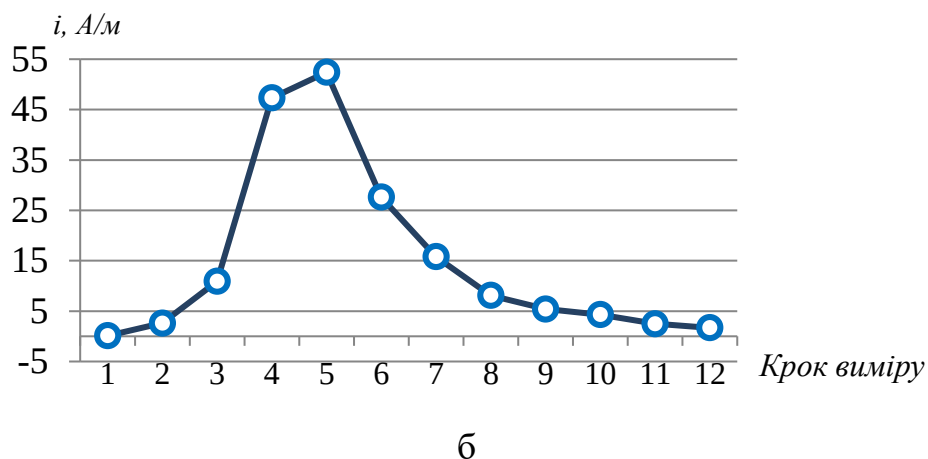


Рис. 4.14. Розподіл густини індукованих струмів на поверхні зразків
в полі кругового індуктору з феритовим сердечником:
а) залізо товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м б) алюміній товщиною $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м

Таблиця 4.1

Зведені показники Варіантів №1, №2

Матеріал заготовки	Залізо		Алюміній	
Варіанти індукторних систем	№1	№2	№1	№2
Інтегральна величина індукованого струму, А (формула 4.4)	56,85	115,61	0,81	0,89

Нагрів проводився у експериментах із заготовками з заліза. Використовуючи отриманий розподіл густини індукованих струмів у заготовці, фіксувалась точка «максимуму», у якій за допомогою інфрачервоного пірометра вимірювалось значення температури зразків. Вимірювання проводилось у приміщення за температури 17°C . Для розрахунку швидкості нагріву була прийнята максимальна температура 100°C .

Для Варіанта №1 швидкість нагріву заготовки індуктором склала $0,25^{\circ}\text{C} / \text{с}$, а для Варіанта №2 – $0,75^{\circ}\text{C} / \text{с}$.

Варіант №3.

За результатами вимірювань за допомогою програмного продукту «Mathematica 10.0» були розраховані просторові розподіли індукованих струмів у металевих зразках, представлені на рис. 4.15. – 4.18.

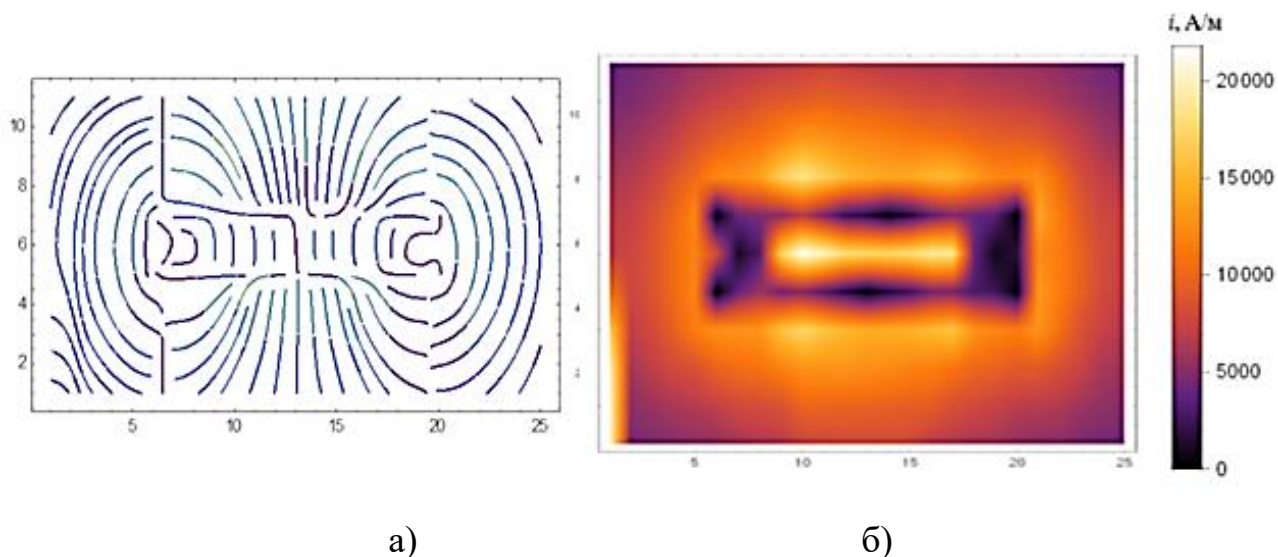


Рис. 4.15. Індуковані струми в металі мідної пластини товщиною $\sim 8 \cdot 10^{-3}$ м:

- а) контури протікання індукованих струмів
- б) розподіл густини індукованих струмів

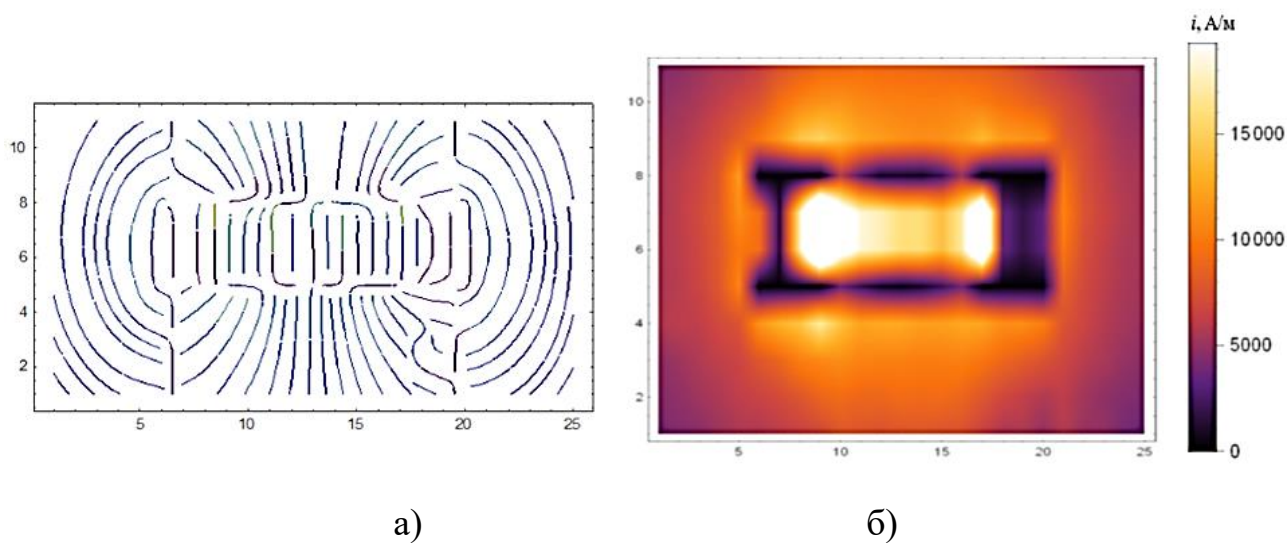


Рис. 4.16. Індуковані струми в металі залізної пластини товщиною $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ м:

- а) контури протікання індукованих струмів
- б) розподіл густини індукованих струмів

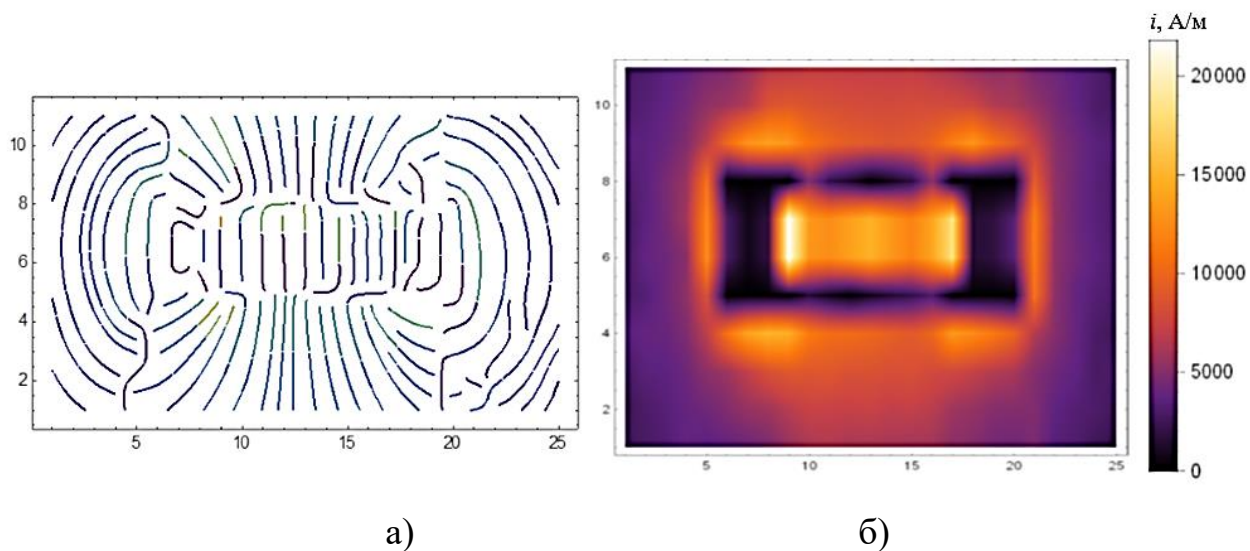


Рис. 4.17. Індуковані струми в металі залізної пластини товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м:

а) контури протікання індукованих струмів

б) розподіл густини індукованих струмів

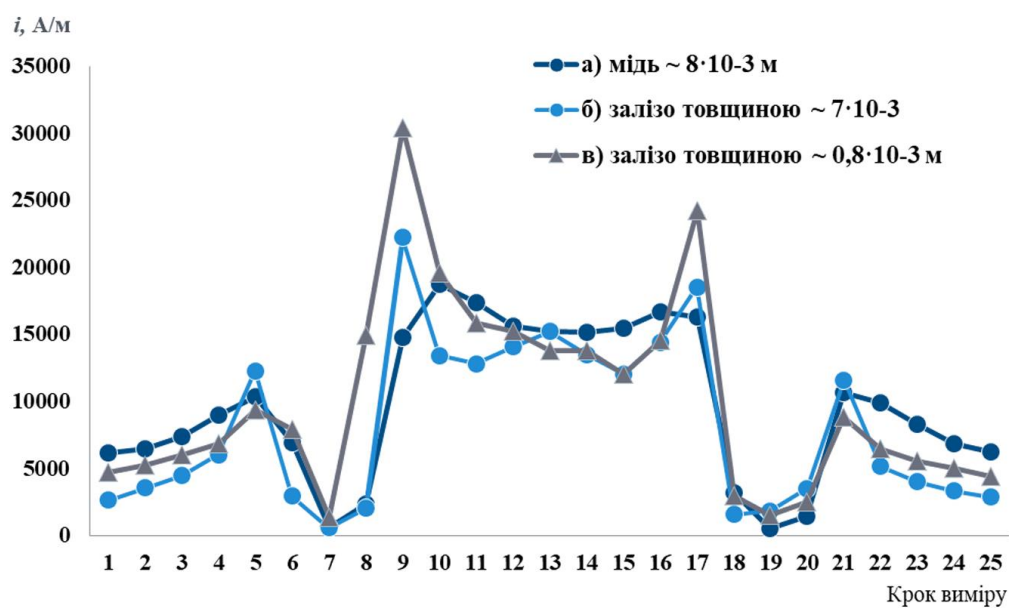


Рис. 4.18. Розподіл густини індукованого струму по повздовжній осі симетрії:

а) мідь $\sim 8 \cdot 10^{-3}$ м б) залізо товщиною $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ м

в) залізо товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м

Форма розподілу індукованих струмів для магнітних зразків в полі індуктора з П-образним феритовим сердечником практично співпадають.

Найбільші викривлення поля спостерігаються безпосередньо під витками обмотки індуктора.

Таблиця 4.2

Зведені показники для Варіанта №3

Матеріал заготовки	Залізо		Мідь
Експериментальні зразки	Масивна заготовка	Тонкостінна заготовка	
Інтегральна величина індукованого струму, А (формула 4.4)	1023,34	1276,49	1204,46

4.1.5 Узагальнення отриманих результатів, висновки

Модель отримана за допомогою МСЕ:

1. Зростання амплітуд напруженості магнітного поля у алюмінієвій заготовці після введення феритового сердечника становить $\sim 28\%$;
2. Зростання амплітуд напруженості магнітного поля у залізній заготовці після введення феритового сердечника становить $\sim 70\%$;
3. Відношення амплітуд напруженості магнітного поля у мідній та залізній тонкостінній заготовках під впливом поля індуктора з П-образним феритовим сердечником $\sim 0,3$;
4. Відношення амплітуд напруженості магнітного поля у залізній масивній та залізній тонкостінній заготовках під впливом поля індуктора з П-образним феритовим сердечником $\sim 1,03$.

