

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

01.11 – КМР. 385 “С” 2021.03.01. 004 ПЗ

ГАЛЬЧИНСЬКИЙ БОГДАН АНДРІЙОВИЧ

2021 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

УДК 631.3:629.083

ПОГОДЖЕНО

Декан механіко-технологічного факультету

В. Братішко

(підпис)

“ ” _____ 2021 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

технічного сервісу та інженерного
менеджменту імені М.П. Момотенка

(назва кафедри)

Роговський І.Л.

(підпис)

(ПІБ)

“ ” _____ 2021 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Удосконалення технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування автомобільних кузовів в АПК

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітня програма: «Автомобільний транспорт»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, професор _____

(підпис)

В.Д. Войтюк

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

Доктор технічних наук, с.н.с.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Роговський І.Л.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Гальчинський Богдан Андрійович

(ПІБ студента)

КИЇВ – 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технічного сервісу та
інженерного менеджменту імені М.П. Момотенка

докт. тех. наук, с.н.с. Роговський І.Л.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

2021 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Гальчинського Богдана Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітня програма: «Автомобільний транспорт»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Удосконалення технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування автомобільних кузовів в АПК

затверджена наказом ректора НУБіП України від "01" березня 2021 р. №385

Термін подання завершеної роботи на кафедру 10.11.2021 року

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи технічні засоби магнітно-імпульсного рихтування автомобільних кузовів в АПК, математична модель, проведення експерименту, прилади вимірювання

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Стані аналіз питання. Мета дослідження.
2. Теоретичне дослідження технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування автомобільних кузовів в АПК.
3. Експериментальні дослідження. Методика проведення.

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання " " 2021 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

Роговський І.Л.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Гальчинський Б.А.
(прізвище та ініціали студента)

НУБІП України

ЗМІСТ

НУВБІП у України

Вступ

Розділ 1 Прогресивні магнітно-імпульсні методи відновлення кузовних елементів автомобілів

1.1 Традиційні методи рихтування

1.2 Ретроспектива відновлювальних технологій із використанням енергії електромагнітних полів

1.3 Індукторні системи з притягуючими екранами, –перспективні технічні засоби магнітно-імпульсного рихтування

1.4 Висновки до розділу

Розділ 2 Особливості процесів у технічних засобах магнітно-імпульсного рихтування листових феромагнетиків

2.1 Індукторна система з притягуючим екраном – технічний засіб рихтування феромагнітних кузовних панелей автомобілів

2.2 Діючі сили при рихтуванні, основні співвідношення

2.3 Чисельні оцінки, які протікають в електродинамічних процесах при рихтуванні

2.4 Вихідні дані

2.4.1 Обчислення індукованих струмів

2.4.2 Розрахунки діючих сил

Висновки до розділу 2

Розділ 3 Технічний засіб рихтування кузовних панелей

3.1 Розрахункові співвідношення для струмів та сил при магнітно-імпульсній рихтуванні

3.2 Чисельні оцінки, основні результати

3.3 Висновки у розділі 3

Розділ 4 Експериментальні дослідження технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування кузовних панелей

4.1 Експериментальне обладнання

4.2 Модельні вимірювання

4.3 Силлові експерименти магнітно-імпульсного рихтування елементів кузовних панелей

Висновки у розділі 4

Висновки

Список використаної літератури

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

Актуальність теми. Технології магнітно-імпульсного рихтування кузовних панелей автомобілів, порівняно з традиційними, завдяки низьким енерго- та ресурсомісткості, а також підвищеній екологічності, знаходять все ширше застосування в практиці, як в Україні, так і за кордоном.

Основним елементом магнітно-імпульсних технологій є так звані індуктори-інструменти – технічні засоби зовнішнього рихтування, за допомогою яких власне і проводиться відновлення пошкоджених панелей кузовних конструкцій автомобілів; в основному це зони з ускладненим або повністю закритим доступом - двері, пороги, арки, коробка і т.п. Саме тому розробка нового технічного засобу, який дозволить підвищити ефективність ремонту кузовів автомобілів, є нагальною.

Окремо слід відзначити один з основних факторів - відмінну особливість магнітно-імпульсних методів рихтування - це відсутність механічного контакту з об'єктом обробки, оскільки трансформація енергії поля в механічну роботу відбувається в металі кузовної панелі, що рихтується. При цьому захисне лакофарбове покриття залишається неушкодженим, і саме цей фактор набуває особливої значущості, якщо вм'ятина є не глибокою.

У магістерській роботі виконано низку досліджень та розробок щодо підвищення ефективності методу зовнішньої безконтактною рихтування кузовів легкових автомобілів, зокрема щодо розробки та вдосконалення інструментів для виконання операцій зовнішньої рихтування. Це конструкції індукторної системи з притягуючим екраном як інструменту рихтування, який дозволяє суттєво підвищити ефективність процесу магнітно-імпульсного рихтування.

Мета та завдання дослідження. Метою магістерської роботи є вдосконалення технічних засобів рихтування на основі методів магнітно-імпульсного впливу, що дозволяють підвищити ефективність ремонту кузовів автомобілів агропромислового комплексу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– провести аналіз як традиційних методів рихтування, так і прогресивних магнітно-імпульсних методів відновлення кузовних панелей автомобілів;

– запропонувати рішення щодо конструктивного виконання технічного засобу зовнішньої безконтактної рихтування – «індукторна система з притягуючим екраном», що збуджується полем двох кругових витків; провести чисельні оцінки протікають при рихтуванні;

– провести експериментальну апробацію розроблених конструкцій технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування елементів кузовних панелей автомобілів та узагальнити отримані результати.

Об'єкт дослідження - Електромагнітні процеси зовнішнього рихтування кузовних панелей автомобілів у АПК.

Предмет дослідження - Вдосконалення технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування.

Методи дослідження. Проведення теоретичних досліджень електромагнітних процесів за допомогою математичного апарату теорії електромагнітного поля, вирішення поставлених крайових завдань аналітичними методами математичної фізики з подальшою комп'ютерною обробкою отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше визначено закономірності протікання електродинамічних процесів у технічних засобах із притягуючим екраном з урахуванням впливу магнітних властивостей металу, що дозволяють реалізувати операцію зовнішньої рихтування листового металу з будь-якими фізичними властивостями при зниженні рівня енергетичних витрат;

– удосконалено метод зовнішньої магнітно-імпульсного рихтування кузовних панелей автомобілів заснований на використанні індукторної системи з притягуючим екраном з додатковим джерелом магнітного поля, що дозволяє підвищити ефективність силового впливу;

– отримали подальший розвиток методи дослідження електромагнітних процесів у технічних засобах магнітно-імпульсного силового впливу,

– індукторних системах з притягуючим екраном та додатковими витками, які збуджують додаткове магнітне поле;

– отримали подальший розвиток принципи та методи створення технічних засобів для зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування кузовних панелей автомобілів, конструктивними особливостями яких є додатковий екран, що притягує, і додаткові кругові соленоїди, що дозволяють підвищити

ефективність процесу рихтування;

Практичне значення одержаних результатів полягає у наданні суб'єктам ринку ремонтних технологій та відповідного обладнання як принципово нових, так і вдосконалених прогресивних та ефективних методів

відновлення кузовних панелей автомобілів АПК, зокрема, технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування пошкоджених кузовних панелей виготовлених як з феромагнітних, так і з неферомагнітних металів.

Практична значимість результатів магістерської роботи полягає також у створенні теоретичної та експериментальної бази для подальшого розвитку

прогресивних методів та технічних засобів зовнішньої магнітно-імпульсного рихтування пошкоджених кузовних панелей автомобілів

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 1

ПРОГРЕСИВНІ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІ МЕТОДИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КУЗОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМОБІЛІВ АПК

1.1 Традиційні методи рихтування

Наразі розробки різного роду технічних систем для вирівнювання заданих ділянок на поверхні тонкостінних листових металів ініційовані в основному попитом на виробничі операції з реставрації корпусів літаків та кузовних панелей автомобілів.

У першому випадку необхідність такої операції обумовлена порушенням аеродинамічних характеристик літального апарату, аж до втрати стійкості в польоті, у другому не тільки естетичними міркуваннями, але і неможливістю подальшої експлуатації засобу транспорту з пошкодженим кузовом.

На європейському ринку обладнання для рихтування та відновлення автомобільних кузовів лідируючу позицію займає концерн Betag Innovation (головний офіс у Швейцарії, філії в Німеччині, Чехії, Австралії) [13-20].

У переліку пропонованих розробок міститься досить великий ряд механічних пристроїв для зовнішньої рихтування вм'ятин [13-16]. Серед них виділяються витяжні пристосування, загальними конструктивними елементами яких є витягуючий елемент - стрижень, одним кінцем приварений або приклеєний до металу по центру вм'ятини, що усувається, і важільний механізм, що дозволяє поступове витягування вільного кінця стрижня до рівня реставрованої поверхні рис. 1.1. Після усунення вм'ятини зварене або клейове

приєднання забирається. Відреставрована поверхня піддається обробці відповідно до традиційної технології. Остання операція - це нанесення захисного лакофарбового покриття [21-25]



Рис. 1.1 – Механічні витяжні пристрої для зовнішнього усунення вм'ятин

Робота з механічними витяжними пристроями потребує високої кваліфікації та майстерності виконавця. Але навіть у цьому випадку практично неможливо забезпечити достатню надійність виконаної операції в сенсі збереження елемента, що ремонтується. Останнє зауваження означає, що в процесі реставрації можливе його руйнування.