Вимірювання:

1. Зростання амплітуд індукованих струмів у алюмінієвій заготовці після введення феритового сердечника становить $\sim 9\%$;
2. Зростання амплітуд індукованих струмів у залізній заготовці після введення феритового сердечника становить $\sim 51\%$;

3. При введенні до конструкції індуктора феритового сердечника швидкість нагріву заготовки вихровими струмами зростає у ~ 3 рази.

4. Відношення амплітуд індукованих струмів у мідній та залізній тонкостінній заготовках під впливом поля індуктора з П-образним феритовим сердечником $\sim 0,94$;

5. Відношення амплітуд індукованих струмів у залізній масивній та залізній тонкостінній заготівках під впливом поля індуктора з П-образним феритовим сердечником $\sim 0,8$.

4.2 Магнітно-імпульсне притягання листових зразків за «прямого пропускання струму»

Мета експериментів з магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через задані ділянки листових металів є у підтвердженні висновків теоретичних досліджень дійсної дисертаційної роботи, а також практична апробація принципової можливості запропонованого методу в умовах, наближених до реальності виконання відповідної виробничої операції.

Заздалегідь варто зазначити, що основним та найбільш значимим для практики отриманим теоретичним результатом є висновок про необхідність зниження робочих частот електромагнітних процесів та переходу до режиму інтенсивного проникнення полів у провідних елементах інструменту метода. Цей висновок дозволяє істотно підвищити амплітуди збуджуваних сил магнітно-імпульсного притягання не лише під час роботи зі сталевими зразками (низька електропровідність), але і під час деформування листових металів із алюмінієвих сплавів (висока електропровідність). Як впливає із фізики процесу, для реалізації режиму інтенсивного проникнення полів для металів із різною електропровідністю необхідні різні робочі частоти, але як показали розрахунки, на практиці, магнітно-імпульсне притягання сталі та алюмінію під час «прямого пропускання струму» можливо за допомогою одних і тих самих інструментів, де збуджуються поля із ідентичними часовими характеристиками.

Слід відзначити, дійсні експерименти із магнітно-імпульсним притяганням за «прямого пропускання струму», на відміну від відомих робіт [120,121], виконані із урахуванням нових напрацювань та досвіду у даному напрямку. Це дозволило перейти від принципових апробацій до експериментів із розумінням фізики процесів що протікають та виробленні конкретних рекомендацій із створення обладнання та оснащення для ефективного здійснення заданої виробничої операції.

4.2.1 Розрахунок експериментальної моделі інструмента

Принципова схема моделі інструмента магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» приведена нижче на рис. 4.15.

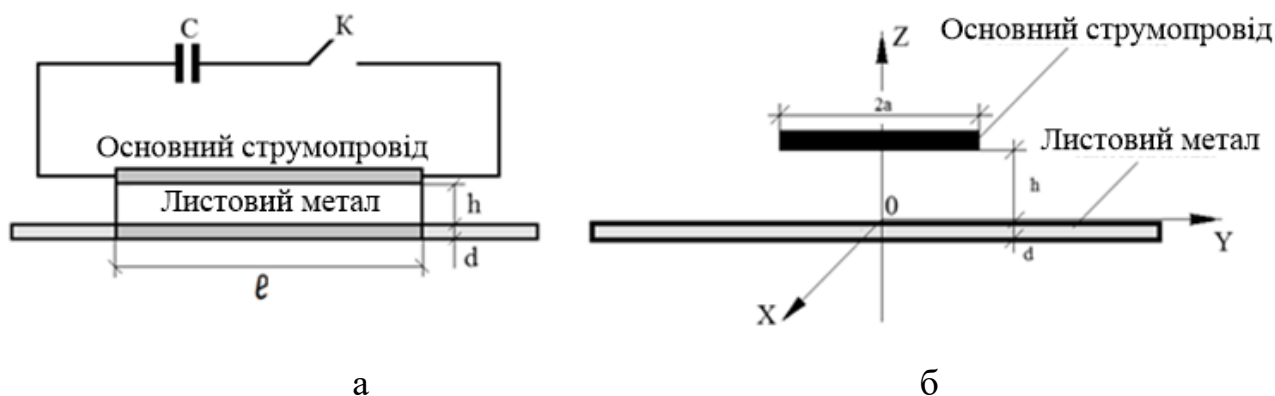


Рис. 4.15. Принципова схема: а) електрична схема заміщення; б) основний струмопровід – металева полоса, заготовка – металевий лист

Конструкція експериментальної моделі розробленого інструменту однакова для феро- та неферомагнетиків (зокрема, сталі та алюмінію).

Вона включає наступні компоненти:

- основний струмопровід – металева полоса заданої ширини;
- плоский металевий лист, задана частина якого підлягає притяганням та розташований на визначеній відстані від основного струмопроровіду;

- геометричні та електрофізичні параметри інструмента вважаються заданими (розміри та питома електропровідність);
- інструмент підключається до джерела потужності із напругою – через узгоджувальний пристрій, що забезпечує задану робочу частоту.

Результати чисельних оцінок для сталевого листа $\gamma \approx 0,5 \cdot 10^7$ Ом/м.

Робоча частота – $f = 1500$ Гц, напруга – $U = 2000$ В, робоча зона:
 $l \times (2a) = 0,06 \times 0,01$ м.

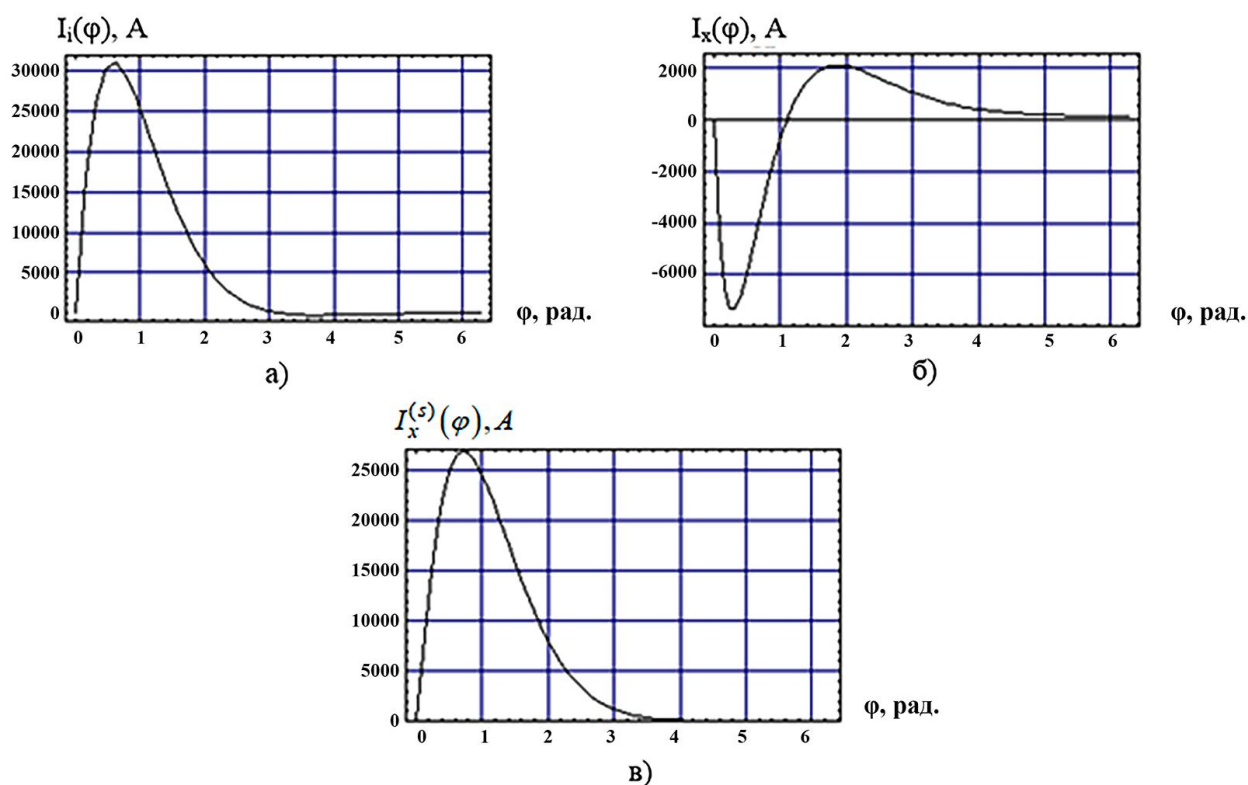


Рис. 4.16. Фазові залежності струмів у експериментальній системі:

а) збуджуючий струм; б) індукований струм; в) сумарний струм у колі кожного із взаємодіючих провідників системи

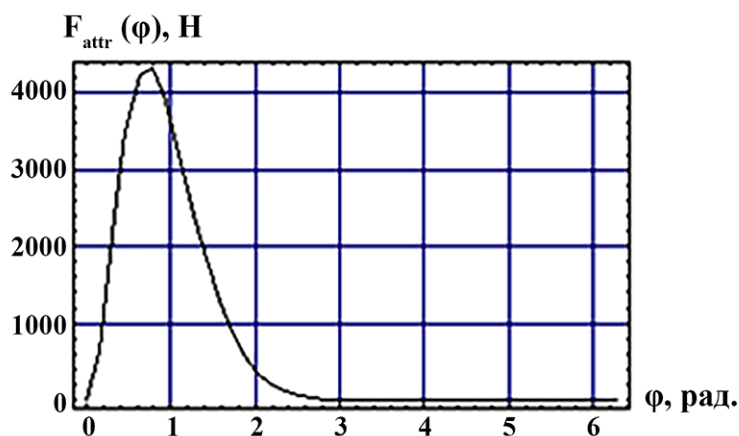


Рис. 4.17. Збуджувана сила притягання

Із результатів розрахунків слідує, що

- максимуму можливостей джерела потужності при зменшенні поперечного розміру основного струмопроводу індуктора до $\sim 0,01$ м відповідає максимум сили притягання ~ 4000 Н, що більше, ніж у ~ 2 рази перевищує аналогічний максимум для ширини струмопроводу $\sim 0,06$ м;
- із фізичної точки зору, причиною збільшення сил притягання при зменшенні поперечного розміру основного струмопроводу можна вважати ріст амплітуд збуджуваних полів (концентрація), що, вочевидь, привело до інтенсифікації індукційних процесів;
- поперечний розподіл сумарних струмів, що відображає рівень поперечного розподілу сил притягання, практично однорідний.

Зменшення ширини основного струмопроводу індуктора дозволяє значно збільшити силові показники системи магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» через оброблюваний метал.

Розрахунки, проведені для пониженої напруги – $U = 1500$ В, показали, що

- сила магнітно-імпульсного притягання складає ~ 1100 Н, що майже у ~ 4 рази менше зусилля що розвивається при максимумі розрядної напруги для прийнятого джерела потужності;

— має місце квадратична залежність між силами притягання що розвиваються та величиною розрядної напруги, тобто при зниженні напруги до 1500 В можна чекати притягання з амплітудою ~ 1778 Н;

— фізично, встановлена функціональна залежність між напругою та силами притягання що розвиваються, визначається квадратичною залежністю між напругою ємнісного накопичувача і запасеною енергією, що витрачається на збудження відповідних сил.

Встановлена квадратична залежність силами та розрядною напругою не враховує втрат під час передачі електромагнітної енергії від джерела до робочої зони інструмента.

Встановлена квадратична залежність сил що розвиваються від розрядної напруги дозволяє проводити орієнтовні наближені оцінки ефективності притягання під час роботи в прийнятому діапазоні енергетичних можливостей джерела потужності.

Результати чисельних оцінок для алюмінієвого листа с $\gamma \approx 3,75 \cdot 10^7$ Ом/м.

Робоча частота — $f = 1500$ Гц, напруга — $U = 2000$ В, робоча зона:

$$l \times (2a) = 0,06 \times 0,01 \text{ м}$$

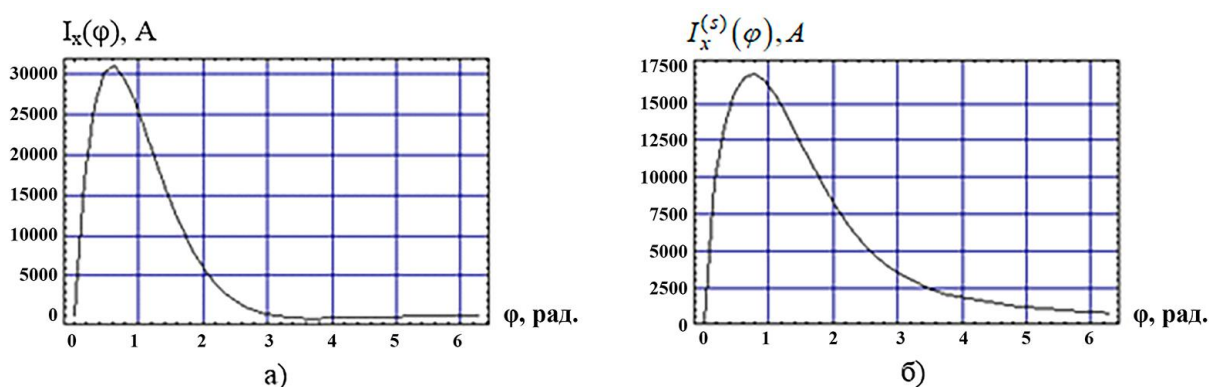


Рис. 4.18. Фазові залежності струмів у експериментальній системі:

а) збуджуючий струм; б) сумарний струм у колі кожного із взаємодіючих провідників системи

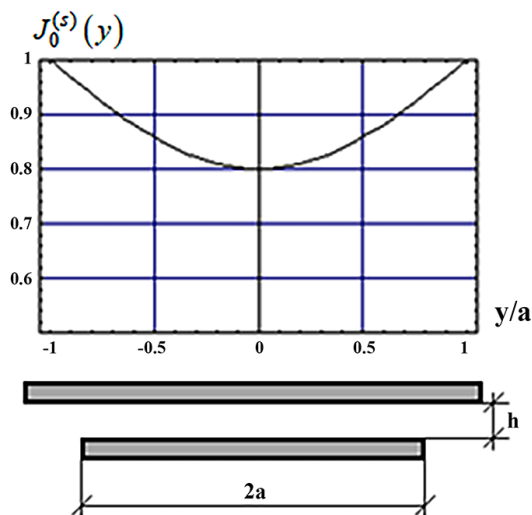


Рис. 4.19. Поперечний розподіл сумарного струму

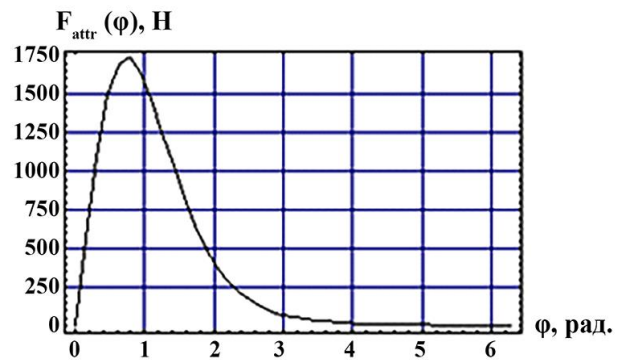


Рис. 4.20. Збуджувана сила притягання

Основні результати:

1. максимум сили притягання складає ~ 1750 Н;
2. рівень неоднорідності поперечного розподілу сумарного струму, що характеризує ступінь рівномірності поперечного розподілу сил притягання, не перевищує ~ 20 %.

Магнітно-імпульсне притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний алюміній достатньо ефективно із використанням технологічної та характерних показників виконуваної виробничої операції, що були прийняті для деформування сталевго зразка.

4.2.2 Обладнання, експериментальні об'єкти обробки

Експериментальне обладнання для виконання заданої виробничої операції включало дві основні складові:

- Інструмент магнітно-імпульсного притягання;
- Джерело потужності — енергетичний блок (магнітно-імпульсна установка).

Джерело потужності – магнітно-імпульсна установка МІУС-2 розроблена у ЛЕТ ХНАДУ. Загальний вид установки з інструментом представлений на рис. 4.21. Опис основних характеристик приведено у роботах [73,106,113].

Слід відзначити, що МІУС-2, як джерело потужності, безперервно вдосконалюється. Зокрема, здійснений перехід до аперіодичного режиму розряду, що дозволяє істотно збільшити строк служби ємнісних накопичувачів [73].



Рис. 4.21. Магнітно-імпульсна установка МІУС-2 з максимумом накопичуваної енергії $\sim 2,4$ кДж при напрузі ~ 2 кВ

Конструктивно, МІУС-2 оформлена у вигляді єдиного блока, у якому сконцентровано все електрообладнання, а також повітряна система охолодження комутаторів і зарядного пристрою (рис. 4.21).

На верхній площині корпусу встановлена горизонтальна масивна діелектрична плита, яка може використовуватися у якості технологічного стола. На його поверхню виведені струмознімачі (електричні клема) для підключення

навантаження. Як було вказано раніше, такою є «індукторна система з притягаючим екраном» – інструмент для виконання заданої виробничої операції.

Характеристики магнітно-імпульсної установки МІУС-2 [73,106]:

- максимум накопичуваної енергії $W \sim 2,4$ кДж;
- ємність накопичувача – $C = 1200$ мкФ;
- власна частота – $f_0 \sim 7$ кГц;
- напруга ємнісного накопичувача в діапазоні $\sim 100 \div 2000$ В;
- частота слідування імпульсів струму що генеруються – $1 \div 10$ Гц;
- режим багатократного повторення забезпечується електронним блоком керування, який синхронізує процеси «заряд – розряд»;
- тип комутаторів – тиристорні вимикачі;
- напруга мережі живлення $\sim 380 / 220$ В.

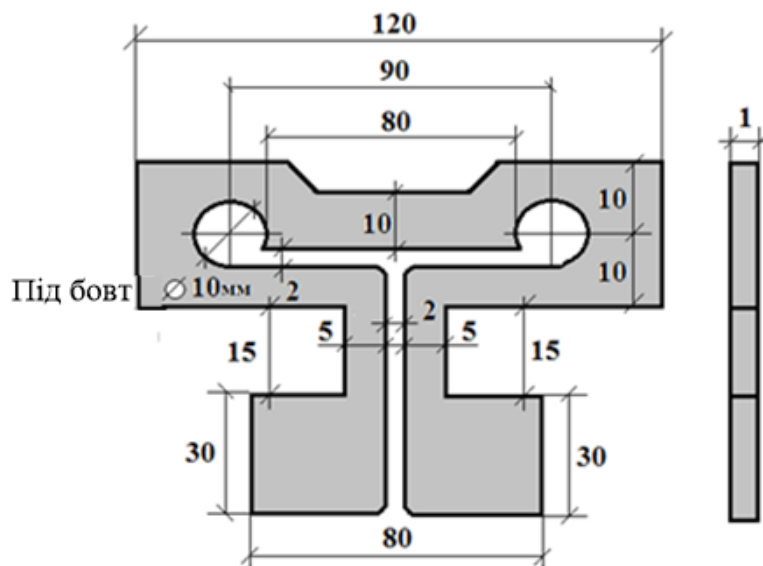


Рис. 4.22. Основний струмопровід інструменту із робочою зоною шириною $\sim 0,01$ м та довжиною $\sim 0,08$ м у верхній частині, «пелюстки» нижньої частини під'єднується до узгоджувального пристрою

Вибір геометричної форми інструмента обумовлений вимогою мінімальної індуктивності струмопроводів, аби знизити втрати електромагнітної енергії під час її транспортування від виводів узгоджувального пристрою.

Експериментальні зразки – пластини із металевих прямокутної геометрії з вм'ятинами: сталь із кузовного покриття автомобіля «Форд», спеціальна електротехнічна сталь. Товщина пластин $\sim 0,08$ м, розмір вм'ятин $\sim \varnothing 0,02 \div 0,25$ м

4.2.3 Практична апробація, основні результати

Послідовність операцій при силовій апробації розробленого інструменту магнітно-імпульсного притягання та показники процесу видалення вм'ятин під час проведення експерименту:

- огляд та візуальне вивчення об'єкта обробки металевієї пластини з вм'ятиною;
- взаємна механічна фіксація об'єкта обробки та інструмента метода за допомогою болтових з'єднань;
- установка напруги ємнісного накопичувача на рівні $\sim 1800 \div 2000$ В;
- включення кола інструмента та силовий вплив на метал із вм'ятиною в режимі $(5 \div 10)$ -кратного повторення магнітно-імпульсного притягання;
- огляд і візуальне вивчення експериментального зразка із видаленою вм'ятиною, констатація ефективності виконаної виробничої операції.

У випадку недостатнього вирівнювання поверхні із вм'ятиною операція магнітно-імпульсного притягання може повторюватися до отримання бажаного рівня якості виробничої операції що виконується.

Далі наведені ілюстрації проведеного експерименту.



Рис. 4.23. Загальний вид: джерело потужності МІУС–2 із інструментом притягання та листовим зразком з вм'ятиною, що підлягає видаленню

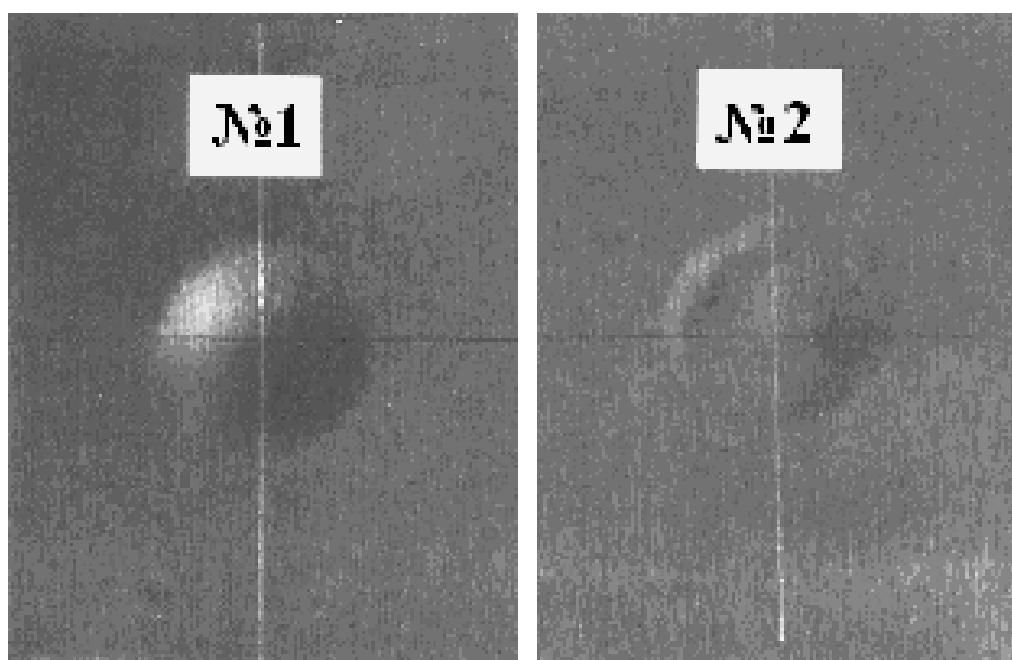


Рис. 4.24. Експериментальні зразки із спеціальної електротехнічної сталі:

№1 – зразок до притягання, №2 – зразок після притягання
(5 – кратне повторення магнітно-імпульсного притягання)

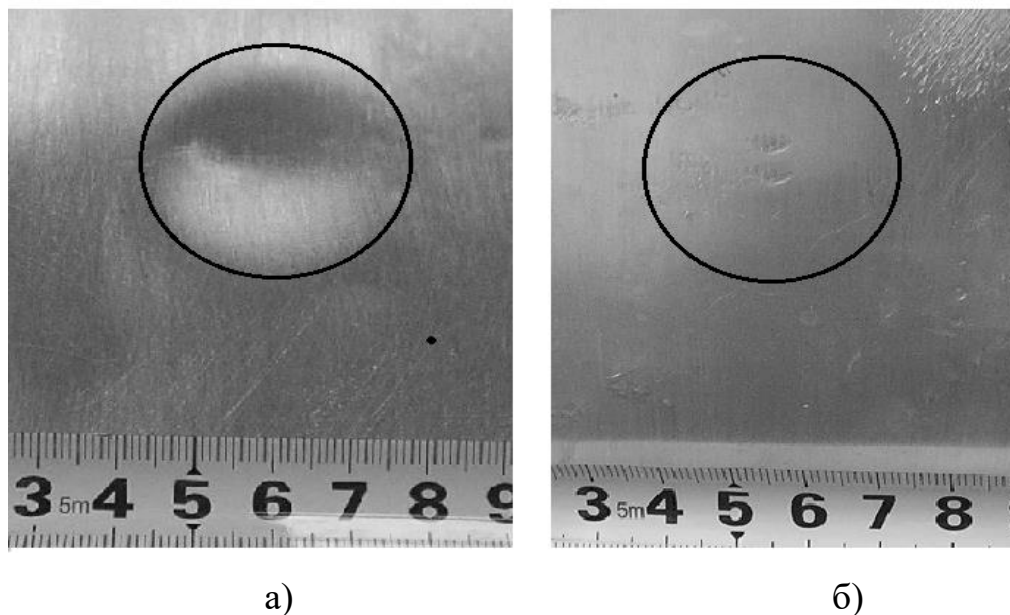


Рис. 4.25. Експериментальні зразки із кузовної сталі автомобіля «Форд»:

а) зразок із вм'ятиною до притягання б) зразок після притягання
(9 – кратне повторення магнітно-імпульсного притягання)

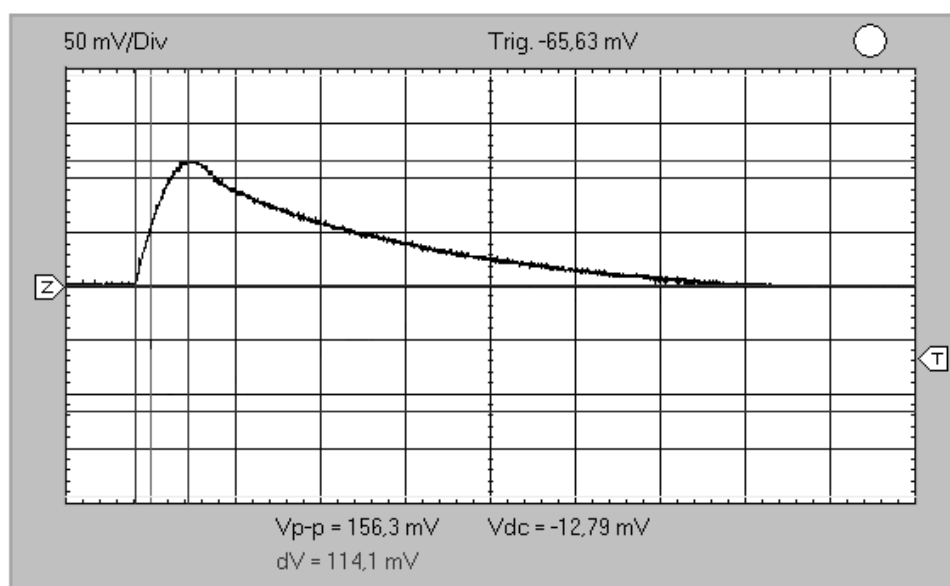


Рис. 4.26. Типова осцилограма струмового імпульсу у розрядному контурі з інструментом магнітно-імпульсного притягання

Основні результати проведених експериментів зведені до наступних положень.