До традиційних та історично добре відомих способів рихтування відноситься вибивання листового металу за допомогою молотка та підтримки рис. 1.2, тобто. вирівнювання деформованих ділянок методом видавлювання та вибивання (виправлення) увігнутої ділянки до надання йому правильного радіусу кривизни і при необхідності наступної рихтуванням видавленої поверхні. Прийоми вибивання залежать від глибини вм'ятини і сили напруг, що виникають у металі. Застосування цих методів можливе лише за умови доступного підходу до вм'ятини з обох сторін, тобто. потрібно зняття частини обшивки під ділянкою, що підлягає ремонту. Якщо після витягування вм'ятини на поверхні металу залишаються нерівності, їх заповнюють пластичною масою.

[26-29].



Рис. 1.2 Традиційні інструменти рихтування листового металу

Останнім часом з'явилася інформація про рихтування із застосуванням нагріву [19, 24, 26-29]. Сутність термічного способу полягає в тому, що ділянка панелі, що нагрівається, в процесі теплового розширення зустрічає протидію з боку навколишнього холодного металу, і, збільшувачись в поперечному напрямку, зменшується в поздовжньому, тобто в площині панелі. У процесі остигання відбувається подальше зменшення опуклості за рахунок того, що нагріті ділянки, охолоджуючись, стягують нагріту частину панелі. Нагрівання здійснюють у напрямку від країв опуклості до її середини ільмами або смугами при заданій високій температурі рис. 1.3 [19].



а – зовнішній вигляд; б – інструмент у дії

Рис. 1.3 – Пристрій Hotbox для рихтування кузовних панелей за допомогою локального нагріву

Не можна залишити без уваги і існування вакуумної рихтування кузовів з використанням спеціальних вакуумних присосок (рис. 1.4 [30]). Слід застосування даної техніки доцільно виключно на великих плоских вм'ятиних діаметром більше 15...20 см. Вакуумні присоски та правильна техніка розслаблення місць напруги дають можливість значно зменшити розмір пошкодження, але потребує подальшого доопрацювання до ідеального стану спеціальними інструментами [31]. Таким чином, повністю видалити велику вм'ятину за допомогою вакууму практично неможливо.



Рис. 1.4 – Вакуумне рихтування кузова рихтувальною пневмоприсоскою

На сьогоднішній день існують альтернативні методи видалення вм'ятин які використовують спеціальні апарати, так звані спотер (рис. 1.5, що дозволяють рихтувати закриті порожнини автомобілів (пороги, арки задніх крил та інші) без пошкодження деталі та розбирання [19, 32]. Але залишається необхідність подальшої шпаклівки і фарбування деталі, що ремонтується, що також є досить серйозним недоліком цього методу.

Останнім часом з'явився новий метод видалення вм'ятин без фарбування Paintless Dent Repair (PDR) (рис. 1.6 [33, 34]. Це стало можливим завдяки розробці та активному впровадженню в автомобільній промисловості лакофарбових покриттів на основі полімерних сполук.

Одним з основних недоліків даного методу є необхідність доступу до внутрішньої сторони деталі, що ремонтується, тобто, залишається необхідність у розбиранні автомобіля.



а – GYS SPOT 2400 (IMS SPOT 17/2); б – апарат точкового зварювання 220В WS6; в – Digital Plus 5000 (380 В)

Рис. 1.5 Спотери



Американськими інженерами запропоновано цілу низку альтернативних способів видалення вм'ятин з металевих конструкцій. Так, [35, 36] описаний спосіб видалення вм'ятин за допомогою магніту (електромагніту). Його суть полягає в тому, що до місця з вм'ятиною на металі підносять магніт (електромагніт), а з протилежного боку (зі зворотного боку пошкодженої ділянки листового металу) підносять металевий об'єкт (кулька, ролик, масивну металеву підкладку) який має хороші магнітні властивості. Магніт, притягуючи металевий об'єкт, видалляє вм'ятину. У патенті [37] запропоновано комплекс з видалення вм'ятин з кузовів автомобілів, в основу якого покладено суміщення гідравліки з електромагнітом. У патенті [38] описаний пневматичний спосіб та

обладнання для видалення вм'ятин з кузовів автомобілів.

1.2 Ретроспективи відновлювальних технологій з використанням енергії електромагнітних полів

Як показує практика, більше 50% пошкоджень є вм'ятини в зонах із утрудненим або повністю закритим зворотним доступом. Це різні корпусні елементи, крила, фюзеляжі літаків, двері, капоти, покрівлі, пороги, автомобілів і т.д. [22, 26-29, 39].

У зв'язку з цим особливий інтерес представляють системи, принцип дії яких заснований на використанні енергії імпульсних електромагнітних полів і дозволяють проводити реставрацію пошкоджень (вм'ятин) на поверхні із зовнішнього боку без розбирання корпусу або кузова і, по можливості, без порушення захисного покриття, що існує [40-43].

Достовірність сказаного вище не вимагає підтвердження спеціальними посиленнями на першоджерела. Доказом тому є добре відомі не лише фахівцям розробки концерну «Boeing Company», які впроваджуються в авіапромисловість США протягом уже понад 40 років, а також і європейських фірм (з численними філіями по всьому світу), що спеціалізуються на ефективному устаткуванні для ремонту сучасних автомобілів.

У першу чергу, до найпростіших систем такого типу можна віднести, наприклад, розробки з «прямим пропусканням» струму через метал, що обробляється. Так автори патенту [44] описують спосіб, принцип дії якого заснований на взаємодії паралельних струмів (закон Ампера), відповідно до якого провідники з однаково спрямованими струмами притягуються один до одного, що лежить в основі усунення деформацій.

Якщо говорити про механічні аналоги даного пристрою, то найбільше. Повертаючись до історії, вперше ідея використання електричної енергії і магнітного поля для виробничих цілей була висловлена радянським академіком, одним із засновників фізики сильних магнітних полів Петром

Леонідовичем Капіней в 1920 р [45, 46]. Він звернув увагу на появу потужних електродинамічних сил в електротехнічних установках, які тоді використовувалися для досліджень фізичних властивостей матеріалів при впливі сильних електромагнітних полів [47]. Де сучасних сфер застосування сильних імпульсних магнітних полів можна віднести: імпульсні прискорювачі плазми, сильноточні газорозрядні джерела світла, прискорювачі заряджених частинок для ядерних досліджень, високі електрофізичні методи, такі як магнітно-імпульсна обробка металів; практичне використання ефектів електричного вибуху провідників великими імпульсними струмами та інші [48].

Історично та хронологічно, «піонером» у галузі створення технічних систем для зовнішнього усунення вм'ятин у листових провідниках можна вважати Сполучені Штати Америки [30, 49-56].

Одне з перших, і без перебільшення можна сказати основних, пропозицій щодо створення пристроїв магнітно-імпульсного тяжіння металів було сформульовано у пагені Н. Furth [49].

Розглядалося два варіанти вирішення проблеми рис. 1.8. Перший, крім основного багатовиткового соленоїда, припускав введення додаткового розімкнутого витка рис. 1.8, в, розміщеного над вм'ятиною в тонкому металевому листі. За задумом автора, основним соленоїдом збуджується магнітне поле, що повільно наростає, і при певній різниці потенціалів на межах розрізу в розімкнутому витку, повинен відбутися електричний пробій проміжку, після чого виток стає короткозамкненим. Протікаючий в ньому струм збуджує магнітне поле, що швидко наростає, напрямок якого протилежно полю основного соленоїда.

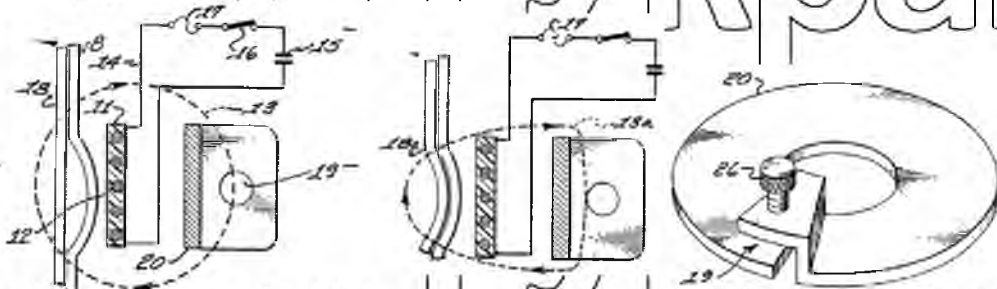




Рис. 1.8 – Загальний вигляд схеми винаходу Н.Furth

Поле витка та поле соленоїда взаємно знищуються. Поверх металу з вм'ятиною, де результуюча напруженість перетворюється на нуль. Поле основного соленоїда, що проникло і залишилося під металом, що обробляється, створює тиск, спрямоване до індуктора. Під його дією відбувається вирівнювання деформованого металу [21].

Фізична сутність цієї пропозиції зводиться до збудження магнітних полів з різними часовими характеристиками. «Повільне» проникає крізь об'єкт, що обробляється - тонкий листовий провідник.

"Швидке" магнітне поле не може проникнути, його призначення полягає в тому, щоб знищити поле над листом з вм'ятиною. В результаті «повільне» магнітне поле реалізує магнітно-імпульсне тяжіння металу, що обробляється, до індуктора.

Другий варіант із фізичної сутності не відрізняється від першої пропозиції. Відмінність полягає у способі отримання «повільного» та «швидкого» полів. Тут автор пропонує використовувати два окремих джерела потужності (батареї імпульсних конденсаторів) з різними часовими характеристиками струмів, що генеруються. Взаємодія полів, що збуджуються в зоні обробки призводить до превалювання сил магнітного тиску на метал знизу над тиском зверху. Об'єкт обробки притягується до індуктора.

Працездатність можливих технічних реалізацій за пропозиціями Н.Furth є дуже сумнівною. Як наслідок, його патент не знайшов свого практичного втілення, хоча автори наступних пізніших і вдалих проектів посилаються на нею, як у першоджерело у напрямі розвитку систем для магнітно-імпульсного тяжіння.