1. Успішно продемонстровані практичні можливості інструментів магнітно-імпульсного притягання заданих ділянок листових металів за «прямого пропускання струму».

2. Практично реалізовано керований (дозований) силовий магнітно-імпульсний вплив, що дозволяє здійснювати контрольоване деформування листового металу в зоні обробки.

3. Експериментально апробований метод магнітно-імпульсного притягання особливо цікавий для видалення вм'ятин у автомобільних кузовах, оскільки, на відміну від відомих аналогів, не потребує розбирання на елементи з метою обов'язкового доступу до внутрішньої сторони вм'ятини що видаляється.

Висновки за розділом 4

За результатами проведених експериментів з індукційного нагріву листових металів та магнітно-імпульсної обробки із «прямим пропусканням струму» через оброблюваний об'єкт можна зробити наступні висновки.

1. Після введення до конструкції інструмента феритового сердечника зафіксовано збільшення амплітуд індукованих струмів у оброблюваних заготовках у ~ 2 рази.

2. При введенні до конструкції індуктора феритового сердечника швидкість нагріву заготовки вихровими струмами зростає у ~ 3 рази.

3. Амплітуди індукованих струмів у заготовках в полі індуктора із П-образним феритовим сердечником показують більшу ефективність нагріву тонкостінних металів, що мають магнітні властивості, ніж для аналогічних масивних зразків.

4. Практична реалізація інструментів магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» через оброблюваний об'єкт дозволяє здійснювати дозований та контрольований силовий вплив на листові метали в зоні обробки.

5. Практична апробація інструментів магнітно-імпульсного притягання за «прямого пропускання струму» в модельних експериментах з відновлення кузовних поверхонь автомобільного транспорту продемонструвала достатньо високу ефективність даної виробничої операції.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора: [12-14,19,21]

ВИСНОВКИ

Основні результати, отримані при виконанні даної дисертаційної роботи, зводяться до наступних двох положень.

1. Вперше запропонована та апробована конструкція інструмента індукційного нагріву із феромагнітним сердечником, що дозволяє істотно підвищити ефективність даної виробничої операції (збільшення амплітуди індукованих струмів та скорочення часу нагріву).

2. Запропонована, вдосконалена та практично апробована конструкція інструмента магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму», використання якої дозволяє успішно реалізувати ремонтні операції відновлення пошкоджених автомобільних кузовів (без поелементного розбирання, із можливістю дозування силового впливу, скорочення часу виконання, збільшення продуктивності).

У розгорнутому вигляді результати виконаних досліджень представлені нижче.

1. Індукційний нагрів, що має беззаперечні переваги у порівнянні із традиційними методами термообробки, є прогресивною екологічно чистою технологією обробки металів, що дозволяє успішно здійснювати безконтактний роз'єм жорстко посаджених та різьбових з'єднань, локальний нагрів заданих ділянок термообробки, безконтактне вирівнювання листових металів тощо.

2. Аналіз магнітно-імпульсних методів силового впливу, що засновані на притяганні заданих ділянок листових металів, показав затребуваність електромагнітних технологій відновлення кузовних покриттів транспортних засобів.

3. Досліджені електромагнітні процеси у масивному металевому зразку при збудженні поля плоским соленоїдом із феритовим сердечником – інструментом індукційного нагріву. Показано, що у діапазоні намагніченості феритового сердечника в індукторі – $\mu_{r2} \in [1, 1000]$ має місце дійсний ріст інтенсивності індукційного процесу.

4. Показано, що при введенні додаткового джерела магнітного поля із феритовим наповненням (П-образний сердечник) має місце подальший ріст амплітуд індукованих струмів. Так, в системі з двома індукторами можливе збільшення інтенсивності індукційного процесу більше ніж у $\sim 1,5$ рази.

5. Із долученням схеми збудження сил тиску на провідник у магнітному полі дано фізичне обґрунтування працездатності систем із «прямим пропусканням струму», основною умовою якої є вимога низьких робочих частот, що забезпечують режим інтенсивного проникнення збуджуваних електромагнітних полів.

6. Розраховані струми і сили в залежності від часових показників процесів що протікають та геометричних параметрів робочої зони інструмента магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму».

7. Запропоновані принципові схеми реалізації магнітно-імпульсного притягання із «прямим пропусканням струму» через оброблюваний метал, що передбачає паралельне або послідовне електричне включення інструменту метода до кола джерела потужності.

8. Показано, що магнітно-імпульсний вплив за «прямого пропускання струму» дозволяє доволі ефективно притягати задані ділянки не лише сталевих зразків, але і листового алюмінію товщиною ~ 1 мм, що доволі актуально у сучасному автомобілебудуванні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Batygin YV, Golovashchenko SF, Gnatov AV. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications. Journal of Materials Processing Technology. 2013;213(3):444-52. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003.
2. Batygin YV, Golovashchenko SF, Gnatov AV. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. Journal of Materials Processing Technology. 2014;214(2):390-401. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018.
3. Яворский БМ, Детлаф АА, Лебедев АК. Справочник по физике. Москва: Оникс; 2006.
4. Batygin YV, Chaplygin EA, Shinderuk SA, Strelnikova VA. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. Електротехніка і Електромеханіка. 2018;3:43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06
5. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 1: Металлы с низкой удельной электропроводностью. Електротехніка і Електромеханіка. 2019;5:40-4. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07
6. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 2: Металлы с высокой удельной электропроводностью. Електротехніка і Електромеханіка. 2019;6:39-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05
7. Strelnikova V. Experimental research of induction heating in inner hollow of cylindrical solenoid. European Journal of Engineering Research and Science. 2020;5(8):986-9. doi: 10.24018/ejers.2020.5.8.2053
8. Батыгин ЮВ, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев и магнитно-импульсное притяжение для промышленных технологий современности. Харьков: Лидер; 2019. 162 с. ISBN 978-617-7476-29-9

9. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. Автомобільний транспорт. 2017;40:75-9.
10. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагріву в сучасних технологіях машинобудування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;4(133):70-4.
11. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Індукційне нагрівання тонкої ферромагнітної пластини в полі плоского кругового соленоїда. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;6:135-140.
12. Стрельникова ВА. Особенности индукционного нагрева массивных металлических заготовок индукторами с ферромагнитными сердечниками. Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. 2018;32(1308):99-104. doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17
13. Батыгин ЮВ, Ерёмина ЕФ, Чаплыгин ЕА, Стрельникова ВА. Электродинамические процессы в инструментах магнитно-импульсного притяжения при прямом пропускании тока через обрабатываемый металл. Вісник НТУ «ХПІ». Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2019;8(1333):207-13.
14. Batygin YV, Yeryomina OF, Shinderuk SO, Strelnikova VA, Chaplygin YO. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. Вісник НТУ «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях. 2020;4(6):3-13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.
15. Batygin YV, Chaplygin YO, Sabokar OS, Strelnikova VA. Analysis of electromagnetic processes in the system “cylindrical solenoid – massive conductor” Електротехніка і Електромеханіка. 2018;1:54-8. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.08
16. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Сабокарь ОС, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев во внутренней полости цилиндрического соленоида. Основные соотношения протекающих процессов. Вісник Хмельницького національного університету. 2017;6(255):32-6.

17. Батыгин ЮВ, Сериков ГС, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов. Електротехніка та електроенергетика. 2019;2:34-42.
18. Strelnikova VA, Voronova YM. Electromagnetic metal forming. The relevance and prospects for the use in industry. In: Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences. 36. наук. пр. Міжнар. наук-практ. конф.; 2017 Бер. 22; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, 7(2), с. 205-7.
19. Лавінський ДВ, Конкін ВМ, Стрельнікова ВА. Чисельні розрахунки температурного поля у елементах енергетичного устаткування з урахуванням впливу електромагнітного поля. В: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф.; 2019 Квіт. 25-26; Харків; Харків: НТУ «ХП», Вид-во «Лідер»; 2019, с. 66-7.
20. Стрельнікова ВА. Сучасні технології ремонту автомобілів з використанням електромагнітної формовки металів. В: Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика. Тези доп. III Всеукр. наук-практ. конф. молод. вч., спец. та асп.; 2017 Травн. 11-12; Маріуполь. Маріуполь: Приазовськ. держ. техн. ун-т; 2017 с. 70-2.
21. Стрельнікова ВА. Моделювання процесу індукційного нагріву металів засобами пакету скінченно-елементного аналізу ANSYS. В: Математична підготовка у багатоступеневій системі вищої освіти: погляд студентів і молодих вчених. Матеріали Всеукр. наук-практ. конф. студ. і молод. вч.; 2017 Квіт. 13-14; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, с. 412-4.
22. Батигін ЮВ, Чаплигін ЄО, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. патентовласник. Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Патент України № 121597. 2017 Груд. 11.
23. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, Шиндерук СО, Чаплигін ЄО, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т.

патентовласник. Пристрій індукційного нагріву з магнітним концентратором. Патент України №. 122800. 2018 Січ. 25.

24. Льюис М. История физики. Москва: Мир; 1970.
25. Дуков ВМ. Электродинамика. Москва: Высшая школа; 1975.
26. Слухоцкий АЕ. Установки индукционного нагрева. Ленинград: Энергоиздат; 1981.
27. Rudnev V, Loveless D, Cook RL. Handbook of induction heating. New York: CRC press; 2017.
28. Rudnev V, Totten GE, eds. ASM handbook. Vol. 4C, Induction heating and heat treatment. Ohio: ASM International; 2014.
29. Tudbury CA. Basics of induction heating. New York: JF Rider; 1960.
30. Слухоцкий АЕ, Рыскин СЕ. Индукторы для индукционного нагрева. Ленинград: Энергия; 1974.
31. Lozinskii MG. Industrial applications of induction heating. London: Pergamon; 1969.
32. Simpson PG. Induction heating: coil and system design. New York: McGraw-Hill; 1960.
33. Orfueil M. Electric Process Heating: technologies, equipment, applications. Columbus, Ohio: Battelle Press; 1987.
34. Semiatin SL. Elements of induction heating: design, control, and applications. Ohio: ASM International; 1988
35. Davies EJ. Conduction and Induction Heating. London: IEE Power Engineering Series; 1990
36. Rudnev V, Loveless D. Comprehensive Materials Processing. Vol. 12, Induction hardening: Technology, process design, and computer modeling. Oxford: 2014; p 489–580
37. Rudnev V, Dossett J. ASM Handbook. Vol. 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. Induction surface hardening of steels. Ohio: ASM International; 2014, p. 438–61

38. Rudnev V, et.al. Steel Heat Treatment: Equipment and Process Design. Vol. 4. New York: Taylor & Francis; 2007
39. Gebhart B. Heat Transfer. New York: McGraw-Hill; 1970.
40. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: CRC Press; 1980.
41. Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, DeWitt DP. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley; 2011.
42. Myers RF. Conduction Heat Transfer. New York: McGraw-Hill; 1972
43. Adams JA, Rogers DF. Computer Aided Analysis in Heat Transfer. New York: McGraw-Hill; 1973
44. Rohsenow WM, Hartnett JP. Handbook of Heat Transfer. New York: McGraw-Hill; 1973
45. Howell JR, Menguc MP, Siegel R. Thermal radiation heat transfer. New York: CRC press; 2015
46. Wiebelt JA. Engineering Radiation Heat Transfer. New York: Holt, Rinehart and Winston; 1966
47. Sparrow EM. Radiation heat transfer. NJ: Routledge; 2018.
48. Howell JR. A Catalog of Radiation Configuration Factors. New York: Institute for Public Policy Research; 1982
49. Holman J. Heat Transfer. London: McGraw-Hill; 1992
50. Lucia O, Maussion P, Dede EJ, Burdío JM. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013;61(5):2509–20. doi: 10.1109/TIE.2013.2281162.
51. ООО Термолит. Индукционное плавильное и нагревательное оборудование [Интернет]. Мелітополь: ООО «Термолит»; 2008 [процитовано 2019 Бер 15]. Доступно: <https://termolit.com/produktsiya/>
52. ООО Гроцкий Транс. [Интернет]. Гуровщина: Компания «Эффект»; 2016. Индукционные нагреватели. [процитовано 2019 Бер 15]; [1 экран]. Доступно по: https://josam-ua.com/indukcionnie_nagrevateli.html

53. Тюленев СА. Система индукционного нагрева с регулируемой мощностью для ремонта подвижного состава [диссертация]. СПб: Петербург. гос. ун-т путей сообщения; 2005.
54. Дрешпак НС. Моделювання електромагнітних процесів індукційного нагріву циліндричних деталей, з'єднаних посадкою з натягом. В: Енергетика та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації, енергозбереження. Зб. наук. праць VIII Всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів; 2010 квіт. 8-9; Кременчук. Кременчук: КДУ; 2010. с. 426-27.
55. Дрешпак НС. Результати аналізу режимів індукційного нагріву рознімних деталей машин. Наук. вісн. Нац. гірнич. ун-ту. 2012;4:108–13.
56. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Барбашова МВ, Гаврилова ОЕ. Инструмент рихтовки «индукторная система с притягивающим экраном» и протяженным соленоидом. Автомобильный транспорт. 2017;40:80-7.
57. Чаплигін ЄО, Шиндерук СО, Третинников ЄО. Апробація видалення вм'ятин в листових металах циліндричною індукторною системою з екраном, що притягає. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2018;5:58-62.
58. Gasser C, Kolleck R, Veit R, Wilfinger G. Development of a close-to-production prototype of an induction heating device for hot stamping of boron alloyed steels. In: SCT 2011. Düsseldorf: Stahleisen GmbH; 2011. p. 83-90.
59. Mingxiang, C, Xinjian Y, Liulin Y, Sheng L. Research on low-temperature anodic bonding using induction heating. Journal of Physics: Conference Series. 2006;34:973-8. doi: 10.1088/1742-6596/34/1/161.
60. Rudolf R, Mitschang P, Neitzel M. Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2000;3111:1191–202.
61. Soe SA, et.al. Design calculation and performance testing of heating coil in induction surface hardening machine. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2008;2(6):1134–1138.

62. Thermatool Corporation [Internet]. East Haven: Thermatool Corp; 2019. [cited 2019 Jan 12]. Available from: <https://www.thomasnet.com/profile/00472407/thermatool-corp-.html>
63. Thermatool Corporation [Internet]. East Haven: Thermatool Corp; 2019. High Frequency Welders [cited 2019 Jan 12]. Available from: https://www.thermatool.com/product_categories/high-frequency-welders/.
64. Leading Manufacturers of Melting, Thermal Processing & Production Systems for the Metals & Materials Industry Worldwide. [Internet]. *Reichenbach a. d. Fils*: Inductotherm Group Company; 2011. [cited 2020 March 5]. Available from: https://m.europages.com/filestore/gallery/bd/24/16080585_10f58fd6.pdf
65. Duolin electric. Induction heating machine [Internet]. Chengdu: Duolin Electric Co; 2001 [cited 2019 Nov 5]. Available from: <https://www.duolin.com>
66. Проминдуктор. Индукционные нагреватели. От технологии до конечного результата [Интернет]. Наро-Фоминск: Проминдуктор; 2010 [процитовано 2019 Сент 14]. Доступно по: <https://prominductor.ru>
67. Укриндуктор. Поставка металлургического оборудования [Интернет]. Киев: Укриндуктор; 2014. Индукционные нагреватели [процитировано 2019 Март 5]; [1 экран]. Доступно по: <http://ukrinductor.com.ua/ru/induktsionnye-nagrevateli/>
68. Esteve, V, Jordan J, Dede EJ, Sanchis-Kilders E, Maset E. Induction heating inverter with simultaneous dual-frequency output. In: Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition; 2006 March 19-23; Dallas. Dallas, USA: IEEE; 2006. 5 p. doi: 10.1109/APEC.2006.1620739.
69. Esteve V, Sanchis-Kilders E, Jordan J, Dede EJ, Cases C, Mase E et al. Improving the efficiency of IGBT series-resonant inverters using pulse density modulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58(3):979-87. doi: 10.1109/TIE.2010.2049706.
70. EFD induction [Internet]. Skien: EFD Induction Group AS; 1997. Minac: Mobile induction heating equipment [cited 2019 Nov 5]; [2 screen]. Available from:

<https://www.efd-induction.com/en/induction-heating-equipment/minac-mobile-induction-heating-equipment/>

71. Betag Innovation. Efficient repair solutions [Internet]. Wollerau: Betag Innovation; 2021 [cited 2019 Nov 25]. Available from: <http://www.betaginnovation.com>

72. Дрешпак Н. С. Режими індукційного нагріву деталей машин з рознімним з'єднанням циліндричних поверхонь. [автореферат]. Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т; 2010.

73. Харківський національний автомобільно-дорожній університет [Інтернет]. Харків: ХНАДУ; 2021. Науково-дослідна лабораторія електромагнітних технологій [цитовано 2021 Верес 14]; [2 екрана]. Доступно за: <https://af.khadi.kharkov.ua/chairs/physics/naukovo-doslidna-laboratorija-elektromagnitnikh-tekhnologii/>

74. Ulrich M, Bickel DM, Wiseman D, Baxter R, inventor; Illinois Tool Works Inc., assignee. Induction heating system with a flexible coil. United States patent 6,229,126. 2001 May 8.

75. Thomas JR, Baxter RG, Verhagen PD, inventor; Illinois Tool Works Inc., assignee. Induction heating system output control based on induction heating device. United States patent 8,115,147. 2012 Feb 14.

76. Autotron. Induction heating systems [Internet]. Ohio: Ajax Tocco Magnethermic Corporation; 2005 [cited 2019 Nov 5]. Available from: <http://www.autotronheater.com>

77. Psyk V, Risch D, Kinsey BL, Tekkaya AE, Kleiner M. Electromagnetic forming. A review. Journal of Materials Processing Technology. 2011;211(5):787–829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.

78. Furth HP, inventor. Devices for metal-forming by magnetic tension. United States patent 3,196,649. 1965 July 27.

79. Hansen KA, Hendrickson IG, inventor; The Boeing Company, assignee. Electromagnetic dent puller. United States patent 3,998,081. 1976 Dec 21.

80. Hendrickson IG, Hansen KA, inventor; The Boeing Company, assignee. Electromagnetic dent remover with tapped work coil. United States patent 4,986,102. 1991 Jan 22.
81. Zieve PB, inventor. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover. United States patent 5,046,345. 1991 Sep 10.
82. Electroimpact. Electroimpact is a world leader in design and manufacturing of aerospace tooling and automation [Internet]. Mukilteo: Electroimpact Inc; 1996 [cited 2019 Nov 5]. Available from: <http://www.electroimpact.com>
83. Fluxtronic. Specialized in Electromagnetic Dent Removal [Internet]. Nashville: Fluxtronic; 2000 [cited 2019 Nov 5]. Available from: <http://www.fluxtronic.com>
84. Шнеерсон ГА. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Ленинград: Энергоиздат; 1981.
85. Batygin YuV, Lavinsky VI, Khimenko LT. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. In: Kleiner M, ed. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming; 2004 March 31-April 1; Dortmund, Germany. Dortmund: University of Dortmund; 2004. p. 157-60.
86. Батигін ЮВ, Лавінський ВІ, Хименко ЛТ, винахідники; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т», патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок. Патент України UA 75676. 2006 трав. 15.
87. Meichtry R, Kouba I, inventor. Dent removing method and device. International Patent WO/2006/119661. 2006 Nov 16.
88. Meichtry R, Basler B, Kouba I, inventor. Method and device for removing dents. International Patent US20160044748. 2016 Feb 11.
89. Аргун ЦВ, Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Смирнов ДО, Трунова ІС, Щиголева СО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок з використанням узгоджувального пристрою. Патент України UA 69467. 2015 квіт. 25.

90. Батыгин ЮВ, ред. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Харьков: МОСТ-Торнадо; 2003. (Батыгин ЮВ, Лавинский ВИ, Хищенко ЛТ; т. 1).
91. Аргун ЩВ, Чаплигін ЄО, Гнатов АВ, Батигін ЮВ, Трунова ІС, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок. Патент України UA 68745. 2012 квіт. 10.
92. Аргун ЩВ, Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Трунова ІС, Щиголева СО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів суміщеним дисковим погоджувальним пристроєм з демпферною конструкцією. Патент України UA 75790. 2012 груд. 10.
93. Батигін ЮВ, Лавінський ВИ, Хавін ВЛ, винахідники; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т», патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок. Патент України UA 74909. 2006 лют. 15.
94. Батигін ЮВ, Бондаренко ОЮ, Чаплигін ЄО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок методом притягання до індуктора. Патент України UA 31751. 2008 квіт. 25.
95. Гнатов АВ, Чаплигін ЄО, Батигін ЮВ, Смирнов ДО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів одновитковим циліндричним індуктором, розділеним на дві гілки. Патент України UA 54753. 2010 листоп. 25.
96. Дробінін ОМ, Чаплигін ЄО, Гнатов АВ, Аргун ЩВ, Батигін ЮВ, Гопко АВ, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів одновитковою індукторною системою з тонким екраном. Патент України UA 70055. 2012 трав. 25.
97. Дробінін ОМ, Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Щиголева СО, Гопко АВ, Чаплигін ЄО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою

індукторною системою з тонким екраном. Патент України UA 70734. 2012 черв. 25.

98. Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Чаплигін ЄО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів багатовитковою круговою індукційною індукторною системою. Патент України UA 92037. 2014 лип. 25.

99. Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Чаплигін ЄО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Багатовиткова кругова індукційна індукторна система для магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів. Патент України UA 92436. 2014 серп. 11.

100. Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Гопко АВ, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном. Патент України UA 77579. 2013 лют. 25.

101. Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Чаплигін ЄО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсної обробки поверхонь кузовних елементів. Патент України UA 104509. 2016 лют. 10.

102. Батигін ЮВ, Бондаренко, ОЮ, Серіков ГС, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок. Патент України UA 31752. 2008 квіт. 25.

103. Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Серіков ГС, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів прямокутним індуктором, з двома розрізами. Патент України UA 53968. 2010 жовт. 25.

104. Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Чаплигін ЄО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок індукторною системою з двома прямокутними витками та тонким екраном. Патент України UA 78243. 2013 листоп. 11.

105. Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Чаплигін ЄО, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Комплекс зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування Патент України UA 101413. 2015 верес. 10.
106. Батыгин ЮВ, Лавинский ВИ, Хименко ЛТ. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов. Електротехніка і електромеханіка. 2004;2:80-4.
107. Бондаренко АЮ, Финкельштейн ВБ, Гаврилова ТВ. Внешняя рихтовка кузовов автомобильного транспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока. Вест. Нац. техн. ун-та "ХПИ", 2014;9(1052):66-72.
108. Кухлинг Х. Справочник по физике. Москва: Мир; 1985.
109. Алиферов А, Луи С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов. Новосибирск: НГТУ; 2013.
110. Сысун ВИ, Подопригора ВА. Индукционный нагрев в режиме насыщения. Фундаментальные исследования. 2004;3:132-4.
111. Батыгин ЮВ, Бондаренко АЮ, Лавинский ВИ. Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов. Электричество. 2009;9:61-5.
112. Батыгин ЮВ, ред. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Харьков: ХНАДУ; 2009. (Туренко АН, Батыгин ЮВ, Гнатов АВ. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями; т. 3).
113. Корн Т, Корн Г. Справочник по математике. Москва: Наука; 1973.
114. Туровский Я. Техническая электродинамика. Москва: Энергия; 1974.
115. Ландау ЛД, Лифшиц ЕМ. Теоретическая физика электродинамика сплошных сред. Москва: Наука; 1982.
116. Мэтьюз Дж, Уокер Р. Математические методы физики. Москва: Рипол Классик; 1972.
117. Чаплигін ЄО, Батигін ЮВ, Гнатов АВ, Бондаренко ОЮ, Серіков ГС, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Генератор

багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів. Патент України UA 44933. 2009 жовт. 26.