До таких відносяться, наприклад, винаходи інженерів «Boeing Company»

К. Hansen, I. Hendrickson, P. Zieve та ін [50-53]. Слід наголосити, що фізична сутність цитованих розробок принципово не відрізняється від фізичної сутності заявки Н.Фурти. Тут також йдеться про суперпозицію «повільного» та «швидкого» полів, але тепер уже автори говорять про накладення низькочастотного та високочастотного сигналів в обмотці технічного засобу – індуктора.

Двохчастотні системи для магнітно-імпульсного гтяжіння знайшли практичне застосування у роботах з реставрації корпусів літаків рис. 1.9.



а, б – розробка фірми "Electroimpact";

в, г – обладнання, що пропонує компанія «Fluxtrepic»

Рис. 1.9 - Системи магнітно-імпульсного усунення вм'ятин в елементах

літальних апаратів

НУБІП України

У подальшому на базі цих розробок з корпорації Boeing Company виділилися фірми Electroimpact і Fluxtronic (США), що спеціалізуються саме на магнітно-імпульсних технологіях з тяжіння металів [54, 55].

НУБІП України

Загальними недоліками систем магнітно-імпульсного тяжіння, заснованих на суперпозиції низької та високої частот (як струмів, так і полів), є:

- наявність двох джерел енергії (магнітно-імпульсних установок),
- складність необхідної сильноточної електроніки,
- великі витрати на необхідні комплектуючі (як мінімуму 2 рази більше порівняно з традиційними магнітно-імпульсними системами),
- низька надійність в експлуатації плюс досить висока собівартість кінцевого продукту.

НУБІП України

Значно більш цікавими для практики зовнішнього усунення вм'ятин в автомобільних кузовах з феромагнітних сплавів є пропозиції концерну «Betag Innovation», названі як «Магнітний пристрій для видалення вм'ятин» рис. 1.10 (в оригіналі - "Magnetic Dent Remover") [17-19].

НУБІП України

НУБІП України



а – джерело потужності з інструментом, б – пристосування в дії

Рис. 1.10 – Магнітне пристосування для видалення вм'ятин

"Betag Innovation"

НУБІП України

У заявках на патенти [17, 18], поданих у різний час (2006р, автор – R. Meichtry, 2008р, автори – R. Meichtry та I. Koiba), практично, заявлені одні й

ті самі позиції.

В цілому, це пристрій для видалення вм'ятин в листових феромагнетиках, що містить емісійні нагнітачі енергії, робочий інструмент (виносний індуктор) і, так звані, адаптерні пристрої, призначені для фіксації робочого інструменту над вм'ятиною, що видаляється.

Істотною практичною новизною тут володіють лише спосіб виготовлення багатовиткової робочої котушки інструмента-індуктора та адаптерні пристрої.

Виносний індуктор – це мобільний інструмент, під'єднаний до джерела потужності гнучким кабелем, описаний у патенті [57].

Принцип магнітно-імпульсного тяжіння тонкостінних листових металів у патентах [17, 18] запозичений із робіт, частина з яких була виконана на замовлення концерну «Betag Innovation», у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» у 2002-2003рр. [58-60].

Головним фактором, що забезпечує трансформацію відомого відштовхування оброблюваного об'єкта в тяжіння, тобто забезпечує працездатність систем, названих в цитованих патентах як «Магнітне пристосування для видалення вм'ятин», є вибір робочих частот діючого поля.

Ефект тяжіння можливий лише в низькочастотному режимі, коли

$$\omega \ll \frac{1}{\mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2}, \quad (11)$$

f – робоча частота; μ_0 – магнітна проникність вакууму; γ – питома електропровідність металу, d – товщина металу.

Умова низькочастотного режиму як процитованої нерівності вписано з роботи [61]. Воно ж зафіксовано у патенті [59]. Ця формула, що регламентує вибір частотного діапазону діючих полів фігурує в патентах R.Meichtgy і I.Kouba [16, 17].

В даний час «Магнітний пристрій для видалення вм'ятин» так само, як і широкий перелік механічних пристроїв, пропонуються авторемонтним компаніям концерном «Betag Innovation» на сторінках їхнього фирмового сайту

[19]

До переваг магнітно-імпульсних розробок концерну Betag Innovation у порівнянні з реальними аналогами, пропонованими американськими виробниками Boeing Company, Electroimpact і Fluxtronic (США), слід віднести:

- наявність одного джерела потужності замість двох,
- відсутність складної сильноточної електроніки, необхідної для синхронізації у разі двох джерел,
- істотно менший перелік комплектуючих та значно менша собівартість готового виробу.

До основних недоліків обладнання «Магнітний пристрій для видалення вм'ятин» концерну «Betag Innovation» слід віднести:

- застосування в якості інструменту багатовиткової кстушки, яка, судячи з опису в патентах, що цитуються, досить складна у виготовленні і, як показав весь практичний досвід магнітно-імпульсного обробки металів (МНОМ), недовговічна в експлуатації;
- можливість роботи тільки з феромагнетиками (окремі сталеві композиції), та неможливість усунення вм'ятин у немагнітних металах (алюмінієві сплави та ін.);

- принцип дії заснований на застарілих до теперішнього часу висновках перших науково-дослідних пошукових робіт 2003-2004 рр., які не дозволяють достатньою мірою реалізувати всі позитивні можливості магнітно-імпульсного тяжіння (надалі будуть висвітлені ефективніші пропозиції – наслідки авторських досліджень електрофізичної природи електромагнітної природи процесів).

Проблема тяжіння заданих ділянок листових металів за допомогою силового впливу з боку електромагнітних полів може бути вирішена і з використанням інших технічних рішень, висунутих у різний час різними

авторами. Так, наприклад, у роботі [61] запропонована схема роздачі порожнистих труб зовнішнім магнітним полем, тимчасова конфігурація якого передбачає змінну дію стискаючих та розширювальних електродинамічних

зусиль. Усередині труби розміщується жорстка оправка, що механічно перешкоджає її стиску. Ступені свободи у розширенні призводять, зрештою, до роздачі порожнистої труби відповідно до виробничого завдання.

Щонайменше, науковий інтерес представляють різні варіації способу, описаного в монографії Г. А. Шнеерсона [20], і полягає в створенні магнітного поля, що повільно наростає, різко переривається при досягненні заданого рівня напруженості. В результаті над об'єктом поля, що обробляється, немає, а під ним є (проникне). Виникаючі електродинамічні зусилля притягують до індуктора задану ділянку металу, викликаючи деформування. Незважаючи на «прозорість» даної пропозиції, інформація про будь-які його практичні реалізації в науковій періодиці відсутня.

Слід зазначити, що фізична сутність повільного наростання з наступним перериванням магнітного поля, що діє, зводиться до принципу дії двочастотних магнітно-імпульсних систем, запропонованих і створюваних до теперішнього часу американськими виробниками відповідної апаратури.

Роботи зі створення обладнання та інструментів для магнітно-імпульсного тяжіння, заснованих на інших фізичних концепціях, розпочалися в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут». В даний час ці роботи продовжені та ведуться також у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті, де при кафедрі фізики створено спеціалізовану науково-дослідну лабораторію електромагнітних технологій [22-25, 48, 62-65].

Перші розробки пристроїв магнітно-імпульсного тяжіння були засновані на створенні просторово-часового розподілу полів, що діють, в індукторній системі, що забезпечує нуль магнітного потоку в просторі між тонкостінними листовими металами. Інструменти такого принципу дії назвали авторами пропозиції «складними індукторними системами». Сутність пропозиції полягає у наступному. Між двома джерелами магнітного поля (наприклад, плоскими соленоїдами) поміщаються два листові метали. Варіювання амплітуд зовнішніх

полів відповідно до електрофізичних характеристик металів дозволяє отримати нуль магнітного потоку в просторі між ними. За рахунок сил тиску, що діють з боку соленоїдів, листові метали зазнають взаємного тяжіння [66].

Результати теоретичних та експериментальних досліджень електромагнітних процесів у «складних індукторних системах» описані у публікаціях [61, 66].

Резюмуючи перші спроби трансформувати природне магнітно-імпульсне відштовхування в «штучне» тяжіння за допомогою «складних індукторних систем», слід зазначити, що як інструменти для тяжіння вони не знайшли практичного застосування. Їх використання виявилось доцільним для штампування малюнка друківаних плат в електротехнічних пристроях та для холодного зварювання металевих елементів збірних конструкцій (при зустрічному русі швидкість зіткнення зростає майже в 2 рази) [61].

Найбільш перспективними для магнітно-імпульсного тяжіння листових тонкостінних металів слід вважати розробки, розпочаті в 2002р. та проведені до теперішнього часу [22-25, 48, 53, 61-67].

Наступним етапом у появі новітніх можливостей для створення пристроїв із зовнішнього усунення вм'ятин у кузовах легкових автомобілів стало явище, експериментально виявлене у 2004р. професорами Національного Технічного Університету "Харківський політехнічний інститут" Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хименко Л.Т. [58]. Його суть полягає в тому, що при частотах діючих полів нижче 2 кГц мало місце тяжіння з утворенням вм'ятини тонкої сталеві пластили робочій поверхні індуктора-інструменту. При збільшенні частоти до 7 кГц і вище зразок відштовхувався з утворенням опуклості згідно з традиційними уявленнями про процеси МІОМ.