118. Батигін ЮВ, Аргун ЩВ, Дзюбенко ОА, Гнатов АВ, Чаплигін ЄО, Дробінін ОМ, винахідники; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т, патентовласник. Генератор багаторазових уніполярних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів. Патент України UA 73733. 2012 жовт. 10.

119. Тамм ИЕ. Основы теории электричества. Москва: Наука; 2003.

120. Батыгин ЮВ, Лавинский ВИ, Бажинов АВ. Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов. В: Глущенко ВА, ред. Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития. Тр. междунар. науч.-техн. конф.; 2007 сент. 18-19; Самара. Россия. Самара: СГАУ; 2007. с. 3–13.

121. Батыгин ЮВ, Лавинский ВИ, Сериков ГС, Чаплыгин ЕА. Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей. В: Физические и компьютерные технологии. Тр. 13-й Междунар. науч.-техн. конф.; 2007 апр. 19-20; Харьков, Украина. Харьков: ХНПК «ФЭД»; 2007. с. 352-5.

Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Batygin YV, Sabokar OS, Strelnikova VA. Induction heating. History and development. Application in modern transport repairing technologies. Автомобільний транспорт. 2017;40:75-9.

(Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих ремонтних технологій автомобільного транспорту, пропозиція використання індукційного нагріву як сучасної технології, що нівелює недоліки традиційного ремонтного обладнання)

2. Батыгин ЮВ, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев и магнитно-импульсное притяжение для промышленных технологий современности. Харьков: Лидер; 2019. 162 с. ISBN 978-617-7476-29-9

(Особистий внесок здобувача: формулювання тематики, збір та опрацювання теоретичного матеріалу, оформлення видання)

3. Strelnikova V. Experimental research of induction heating in inner hollow of cylindrical solenoid. European Journal of Engineering Research and Science. 2020;5(8):986-9. doi: 10.24018/ejers.2020.5.8.2053

4. Strelnikova VA, Voronova YM. Electromagnetic metal forming. The relevance and prospects for the use in industry. In: Integration processes and innovative technologies. Achievements and prospects of engineering sciences. Зб. наук. пр. Міжнар. наук-практ. конф.; 2017 Бер. 22; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, 7(2), с. 205-7.

(Особистий внесок здобувача: визначення перспектив застосування електромагнітної формовки металів для ремонтних технологій автомобільного транспорту)

5. Лавінський ДВ, Конкін ВМ, Стрельнікова ВА. Чисельні розрахунки температурного поля у елементах енергетичного устаткування з урахуванням впливу електромагнітного поля. В: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф.; 2019 Квіт. 25-26; Харків; Харків: НТУ «ХП», Вид-во «Лідер»; 2019, с. 66-7.

(Особистий внесок здобувача: участь у розробці ефективного методу аналізу нестационарного температурного поля що виникає у провідних матеріалах під впливом електромагнітного поля)

6. Стрельникова ВА. Сучасні технології ремонту автомобілів з використанням електромагнітної формовки металів. В: Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика. Тези доп. III Всеукр. наук-практ. конф. молод. вч., спец. та асп.; 2017 Травн. 11-12; Маріуполь. Маріуполь: Приазовськ. держ. техн. ун-т, 2017, с. 70-2.

7. Стрельникова ВА. Моделювання процесу індукційного нагріву металів засобами скінченно-елементного аналізу ANSYS. В: Математична підготовка у багатоступеневій системі вищої освіти: погляд студентів і молодих вчених. Матеріали Всеукр. наук-практ. конф. студ. і молод. вч.; 2017 Квіт. 13-14; Харків. Харків: ХНАДУ; 2017, с. 412–4.

8. Batygin YV, Chaplygin EA, Shinderuk SA, Strelnikova VA. The main inventions for technologies of the magnetic-pulsed attraction of the sheet metals. A brief review. Електротехніка і Електромеханіка. 2018;3:43-52. doi: 10.20998/2074-272X.2018.3.06 (*Web of Science*)

(Особистий внесок здобувача: теоретичний огляд існуючих магнітно-імпульсних технологій притягання листових металів, порівняльний аналіз інструментів притягання для виконання виробничих операцій)

9. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 1: Металлы с низкой удельной электропроводностью. Електротехніка і Електромеханіка. 2019;5:40-4. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.07 (*Web of Science*)

(Особистий внесок здобувача: визначення амплітудно-часових залежностей струмів та електродинамічних зусиль в лінійних магнітно-імпульсних інструментах для обробки металів з низькою питомою електропровідністю)

10. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Шиндерук СА, Стрельникова ВА.

Численные оценки токов и сил в линейных инструментах магнитно-импульсного притяжения металлов. Часть 2: Металлы с высокой удельной электропроводностью. Електротехніка і Електромеханіка. 2019;6:39-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.05 (*Web of Science*)

(*Особистий внесок здобувача: визначення амплітудно-часових залежностей струмів та електродинамічних зусиль в лінійних магнітно-імпульсних інструментах для обробки металів з високою питомою електропровідністю*)

11. Batygin YV, Chaplygin YO, Sabokar OS, Strelnikova VA. Analysis of electromagnetic processes in the system “cylindrical solenoid – massive conductor” Електротехніка і Електромеханіка. 2018;1:54-8. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.08 (*Web of Science*)

(*Особистий внесок здобувача: визначення параметрів багатовиткового циліндричного соленоїда в якості інструменту індукційного нагріву, що впливають на амплітуду збуджуваних вихрових струмів у масивному провіднику*)

12. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагріву в сучасних технологіях машинобудування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;4(133):70-4.

(*Особистий внесок здобувача: аналіз виробничих способів нагріву металів, опис альтернативної системи індукційного нагрівання для вирішення задач ремонту та обслуговування автомобільного транспорту*)

13. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА. Індукційне нагрівання тонкої ферромагнітної пластини в полі плоского кругового соленоїда. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017;6:135-140.

(*Особистий внесок здобувача: вирішення фізико-математичної задачі для системи індуктор – тонка ферромагнітна пластина, аналіз отриманих результатів*)

14. Стрельникова ВА. Особенности индукционного нагрева массивных металлических заготовок индукторами с ферромагнитными сердечниками.

Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. 2018;32(1308):99-104. doi: 10.20998/2079-3944.2018.32.17

15. Батыгин ЮВ, Ерѣмина ЕФ, Чаплыгин ЕА, Стрельникова ВА. Электродинамические процессы в инструментах магнитно-импульсного притяжения при прямом пропускании тока через обрабатываемый металл. Вісник НТУ «ХПІ». Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2019;8(1333):207-13.

(*Особистий внесок здобувача: отримання аналітичних залежностей, що дозволяють розраховувати розподіли струмів у перерізі листового металу під дією інструменту магнітно-імпульсного притягання за прямого пропускання струму через оброблюваний метал*)

16. Batygin YV, Yeryomina OF, Shinderuk SO, Strelnikova VA, Chaplygin YO. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. Вісник НТУ «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях. 2020;4(6):3-13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.

(*Особистий внесок здобувача: теоретичне обґрунтування дієвості методу магнітно-імпульсного притягання металів за «прямого пропускання струму» через оброблюваний об'єкт, вирішення крайової електродинамічної задачі для отримання фазових залежностей струмів в експериментальній системі і збуджуваних сил притягання об'єкту обробки*)

17. Батыгин ЮВ, Чаплыгин ЕА, Сабокарь ОС, Стрельникова ВА. Индукционный нагрев во внутренней полости цилиндрического соленоида. Основные соотношения протекающих процессов. Вісник Хмельницького національного університету. 2017;6(255):32-6.

(*Особистий внесок здобувача: розробка моделі індукційного нагріву зубчатих циліндричних заготовок та вирішення електродинамічної задачі для представленої моделі*)

18. Батыгин ЮВ, Сериков ГС, Шиндерук СА, Стрельникова ВА. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов. Електротехніка та електроенергетика.

2019;2:34-42.

(Особистий внесок здобувача: формулювання рекомендацій для подальших розробок схемних елементів джерел живлення для магнітно-імпульсного притягання металів)

19. Батигін ЮВ, Чаплигін ЄО, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. патентовласник. Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом. Патент України № 121597. 2017 Груд. 11.

(Особистий внесок здобувача: розробка формули корисної моделі та опис її функціонування)

20. Батигін ЮВ, Сабокар ОС, Стрельнікова ВА, Шиндерук СО, Чаплигін ЄО, винахідники; Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т. патентовласник. Пристрій індукційного нагріву з магнітним концентратором. Патент України №. 122800. 2018 Січ. 25.

(Особистий внесок здобувача: розробка формули корисної моделі та підготовка документації на отримання патенту)

Додаток Б Акти впровадження результатів дисертації

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Стрельнікової Вікторії Анатоліївни
з теми «Підвищення ефективності електромагнітних технологій ремонту
автомобільного транспорту»
на здобуття наукового ступеню доктора філософії
(274 – Автомобільний транспорт)

Результати дисертаційного дослідження Стрельнікової Вікторії Анатоліївни «Підвищення ефективності електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту» використовувалися у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті в рамках науково-дослідної роботи за держбюджетною темою «Універсальні інструменти безальтернативних електромагнітних технологій ремонту сталевих та алюмінієвих елементів конструкцій автотранспорту (індукторні системи з екраном, що притягає)» (номер державної реєстрації № 0117U002402, 2017-2018 рр.)

Проректор з наукової роботи



І.А. Дмитрієв

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з наукової роботи ХНАДУ

проф. Богомолов В.О.

« ____ » 20 ____ р.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи

Стрельнікової Вікторії Анатоліївни

в навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього
університету

Даним актом підтверджується, що в навчальному процесі за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» при підготовці бакалаврів і магістрів на кафедрі технології машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету використовуються результати наукових досліджень дисертаційної роботи Стрельнікової В.А. «Підвищення ефективності електромагнітних технологій ремонту автомобільного транспорту».

Отримані результати роботи впроваджені в навчальний процес в дисципліну «основи технології виробництва та ремонту автомобілів», а саме розроблено лекцію та практичне заняття за змістовним модулем №5 «Магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів із «прямим пропусканням струму» через об'єкт обробки». Лекція: «Магнітно-імпульсна обробка металів, як ефективний спосіб видалення вм'ятин на автомобільних кузовах» – 2 год. Практичне заняття: «Розрахунок електродинамічних зусиль у індукційній індукторній системі для магнітно-імпульсного притягання» – 2 год.

Завідувач кафедри технології машинобудування і ремонту машин,

д-р техн. наук, професор

М.А. Подригало

ЗАТВЕРДЖУЮ
Кубишкін І.А.
Керівник підприємства
М.П.

дата затвердження



Адреса підприємства

м. Харків
вул. Жлобівська
буд. 94-А

А К Т

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи
Стрельнікової Вікторії Анатоліївни
що виконувалась в Харківському національному автомобільно-дорожньому
університеті

Комісія у складі голови Кубишкіна Ігора Аркадійовича
і членів: інженер(механік) Гегрінова О.В., гл. мастер Синиця В.Ж.
склала цей акт у тому, що результати наукових досліджень, які викладені в
дисертаційній роботі Стрельнікової В. А. прийняті у виробництво, та
плануються до використання на ТДВ "Автодом Харків", а саме:
інструменти індукційного нагріву з феромагнітними сердечниками та
інструменти рихтування на базі «індукторних систем з прямим пропусканням
струму».

Впровадження результатів дисертаційної роботи Стрельнікової В.А.
дозволило підвищити оперативність операцій ремонту, та зменшити
енергозатрати на їх виконання.

Голова комісії

Кубишкін І.А.

Члени комісії:

Гегрінов О.В.
Синиця В.Ж.