Виявлене явище на підставі загальних фізичних міркувань і розуміння процесів, що відбуваються, на рівні того часу дозволило запатентувати «Спосіб магнітно-імпульсного обробки тонкостінних металів» [59], який відрізняється від відомих аналогів тим, що для тяжіння заготовлі до індуктора при використанні одного джерела імпульсного поля вибирається із умови

низькочастотності (1.1). Тут була зафіксована геометрія можливих форм індуктора-інструменту. Це міг бути масивний одновитковий соленоїд звичайної циліндричної геометрії, а міг бути і масивний одновитковий соленоїд з внутрішнім отвором у вигляді усіченого конуса. Розміри внутрішнього вікна соленоїда визначали розміри ділянки листової заготовки, що притягується.

В цей же час авторами роботи [60] були сформульовані фізичні основи перспективних напрямів розвитку магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів та запатентовано інше рішення щодо магнітно-імпульсного тяжіння, принцип дії якого заснований на силовій взаємодії провідників з однаково спрямованими струмами (закон Ампера) [44] 68].

Надалі, запатентований в [44] «Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів», як перша пропозиція такого роду, ліг в основу створення «індукційних індукторних систем» (ІС), різного конструктивного виконання [69-76].

Основні три-екладові ІС укладаються паралельними шарами ізольовано один від одного: «екран – індуктор – листова заготовка». Остання розміщується так, щоб ділянка, що підлягає деформуванню, знаходилася в робочій зоні системи (область внутрішнього отвору витка) [23, 48, 64].

Необхідно наголосити на обов'язковій умові практичної працездатності індукційних індукторних систем. Як випливає з фізичного осмислення закону Ампера (у зв'язку з тиском на провідник у магнітному полі), силова взаємодія між плоскими провідними листами, в металі яких збуджуються однаково спрямовані індуквані струми, можливе лише в режимі інтенсивного проникнення електромагнітного поля індуктора через ці листи. Тільки в цьому випадку, при нульовому полі між ними, виникають сили магнітного тиску ззовні, що зумовлюють їхнє взаємне тяжіння.

Принциповим та загальним у запропонованих інструментах магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів є вимога низьких робочих частот діючих полів (1.1) Як показали подальші дослідження, це діапазон 1...2 кГц та

нижче [22-25, 77, 78].

Далі, для роботи інструменту необхідне джерело потужності. У спеціальній літературі - це магнітно-імпульсна установка (МІУ) [64, 79-82].

У цій частині є свої особливості та вимоги.

По-перше, ні жорсткої вимоги малості власної індуктивності та, відповідно, високих значень власної частоти МІУ, що є обов'язковим у класиці МІОМ. З'являється можливість використання більш дешевих ємнісних накопичувачів енергії.

По-друге, вимога низьких частот струмів, що генеруються, означає, що або власна частота магнітно-імпульсної установки повинна бути досить низькою, або навантаження розрядного контуру повинна мати досить високу індуктивність. Перший варіант означає підвищення величини ємності накопичувача, другий - використання багатовиткових індукторів або одновиткових соленоїдів у поєднанні з так званими узгоджувальними пристроями (імпульсними трансформаторами струму). Як випливає з практики МІОМ, багатовиткові соленоїди мають цілу низку недоліків (складність у виготовленні, недостатня міцність, малий експлуатаційний термін та ін.). У зв'язку з цим найбільш практичним є використання масивних одновиткових індукторів і відповідних узгоджувальних пристроїв.

Одна з можливих конструкцій пристрою для роботи з одновитковим індуктором захищена патентом. Авторами заявлений спосіб підвищення ефективності циліндричного узгоджувального імпульсного трансформатора, що складається з первинної багатовиткової обмотки поверх вторинного витка у вигляді внутрішнього порожнистого металевго циліндра з позовжнім розрізом, який відрізняється тим, що первинну обмотку закривають зверху екраном у вигляді зовнішнього порожнистого металевго циліндра з продоль розрізом, а однакові краї розрізів внутрішнього і зовнішнього циліндрів електрично з'єднують на виході до навантаження так, щоб підсумовувалися струми, індуковані в кожному з них.

Нарешті, як впливає з апіорних практичних міркувань, виконання рихтувальних операцій вимагає подачі дозованих і контрольованих величин електромагнітної енергії робочу зону інструменту. У цьому є доцільною робота джерела потужності – МІУ як багаторазового повторення генерованих імпульсів струму. Це дає можливість впливати на вм'ятину, що усувається, з наперед заданою кількістю силових імпульсів тяжіння [64, 93-95].

Слід зазначити, що багаторазово вплив на об'єкт, що обробляється згадується в розробках американських фірм «Electroimpact» і «Fluxtronic», але відповідні публікації та патенти з авторством цих фірм у сучасній науковій періодичі відсутні.

Розробки різних конструктивних елементів джерел потужності, що забезпечують роботу в режимі генераторів з регульованим багаторазовим повторенням імпульсів струму, описані в патентах [96-100].

Принципово, їхня дієвість описується в такий спосіб. Батарея конденсаторів заряджається до заданого рівня напруги від мережі $\sim 380/220\text{В}$. Після чого відбувається розряд навантаження – індукторну систему. Потім процес заряд-розряд повторюється. Контроль та управління роботою установки здійснюється за допомогою спеціально розробленої тиристорної схеми. Як показали експерименти, при рівні зарядної напруги 1,5..2 кВ робота з мережею дозволяє на виході установки отримати частоту повторення струмових імпульсів, що генеруються, порядку 3..10 Гц.

Природно, що необхідний рівень зарядної напруги конденсаторної батареї визначається характеристиками міцності об'єкта обробки. При кожному силовому впливі із серії імпульсів, створювані ним внутрішні механічні напруги повинні хоч трохи, але перевищувати межі пластичності оброблюваних металів. У цьому випадку кожен наступний удар із серії лише збільшуватиме відносні деформації.

Особливу увагу слід звернути на пропозицію використовувати в джерелах потужності як накопичувачі електромагнітної енергії, так звані, іоністори [101]. Останні, мають цілу низку переваг у порівнянні з традиційними батареями

конденсаторів. Це малі габарити при досить високому рівні енергії, що запасастся, можливість отримання великих імпульсних струмів, характерних для магнітно-імпульсного обробки металів та ін.

1.3 Індукторні системи з притягуючими екранами – перспективні технічні засоби магнітно-імпульсного рихтування

«Індукторні системи з притягуючим екраном» (ІСПЕ) як інструменти магнітно-імпульсного обробки металів, призначені для тяжіння заданих ділянок тонкостінних провідних листів (насамперед – немагнітних), вперше були запропоновані та описані в роботі [60]. Їхня дієвість, як уже зазначалося, визначається законом Ампера і заснована на силовій взаємодії провідників з однаково спрямованими індуктованими струмами. Конструктивно, такими є листова заготовка і додатковий елемент - допоміжний екран, що притягує. Між ними розташовується плоский одновитковий соленоїд, поле якого збуджує індуктовані струми. Пріоритет пропозиції захищений патентом [44].

Слід зазначити, що у початковому варіанті дієвість

«індукторних систем з притягуючим екраном» (ІСПЕ) розглядалася без урахування можливих магнітних властивостей об'єктів, що обробляються. Як випливає з наукових видань [23, 24, 67, 94, 102], для реальних величин напруженості полів у практиці традиційної МІОМ ($H \sim 105 \div 107$ А/м) феро- та неферомагнетики повинні відчувати однаково силову дію, обумовлену збудженням лише сил Лоренца [103].

Пояснення експериментів 2004р. [58], де було виявлено ефект зміни спрямованості силового магнітно-імпульсного впливу на тонкостінні сталеві зразки при варіації частот полів, що діють, з'явилися в роботах [23, 104-107].

Не вдаючись до подробиць, обмежимося лише констатацією основних положень фізичної сутності виявленого ефекту.

Як випливає з проведених розрахунків та експериментів, при зниженні робочих частот силовий вплив на провідник будь-якої фізичної природи з боку

сил Лоренца, названих у традиційній МІОМ силами «магнітного тиску», суттєво знижується. Визначальну роль грає зростання нормальної компоненти вектора напруженості магнітного поля. А загалом, інтегральне у часі відштовхування заготовки від індуктора прагне нулю [104]. Якщо об'єкт, що обробляється, володіє магнітними властивостями (ферромагнетик), то, незважаючи на малу відмінність відносної магнітної проникності його металу від одиниці в реальному вищевказаному діапазоні амплітуд зовнішніх полів [23], сила магнітного тяжіння стає цілком достатньою для «витягування» вмістину на поверхні тонкого листового металу [105].

Із загальних фізичних міркувань, очевидно, що і в ІСПЕ з ферромагнітними заготовками, останні, крім сил тяжіння за законом Ампера, будуть відчувати також і тяжіння, зумовлене їх магнітними властивостями. Зазначена обставина дозволяє говорити про універсальність ІСПЕ як інструментів для деформування магнітних та немагнітних тонкостінних листових металів.

Найбільш простий конструктивно і досить ефективною є циліндрична «індукторна система з притягуючим екраном», в якій тонкостінний листовий екран і заготовка ідентичні, а збуджуючий соленоїд розташований на однаковій відстані між ними. Геометрична та електродинамічна симетрія такої конструкції інструменту має забезпечити квадратичну залежність його силових характеристик від параметрів збуджуючого струму.

В експериментальній реалізації дослідженого варіанту ІСПЕ виток індуктора розміщувався у круговому пазу, виконаному в допоміжному металі екрану. Дане конструктивне рішення дозволило механічно зафіксувати положення витка та підвищити механічну міцність інструменту тяжіння загалом. Пріоритет пропозиції захищений патентом України [71].

Однак, вищеповисаний варіант ІСПЕ має і недоліки, до яких, в першу чергу, слід віднести значну неоднорідність розподілу сил, що діють на об'єкт, що обробляється, в центральній частині системи.

Як впливає із загальних фізичних міркувань, зазначену неоднорідність

можна нівелювати, якщо ввести в конструкцію ІСПЕ додатковий виток, розташований концентрично і всередині основного витка, але поверх допоміжного екрану. При відповідному живленні струм, що збуджується в металі екрану полем додаткового витка, повинен сумуватися в часі та просторі з індукованим струмом від основного витка. Зрештою, вирівнювання радіального розподілу інтегрального струму, що збуджується в металі допоміжного екрану, має дати певне вирівнювання радіального розподілу сил, що діють на об'єкт, що обробляється. Ця пропозиція була обґрунтована теоретично та експериментально та її пріоритет захищений патентом України [72].

Подальші дослідження «індукторних систем з екраном, що притягує» показали їх досить високу ефективність за наявності тільки одного джерела магнітного поля у вигляді плоского кругового соленоїда, розташованого поверх допоміжного екрану. Проникаючи крізь листові екрани та заготівлю, поле соленоїда збуджує в них однаково спрямовані індуковані струми. Силова взаємодія останніх при жорстко фіксованому екрані призводить до тяжіння заготовки. Теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили практичну дієвість ІСПЕ із зовнішнім джерелом магнітного поля. Пріоритет пропозиції захищений патентом України [108].

Говорячи про інструменти, особливо можна виділити і відзначити також розробки щодо вдосконалення джерел потужності – магнітно-імпульсних установок, що працюють у режимі багаторазового повторення та дозволяють формування уніполярних імпульсів струму [64].

Перше дозволяє реалізувати дозовану подачу енергії в робочу зону інструменту та контролювати процес деформування металу заготовки. Друге істотно збільшує робочий ресурс як окремих конструктивних компонентів магнітно-імпульсних установок, так і їх ресурс в цілому. Пріоритет перерахованих вище пропозицій захищений патентами України [99, 109, 110].

Узагальнення результатів вищезгаданих робіт зі створення принципово нових інструментів, що фактично трансформують природне відштовхування провідних об'єктів у їх тяжіння, та удосконалення джерел потужності, ще

працюють у серійному режимі, дозволяє визначити та сформулювати новий напрямок у розвитку сучасної магнітно-імпульсної обробки металів. Його сутність, в сенсі власне процесу електромагнітного формування притягненням заданих ділянок тонкостінних листових металів, полягає в комбінації фізичних принципів порушення односпрямованих індукованих струмів з багаторазовим силовим впливом на об'єкт, що обробляється [25].

Загалом проведений огляд літератури дозволяє вважати, що використання енергії імпульсних електромагнітних полів є прогресивним та ефективним способом як виробництва, так і ремонту (відновлення) технічних виробів автотранспортного спрямування, авіапромисловості, суднобудування та ін.

Однак, у існуючому традиційному втіленні можливості цього способи обмежені. Обмеженість застосування обумовлена цілим рядом ще недосліджених завдань, пов'язаних з впливом електрофізичних властивостей об'єктів обробки (наприклад, магнітними властивостями листових покриттів автомобільних кузовів зі сталевих сплавів), з ефективністю різного роду конструктивних рішень щодо виконання інструментів власне магнітно-імпульсного тяжіння з конкретним призначенням наприклад, автотранспорту і т.д.

В результаті проведених досліджень зроблено висновок про те, що магнітні властивості екрану та заготівлі проявляється у появі потужних сил магнітного тяжіння. Однак, питання, пов'язані з особливостями перебігу та порушення процесів при довільних робочих частотах діючих полів, що є дуже актуальним, залишаються нерозкритими. Вирішення цих питань має досить вагоме як теоретичне, і практичне значення, оскільки дозволить визначитися з необхідними параметрами інструментів рихтування, які забезпечать ефективне виконання заданих ремонтних операцій із використанням енергії імпульсних магнітних полів.

Проведений огляд також дозволяє визначити досить перспективний напрямок розвитку в області інструментів магнітно-імпульсного рихтування тонкостінних металів. Таким є розробка ІСНЕ, які представляються

універсальними інструментами, що дозволяють виробляти рихтування, як феромагнетиків, так і металів, які не мають магнітних властивостей (наприклад, леговані сталі).

Особливе місце тут займають ІСПЕ та зовнішні соленоїди. Дослідження процесів, що протікають при магнітно-імпульсній рихтуванні в даних інструментах, відкриває значні перспективи в розробці ефективного обладнання для ремонту і відновлення корпусних і кузовних елементів транспортних засобів. Зазначені вище два напрями і є основоположними щодо цілі даної роботи та постановці завдань на проведення подальших дисертаційних досліджень, що і відображено в наступних розділах.

Так, передбачається, що запровадження додаткового зовнішнього витка в ІСПЕ забезпечить більш рівномірний розподіл індукованих струмів і, зрештою, рівномірність діючих сил тяжіння.

Висновки у розділі 1

Аналіз досягнень та розробок у галузі технологій магнітно-імпульсного ремонту кузовів автомобілів АПК призводить до висновків:

1. Проведено аналіз етапів розвитку сучасних магнітно-імпульсних методів рихтування, який показує зростаючу актуальність нового наукового напрямку – методів кузовного ремонту автомобілів з використанням енергії імпульсних магнітних полів.

2. Розкрито особливості традиційних методів рихтування корпусних та кузовних елементів автомобілів АПК. Розглянуто принцип дії їх основного обладнання та позначено область його застосування.

3. Наведено основні ідеї рихтування в'язин альтернативними методами (щодо традиційних), та розкрито їх особливості принципу дії застосування у ремонтних технологіях автотранспортної техніки.

4. Розглянуто нові розробки у методах зовнішньої безконтактної магнітно-імпульсного рихтування та показано їх технологічні можливості.

5. Досліджено ретроспективу відновлювальних технологій з використанням енергії електромагнітних полів. Визначено, що методи

кузовного ремонту з використанням енергії імпульсних магнітних полів є найбільш перспективними та актуальними.

Визначено, що вирішення питань пов'язаних з особливостями перебігу електромагнітних процесів у технічних засобах магнітно- імпульсного рихтування листових феромагнетиків має вагоме як теоретичне, так і практичне

значення. Це дозволить визначитися з необхідними електрофізичними та магнітними характеристиками технічних засобів рихтування, що, у свою чергу, дозволить як задаватися цими параметрами при розробці та виготовленні цього інструментів.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ У ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБАХ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ АПК

2.1 Індукторна система з притягуючим екраном -технічний засіб рихтування феромагнітних кузовних панелей автомобілів

Аналіз особливостей, зумовлених тими чи іншими, зокрема магнітними, властивостями оброблюваних об'єктів слід розпочати висвітлення принципів аспектів дієвості магнітно-імпульсного тяжіння у виробничих операціях відновлення кузовних покриттів автомобілів із вм'ятинами різного походження.

Як відомо, практична працездатність будь-якої індукторної системи, як інструменту магнітно-імпульсного рихтування, визначається її геометрією в цілому, електрофізичними та геометричними характеристиками окремих елементів, а також амплітудно-часовими параметрами струмового імпульсу в їх взаємозв'язку [61, 103].

"Індукторні системи з притягуючим екраном" (в аббревіатурі ІСПЕ, їїша первісна авторська назва - "індукційні індукторні системи" - ІС) вперше були запропоновані та описані авторами роботи [60]. Їхнє початкове призначення полягало у створенні сил магнітно-імпульсного тяжіння немагнітних металів, а принцип дії заснований на взаємодії провідників з однаково спрямованими струмами (закон Ампера). Такими є власне об'єкт обробки – тонкий металевий лист та додатковий конструктивний елемент індукційної індукторної системи – допоміжний екран, що проводить.

У 2004р. вченими НТУ «ХМІ» під час проведення експериментів з тонкостінними сталевими зразками виявили ефект зміни спрямованості силового магнітно-імпульсного впливу при варіації робочих частот діючих полів. При низьких частотах (~2...2,5 кГц) – ділянка листової заготовки відчувала тяжіння, кінцевим результатом якого було утворення вм'ятини. При досить високих частотах (~7...8 кГц) відбулося відоме у практиці магнітно-

імпульсного обробки металів (аббревіатура – МІОМ) відштовхування ділянки аркуша з утворенням опуклості [58].

Поясненню цього ефекту з теоретичним та експериментальним підтвердженням достовірності присвячені численні роботи [23, 104-107, 111-114]. Не вдаючись до подробиць, можна обмежитися констатацією його фізичної сутності.

Так, при зниженні робочих частот діючих полів падає дієвість сил відштовхування – сил Лоренца (відомі як «сили магнітного тиску на провідник» [104]). Дієвість сил тяжіння, обумовлених магнітними властивостями сталевого

об'єкта обробки, зростає і, незважаючи на малу відмінність відносної магнітної проникності його металу від одиниці в реальному діапазоні амплітуд зовнішніх полів, стає достатньою для витягування вм'ятини [105-107, 114].

Із загальних фізичних закономірностей очевидно, що в «індукторних системах з притягуючим екраном» з феромагнітними елементами крім сил тяжіння, обумовлених законом Ампера, заготівля, що обробляється повинна відчувати також і тяжіння, обумовлене магнітними властивостями її металу.

По-перше, зазначена обставина має підвищити силову дієвість «індукторних систем з екраном, що притягує» при обробці феромагнетиків. По-друге, можливість збудження сил різної фізичної природи дозволяє говорити про універсальність цих систем як інструментів для деформування магнітних та немагнітних металів.

Дослідження електромагнітних процесів в «індукторних системах із притягуючим екраном» з немагнітними допоміжним екраном та листовою заготовкою були узагальнені авторами наукового видання [23]. Очевидно, що системи з феромагнітними складовими становлять не менший інтерес у практиці створення дієвих інструментів для виконання виробничих операцій, де потрібне тяжіння заданих ділянок листових металів.