Додаток В Результати розрахунків модельного експерименту

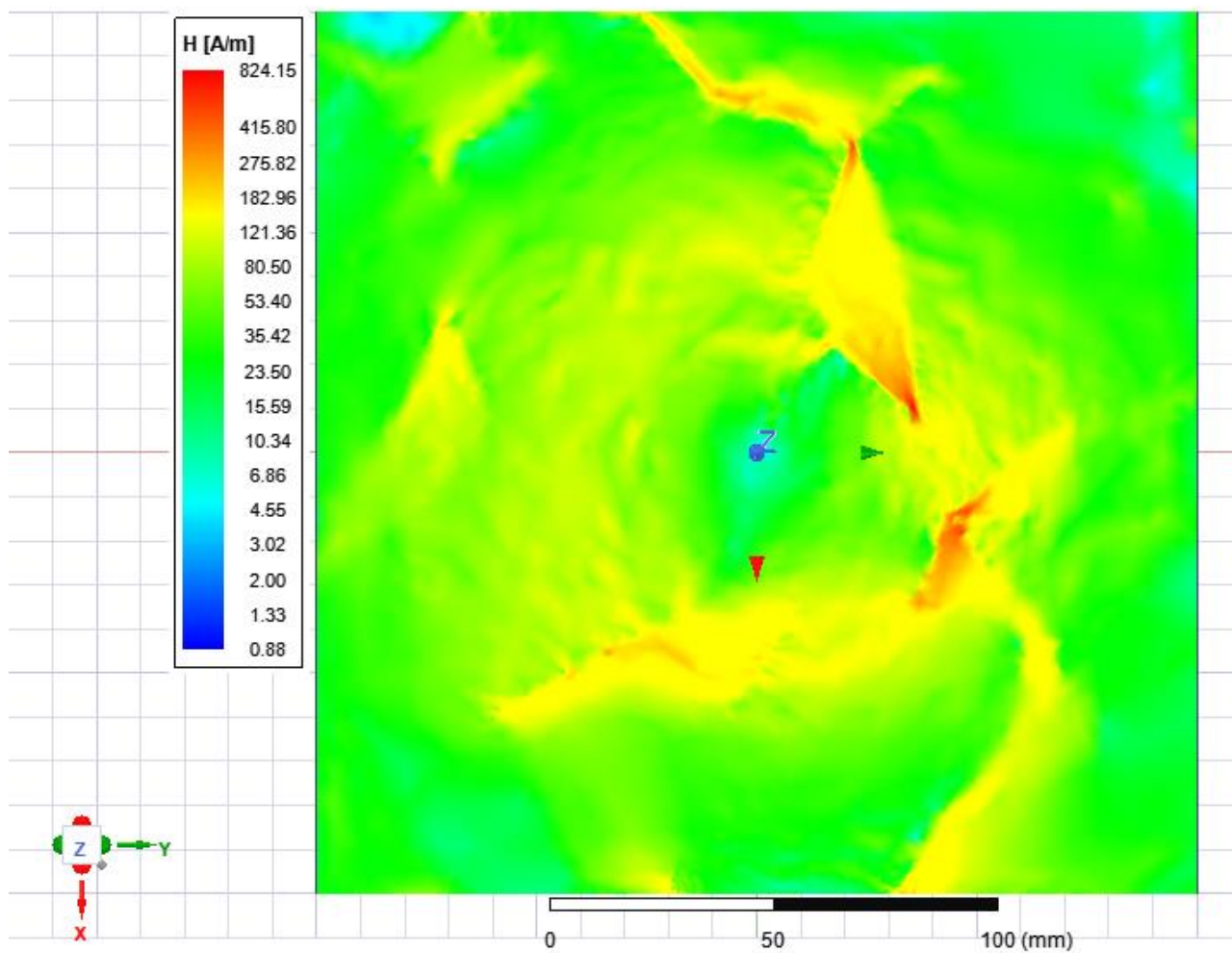


Рис. В.1 – Розподіл напруженості магнітного поля на поверхні заготовки з заліза товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м в полі кругового індуктора без сердечника

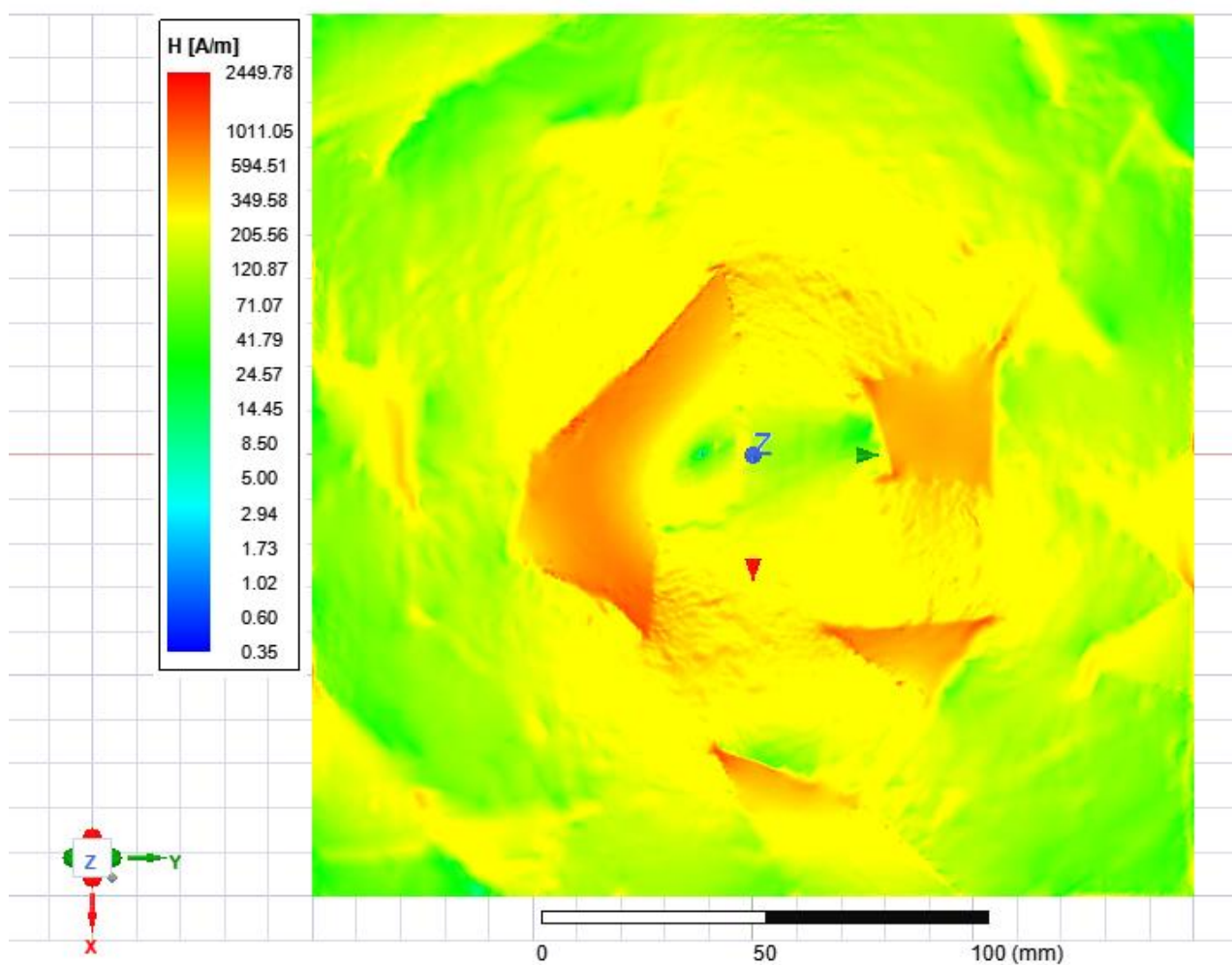


Рис. В.2 – Розподіл напруженості магнітного поля на поверхні заготовки з заліза товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м в полі кругового індуктора з феритовим сердечником

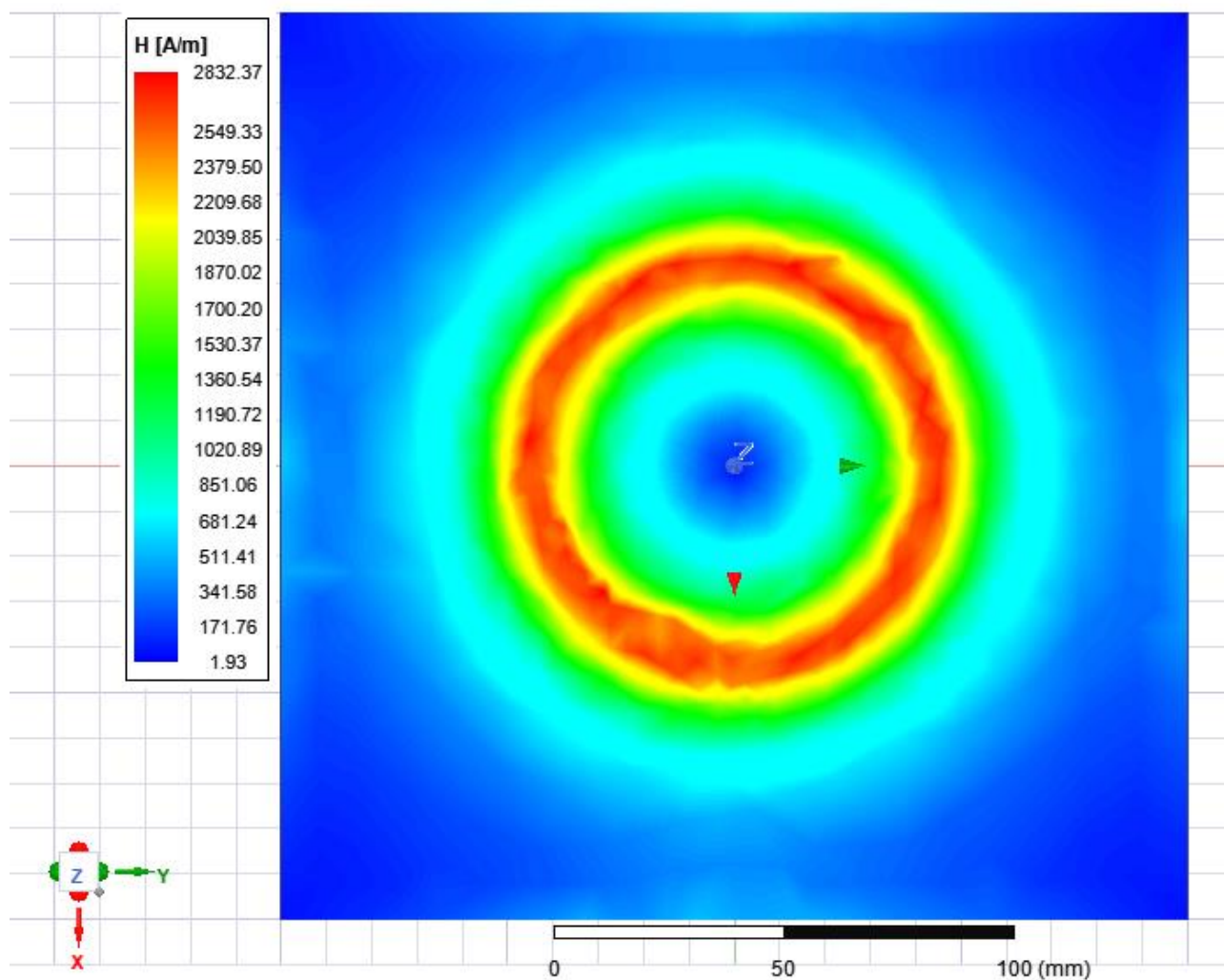


Рис. В.3 – Розподіл напруженості магнітного поля на поверхні заготовки з алюмінію товщиною $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м в полі кругового індуктора без сердечника

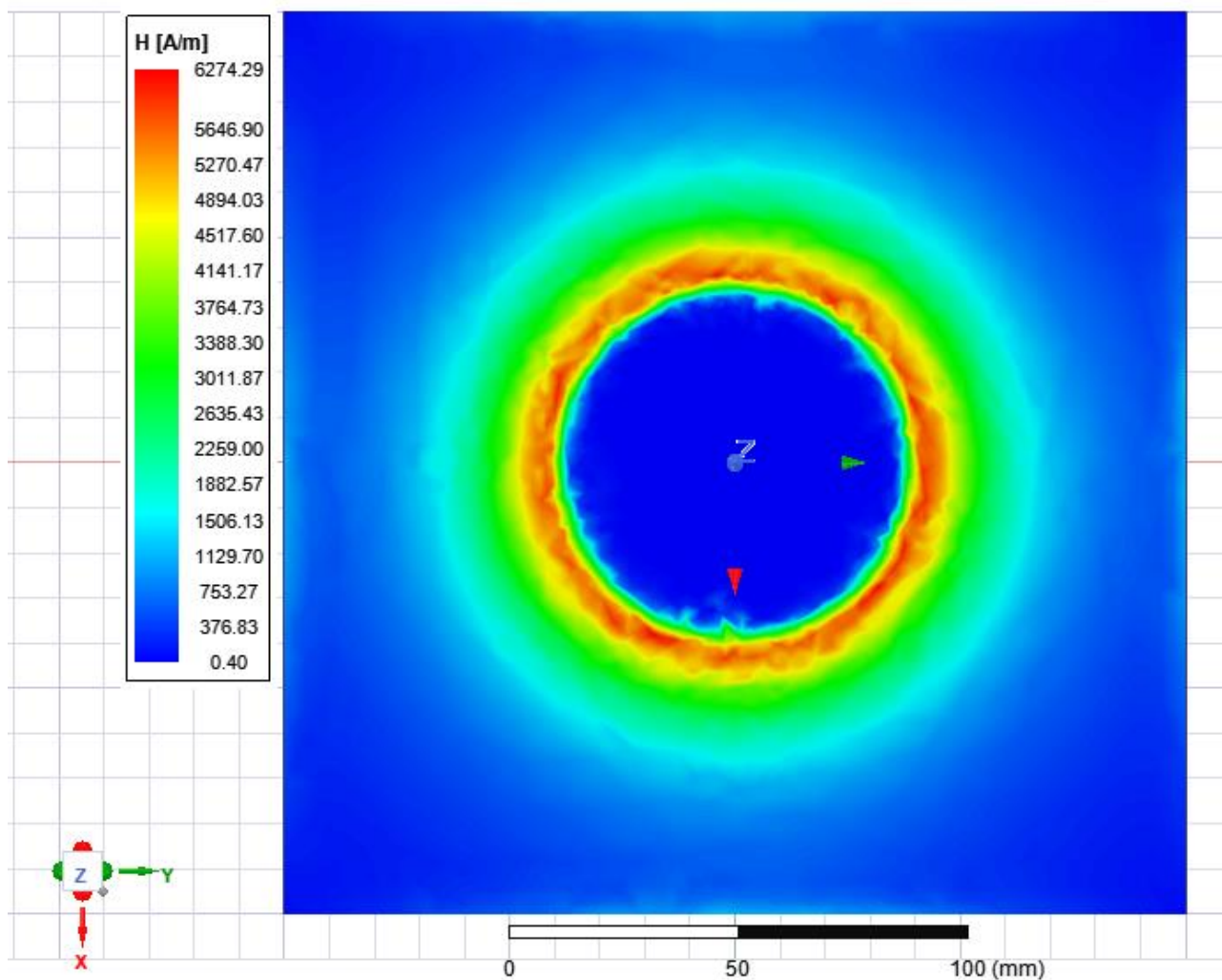


Рис. В.4 – Розподіл напруженості магнітного поля на поверхні заготовки з алюмінію товщиною $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ м в полі кругового індуктора з феритовим сердечником