Як було раніше зазначено, найбільш простий конструктивно і досить ефективною представляється «індукторна система з екраном, що притягує» з

ідентичними тонкостінними листовими екраном і заготівлею. Геометрична та електродинамічна симетрія такої конструкції інструменту має забезпечити квадратичну залежність його силових характеристик від параметрів струму, що збуджує систему.

Мета цього розгляду – розрахунок просторово-часових характеристик та аналіз особливостей електродинамічних процесів у «індукторній системі з притягуючим екраном» при силовому впливі на тонкостінні феромагнетики, включаючи визначення частотних діапазонів діючих полів, де пригнічується відштовхування та тяжіння стає превалюючим.

Конструктивно система представлена адекватною моделлю з однаковими магнітними металевими листами (реально, один з них – допоміжний екран, другий – об'єкт обробки), між якими розміщений круговий виток зі струмом.

виробничих операцій, де потрібне тяжіння заданих ділянок листових металів.

Як було раніше зазначено, найбільш простий конструктивно і досить ефективною представляється «індукторна система з екраном, що притягує» з ідентичними тонкостінними листовими екраном і заготівлею. Геометрична та електродинамічна симетрія такої конструкції інструменту має забезпечити квадратичну залежність його силових характеристик від параметрів струму, що збуджує систему.

Мета цього розгляду – розрахунок просторово-часових характеристик та аналіз особливостей електродинамічних процесів у «індукторній системі з притягуючим екраном» при силовому впливі на тонкостінні феромагнетики, включаючи визначення частотних діапазонів діючих полів, де пригнічується відштовхування та тяжіння стає превалюючим.

Конструктивно система представлена адекватною моделлю з однаковими магнітними металевими листами (реально, один з них – допоміжний екран, другий – об'єкт обробки), між якими розміщений круговий виток зі струмом.

2.1 Просторово-часові залежності збуджуваних полів

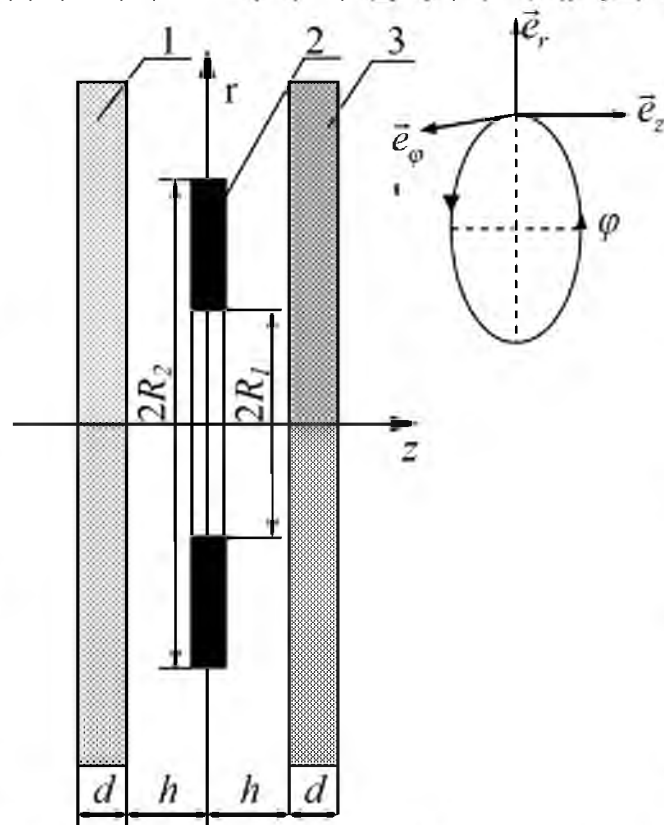
Для реалізації поставленої мети скористаємося результатами відомих

робіт, де аналогічне завдання вирішувалося в ідеалізації металевих елементів індукторної системи абсолютно прозорими провідниками [20, 23, 61, 115].

Автори нитованих робіт обмежилися аналізом процесів у низькочастотній ідеалізації. Справжню картину силового на-оброблюваний об'єкт можна отримати лише під час розгляду досліджуваної ІСПЕ у реальному часовому режимі.

Для ясності у сенсі цього рішення випишемо основні тези з вище цитованих публікацій.

Перше. У циліндричній системі координат приймається розрахункова модель досліджуваної симетричної ІСПЕ з ідентичними тонкостінними листовими феромагнітними металами, показана на рис. 2.1.



1 – екран (d – товщина); 2 – виток (R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси); 3 – заготівля (d – товщина); h – відстань від витка до екрана або заготівлі

Рис. 2.1 – Розрахункова модель у циліндричній системі координат

$$E_{\varphi}^{(2)}(p, r, \zeta) = \frac{p\mu_0 J(p)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{G(p, \lambda)} \times$$

$$H_z^{(1)}(p, r, \zeta) = \int_0^\infty \left[\operatorname{sh}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) - \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_r} \right) \cdot \operatorname{ch}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) \right] \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2.1)$$

Випишемо аналітичні залежності для компонентів вектора електромагнітного поля, знайдені в просторі зображень за Лапласом автором роботи [22].

L – зображення напруженості електричного поля в термінах поздовжньої просторової змінної, пов'язаної власне із загогівлю

$$G(p, \lambda) = \operatorname{sh}(q(p, \lambda)d) \left[\operatorname{sh}(\lambda h) + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_r} \right)^2 \operatorname{ch}(\lambda h) \right] + \operatorname{ch}(q(p, \lambda)d) \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_r} \right) e^{\lambda h}.$$

Тангенціальна (r -складова) та нормальна (z -складова).

$$H_r^{(2)}(p, r, \zeta) = \frac{j(p)}{2\mu_r} \cdot \int_0^\infty \frac{f(\lambda) \cdot q(p, \lambda)}{G(p, \lambda)} \times$$

$$\times \left[\operatorname{ch}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) - \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_r} \right) \cdot \operatorname{sh}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) \right] \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (2.2)$$

$$H_z^{(2)}(p, r, \zeta) = -\frac{j(p)}{2\mu_r} \cdot \int_0^\infty \frac{f(\lambda) \cdot \lambda}{G(p, \lambda)} \times$$

$$\times \left[\operatorname{sh}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) - \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda \mu_r} \right) \cdot \operatorname{ch}(q(p, \lambda)(\zeta - d)) \right] \cdot J_0(\lambda r) d\lambda. \quad (2.3)$$

позначень збігаються з виразами для аналогічних характеристик збуджуваних полів у разі немагнітного екрану та загогівлі, знайдених авторами робіт [12, 13].

Для отримання просторово-часових залежностей при довільних робочих частотах діючих полів у виразах для L образів знайдених компонентів

вектора електромагнітного поля (2.1 – 2.3) слід виконати зворотнє перетворення Лапласа [77, 121].

Почнемо з формули (2.1).

$$q(p, \lambda) \cdot d = i \cdot \beta_k \quad (2.4)$$

Для обчислення спеціальних точок підінтегральної функції добутком поздовжнього хвильового числа на товщину листової заготовки представимо як

$$\text{ctg}(\beta_k) = \frac{\left[1 + \left(\frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot \lambda \cdot d)} \right)^2 \right] \cdot e^{-2\lambda h} - \left[1 - \left(\frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot \lambda \cdot d)} \right)^2 \right]}{2 \cdot \left(\frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot \lambda \cdot d)} \right)} \quad (2.5)$$

Як випливає з (2.4) та уявлення (2.5), особливими точками функції комплексного змінного під знаком інтеграла у виразах (2.1 – 2.3) є прості,

$$p_k = -\frac{1}{\tau} \cdot (\beta_k^2 + (\lambda \cdot d)^2), \quad k = 0, \pm 1, 2, \dots, \quad (2.6)$$

Далі, відповідно до теореми про оригінал дробово-раціональної функції та з теореми звернення згортки з виразу (2.1) знаходимо відповідну тимчасову залежність.

$$E_\varphi(t, \zeta, r) = -\frac{j_m}{(\mu_r \gamma d^2)} \int_0^\infty \sum_{k=0}^\infty \delta_k \cdot \frac{F_1(\beta_k, \lambda, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \lambda)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} * e^{p_k t} \cdot f(\lambda) e^{-\lambda h} J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2.7)$$

Зрештою, з використанням залежності (2.7) після необхідних тождеств перетворень у формулі (2.1) знаходимо оригінал для напруженості електричного поля, що збуджується в магнітному металі екрана та заготовки

$$F_1(\beta_k, \lambda, \zeta) = \beta_k \cdot \left[\sin \left(\beta_k \left(\frac{\zeta - d}{d} \right) \right) - \frac{\beta_k}{(\mu_r \cdot \lambda \cdot d)} \cdot \cos \left(\beta_k \frac{\zeta - d}{d} \right) \right],$$

$$\Phi(\beta_k, \lambda) = \cos(\beta_k) \cdot \left[\frac{1}{(\mu_r \lambda d)} + 0.5 \cdot \left((1 - e^{-2\lambda h}) - \left(\frac{\beta_k}{\mu_r \lambda d} \right)^2 (1 + e^{-2\lambda h}) \right) \right] -$$

$$- \sin(\beta_k) \frac{\beta_k}{(\mu_r \lambda d)} \cdot \left[1 + \frac{(1 + e^{-2\lambda h})}{(\mu_r \lambda d)} \right]. \quad (2.8)$$

Далі, аналогічним чином знайдемо оригінали виразів (2.2) і (2.3), що являють собою L - образи компонента напруженості магнітного поля в металі листових екрану і об'єкта, що обробляється.

Залишимо тангенціальну складову напруженості магнітного поля, як функція часу та просторових координат.

$$H_r(t, \zeta, r) = - \frac{J_m}{(\mu_r \tau d)} \int_0^{\infty} f(\lambda) e^{-\lambda h} J_1(\lambda r) \left(\sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{F_3(\beta_k, \lambda, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \lambda)} \cdot j(t) * e^{pk t} \right) d\lambda, \quad (2.9)$$

2.3 Діючі сили при рихтуванні, основні співвідношення

Загальна класифікація сил, що порушуються в розглянутій індукційною індукторною системою з двома ідентичним листовими феромагнетиками, один із яких відіграє роль допоміжного екрану, другий є об'єктом обробки, була сформульована при аналізі процесів у низькочастотному режимі [23, 35].

Для кращого уявлення про особливості при довільних частотах діючих полів нагадаємо основні положення проведеної класифікації сил, що збуджуються в системі.

Екран жорстко зафіксовано. Він нерухомий і деформуємо. Метал об'єкта, що обробляється, має певні ступені свободи. Він може деформуватися у напрямі чинних сил. Тому далі ми говоритимемо про силовий вплив лише на об'єкт обробки.

У сенсі класифікації за принципом фізичної природи можна виділити дві групи діючих сил.

Перша їх – це електродинамічна взаємодія збуджуваних пелів і струмів.

Тут насамперед слід виділити сили взаємодії індукованого струму з різними компонентами напруженості магнітного поля в провідниках (сили Лоренца).

$$F_{L\perp}(t, r) = \mu \cdot \int_0^d j_{\phi}(t, r, \zeta) \cdot H_r(t, r, \zeta) d\zeta.$$

(2.10)

Взаємодія індукованого струму – j з тангенціальною

$$F_{L\tau} = \mu \cdot \int_0^d j_{\phi}(t, r, \zeta) \cdot H_z(t, r, \zeta) d\zeta.$$

(2.11)

У традиційній магнітно-імпульсній обробці металів вони названі силами магнітного тиску. Математично, їхня дія описується залежністю. В

оброблюваному об'єкті механічні напруги, які у місцях нормальних деформацій

призводять до появи крутних моментів. Останні, своєю чергою, впливають

процеси деформування провідника у нормальному напрямі [20], тобто,

фактично, накладається на сили магнітного тиску, збільшуючи чи зменшуючи

(залежно від знака) їх дієвість.

Далі, збудження сил електродинамічної взаємодії струмів, індукованих у металі допоміжного екрану та оброблюваної заготовки – J_{ϕ} (2.11). Це сили

Ампера – F_A . Струми спрямовані однаково. Має місце взаємне тяжіння один

одного провідників з цими струмами. Оскільки екран зафіксований, до робочої

поверхні індуктора притягуватиметься листова заготовка [23, 40, 42].

В індукторній системі циліндричної геометрії $\odot \otimes$ однаковими індукованими струмами сили тяжіння описуватимуться співвідношенням [23]

Примітка. Формула (2.15) враховує тільки так звані «ближні взаємодії»

індукованих струмів (струмових «ниток», розташованих безпосередньо один

під одним). Оскільки тут не враховано «далекі взаємодії», формула (2.15)

дозволяє дати мінімальну оцінку збудливих сил тяжіння.

$$F_{attr}(t, r) = \frac{\mu_0}{2} \cdot J_{\phi}^2(t, r) \cdot \frac{r}{h} \cdot \cos \alpha \quad (2.15)$$

Друга група діючих сил – це сили, зумовлені магнітними властивостями металу об'єкта, що обробляється [23, 27]. Вони можуть виникати лише у разі впливу поля на феромагнетики. Фізично, їх природа пояснюється різницею магнітних проникностей середовищ межі розділу. Таким чином, на феромагнетик у магнітному полі діятиме сила, спрямована від нього у бік середовища з меншою магнітною проникністю [17].

У додатку до ІСПЕ, що розглядається, на феромагнітну листову заготовку крім сил електродинамічної природи (перша виділена група – взаємодія поля і струмів) діятиме сила магнітного тяжіння, спрямована нормалі до робочої поверхні індуктора.

Аналітичний вираз для цієї сили, що включає тангенціальну та нормальну складові вектора напруженості магнітного поля, що збуджується, на основі енергетичних уявлень, розвинених у монографії Круга К.А. [27], було отримано авторами [23].

Отже, перша група виділених сил (2.13 – 2.15) – це сили, що діють на метали будь-якої фізичної природи. Їхня дієвість поширюється на немагнітні та магнітні провідники.

Друга група – це сили, збудження яких має місце лише при обробці феромагнетиків (2.16).

Таким чином, можливість силового впливу на метали різної фізичної природи говорить про універсальну дієвість «індукторних систем з екраном, що притягує».

Говорячи про математичному описі характеристик ІСПЕ як технічного засобу магнітно-імпульсного тяжіння, вкажемо, що алгебраїчна сума виразів (2.12 – 2.16) повністю описує силовий вплив на об'єкт, що обробляється.

Щодо ефективності «індукторних систем з екраном, що притягує» необхідно підкреслити дуже істотну обставину. У разі обробки феромагнетика величина інтегральної сили тяжіння містить додатковий доданок і буде вищим, ніж у разі силового впливу на немагнітну листову заготовлю. Якщо ж метал об'єкта обробки не має магнітних властивостей, інтегральна величина діючої сили не міститиме даного доданку – сили, саме, магнітного тяжіння.

2.4 Чисельні оцінки протікають електродинамічних процесів при рихтуванні

Пристаючи до чисельних оцінок, відзначимо, що кінцевою метою аналізованого є освітлення особливостей магнітно-імпульсного тяжіння листових феромагнетиків, включаючи обчислення частотних діапазонів діючих полів, де пригнічується відштовхування і тяжіння стає превалюючим.

Поставлена мета досягається порівнянням характеристик процесів, що протікають як функцій основних визначальних показників, до яких відносяться тимчасові залежності (робочі частоти) збуджуваних полів і електрофізичні параметри об'єктів обробки. Останні визначають наявність або відсутність магнітних властивостей реальних сталевих покриттів (звичайні або леговані сплави), що дуже значимо у практиці рихтування кузовів сучасних автомобілів.

2.4.1 Початкові дані

Для проведення обчислень слід задати параметри досліджуваної ІСПЕ:

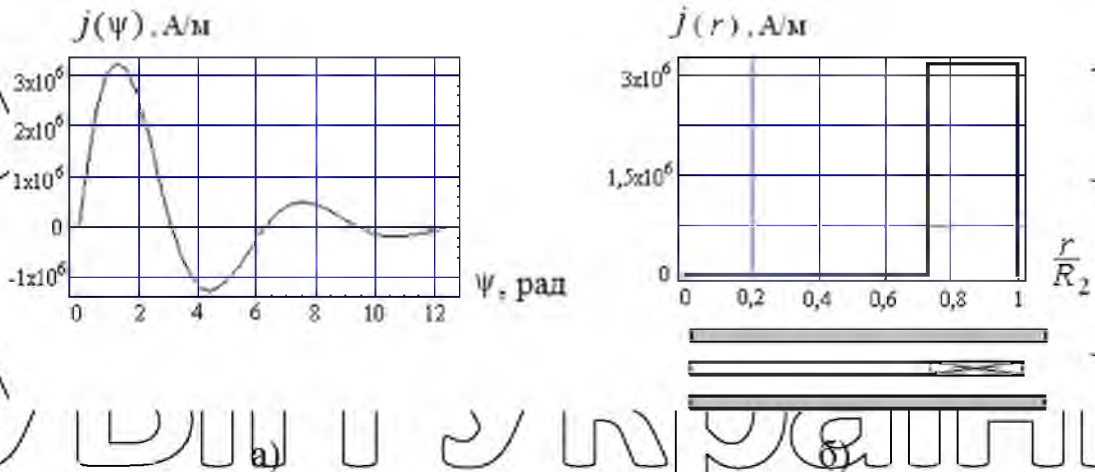
- Геометрія типової експериментальної конструкції має

$$R = 0,025\text{м}, R_2 = 0,035\text{м}, 2h = 0,001\text{м},$$

Примітка. Прийнята відстань між екраном та оброблюваним об'єктом - $2h$ реально може відповідати глибині вм'ятини, що усувається, при магнітно-імпульсному рихтуванні автомобільного кузова.

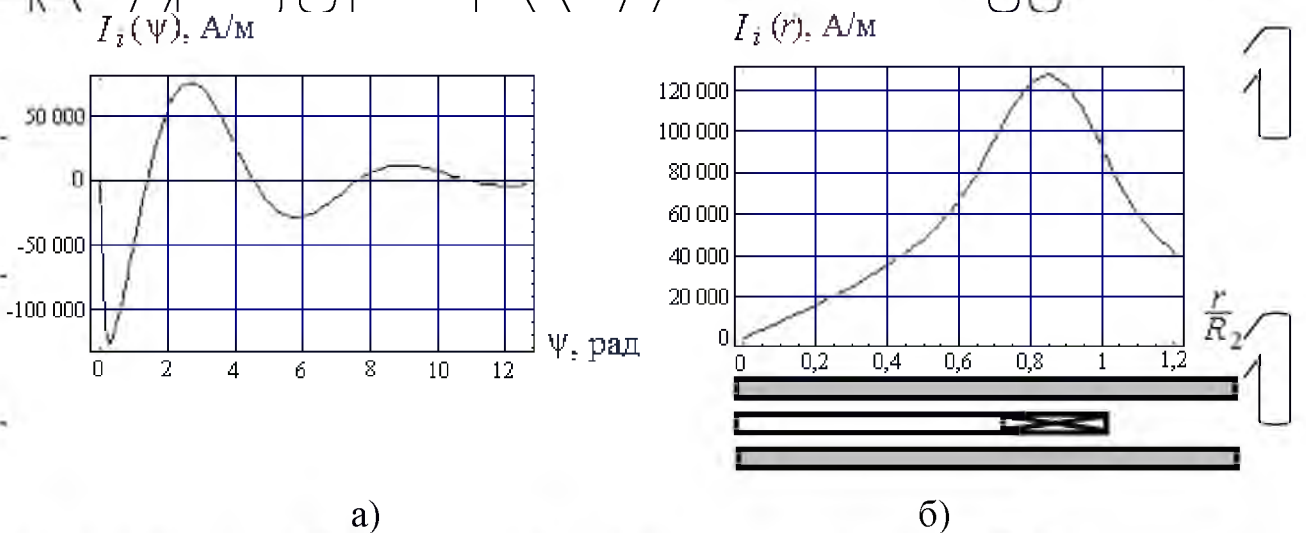
Щільність струму в індуктора описується типовою для магнітно-імпульсного обробки металів залежністю: $j(\psi) = e^{-\delta\psi} \cdot \sin(\psi)$,

Наголосимо, що з практичної точки зору найбільший інтерес представляють обчислення для різних значень робочих частот. Ці оцінки повинні дати уявлення про співвідношення ефектів відштовхування і тяжіння залежно від тимчасових характеристик діючих сил у зв'язку електрофізичними параметрами металів оброблюваних об'єктів – провідних листових заготовок.