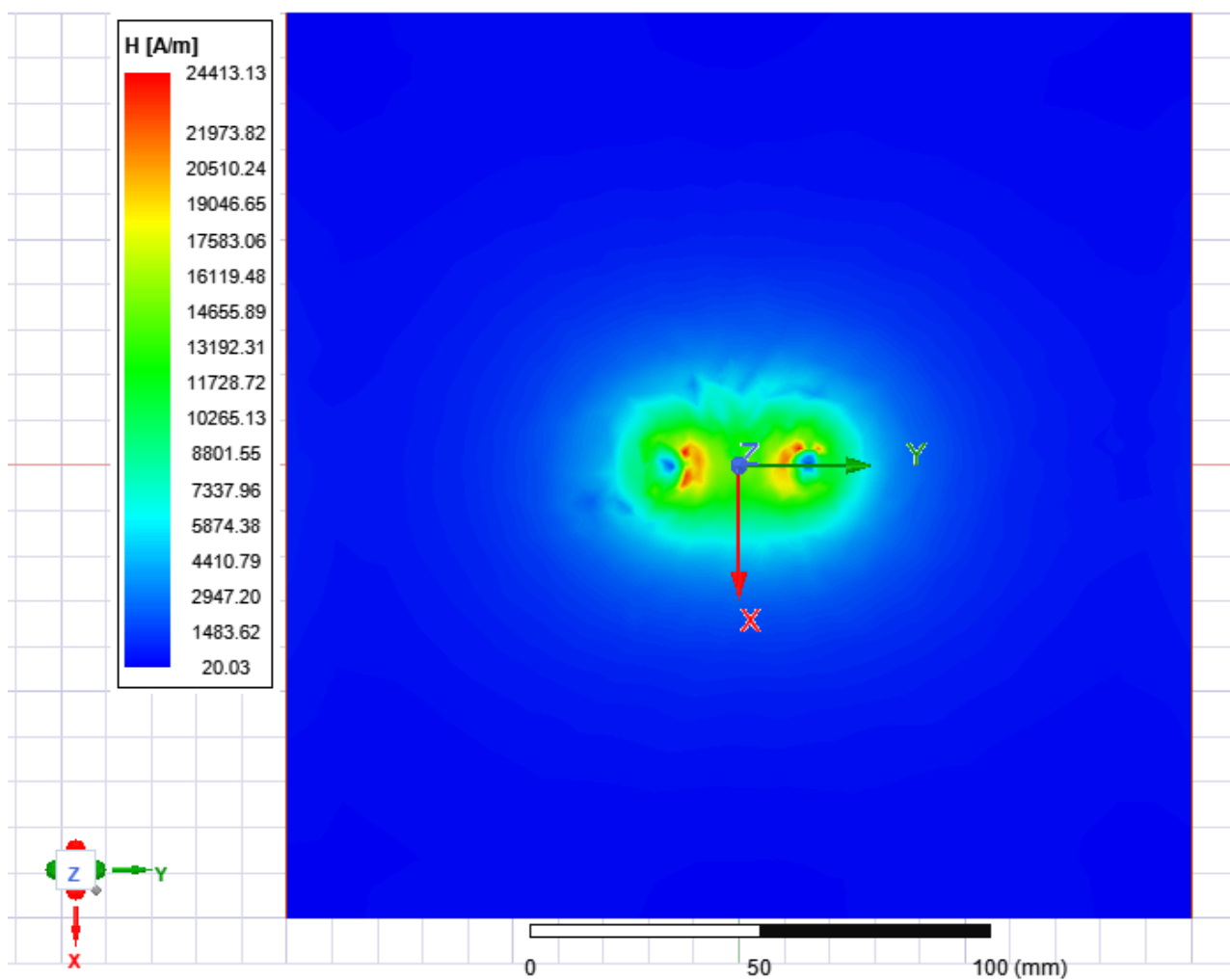


Рис. В.5 – Розподіл напруженості магнітного поля на поверхні заготовки з міді товщиною $\sim 8 \cdot 10^{-3}$ м в полі індуктора з феритовим сердечником П-образної форми

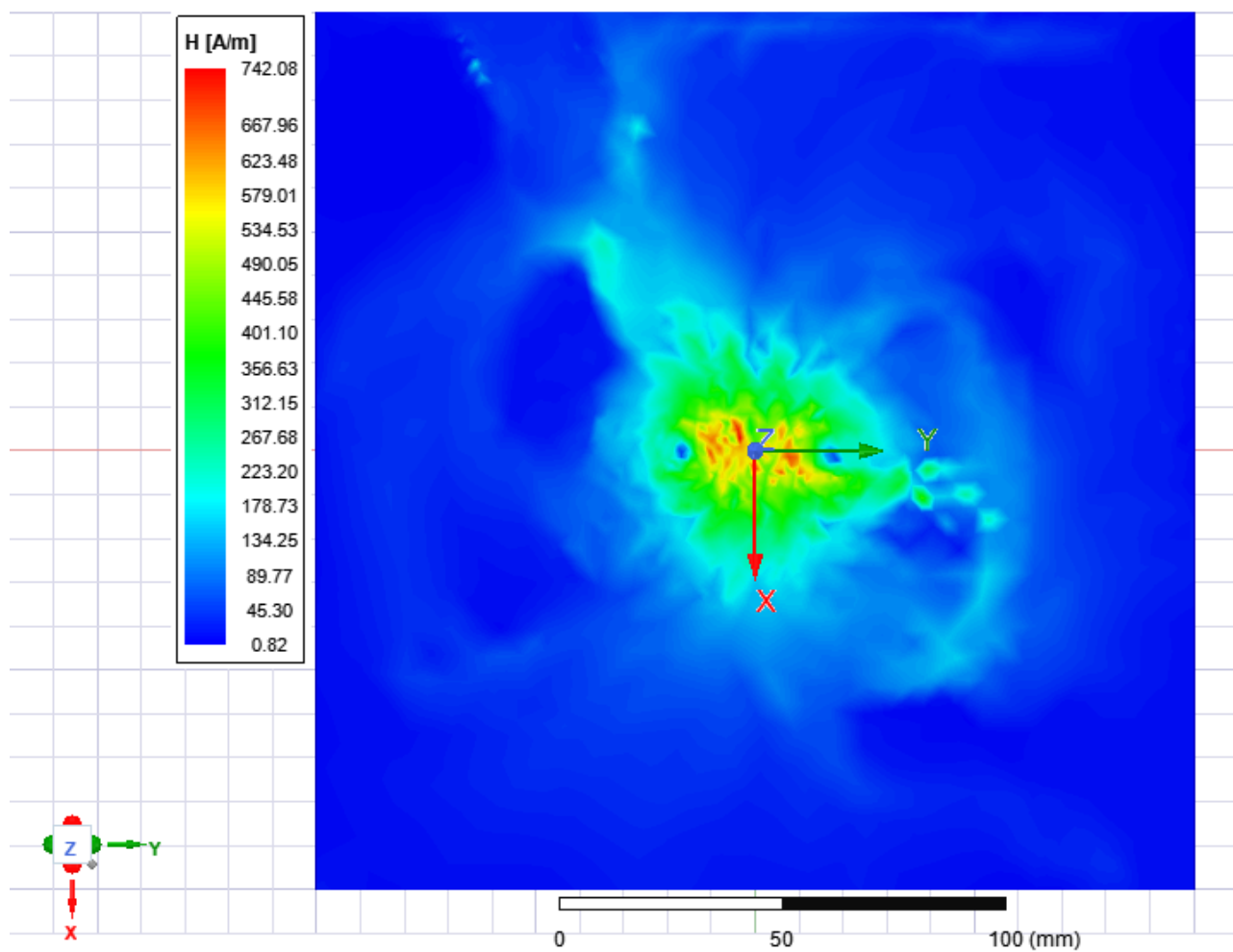


Рис. В.6 – Розподіл напруженості магнітного поля на поверхні заготовки з заліза товщиною $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ м в полі індуктора з феритовим сердечником П-образної форми

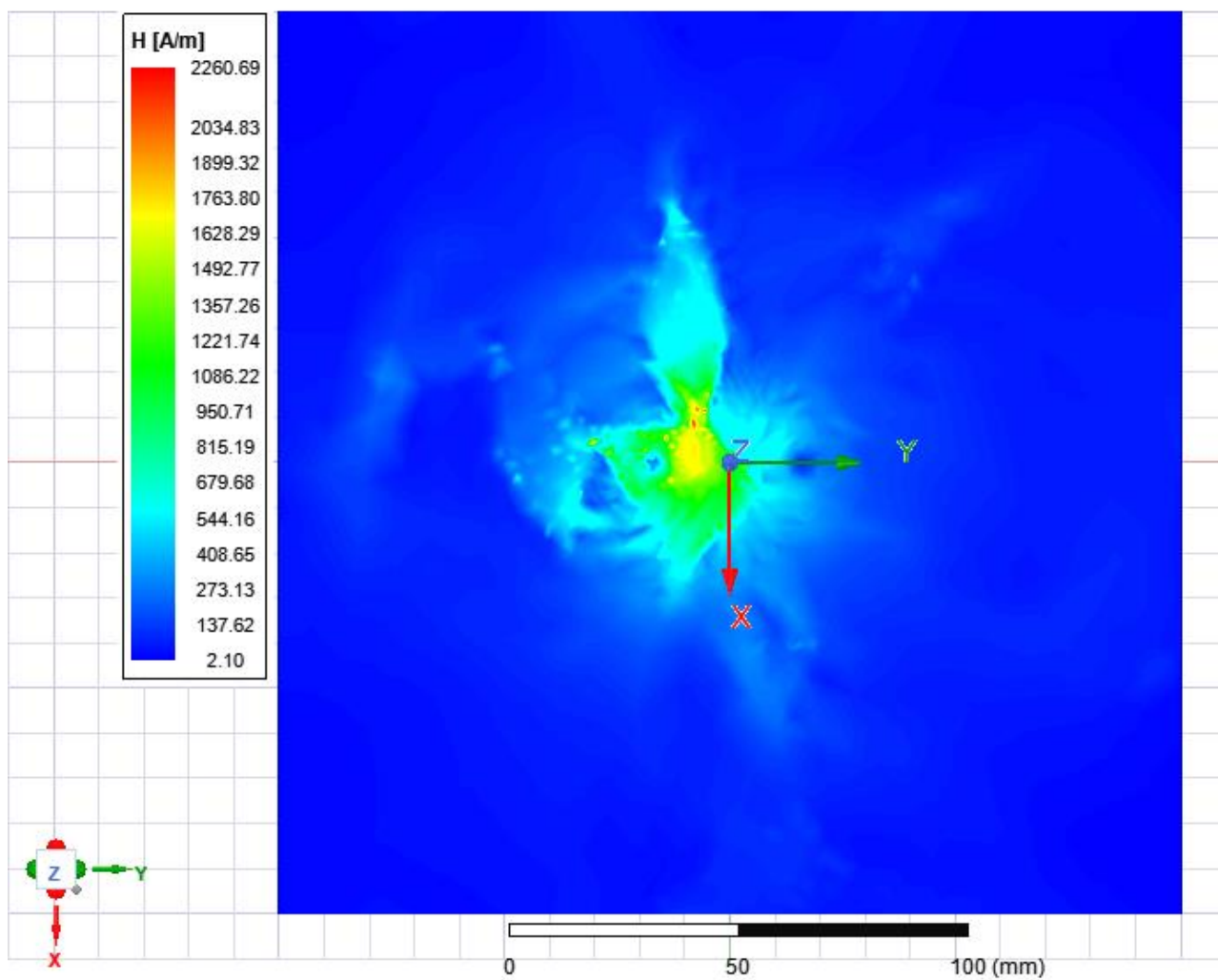


Рис. В.7 – Розподіл напруженості магнітного поля на поверхні заготовки з заліза товщиною $\sim 0,8 \cdot 10^{-3}$ м в полі індуктора з феритовим сердечником П-образної форми