а – фазова залежність; б – радіальний розподіл

Рис. 2.2 – Лінійна щільність струму в індукторі

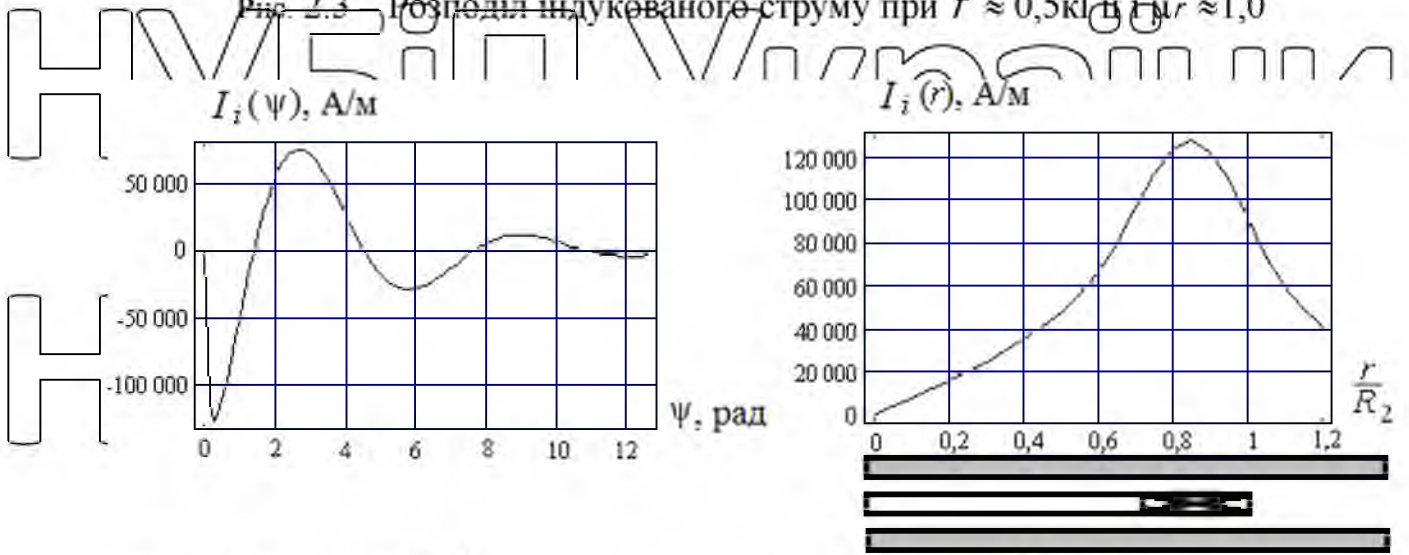


а)

б)

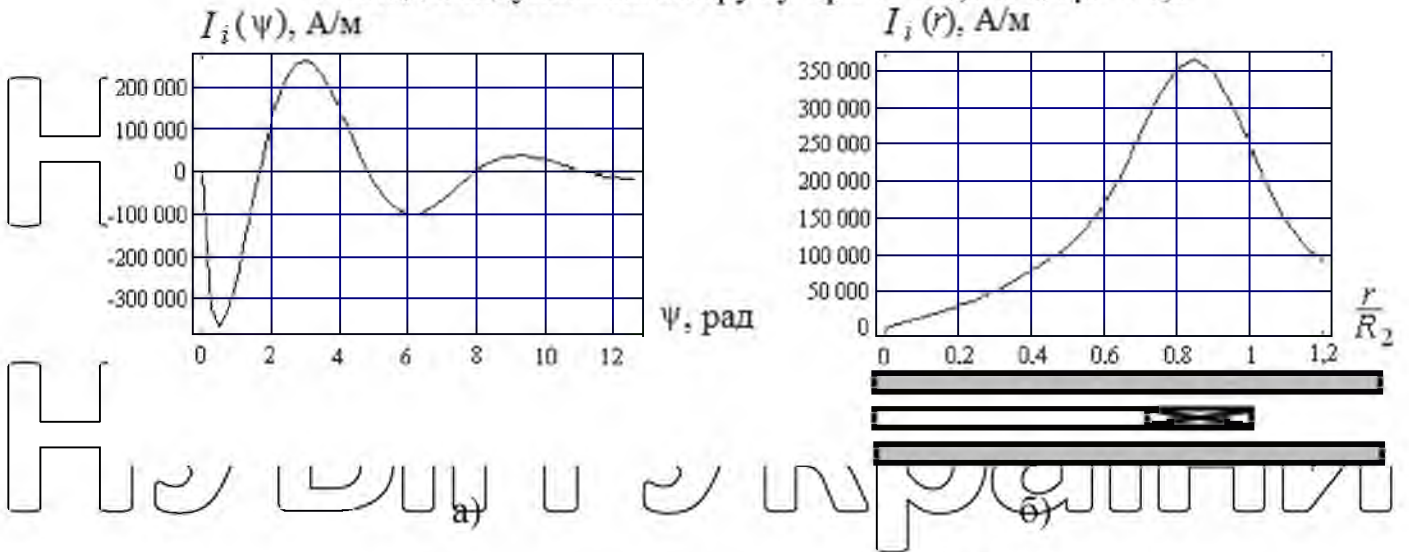
а – фазова залежність на колі $\frac{r}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot R_2}$
 б – радіальна залежність у фазі $\psi \approx 0,25$ рад

Рис. 2.3 Розподіл індукованого струму при $f \approx 0,5 \text{ кГц}$ і $\mu r \approx 1,0$



а) фазова залежність на колі $\frac{r}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot R_2}$;
 б) радіальна залежність у фазі $\psi \approx 0,25 \text{ рад}$

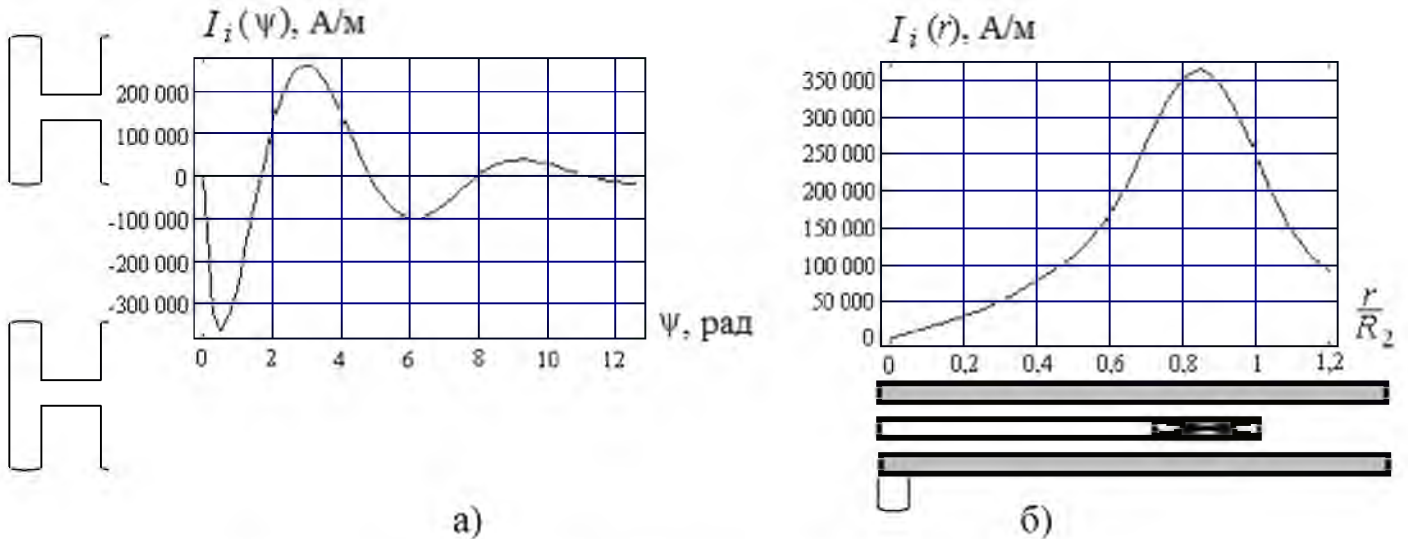
Розподіл індукованого струму при $f \approx 0,5 \text{ кГц}$ і $\mu r \approx 1,5$



а) фазова залежність на колі $\frac{r}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot R_2}$;
 б) радіальна залежність у фазі $\psi \approx 0,5 \text{ рад}$

Рис. 2.5 Розподіл індукованого струму при $f \approx 0,5 \text{ кГц}$ і $\mu r \approx 1,0$

НУБІП України



а) фазова залежність на колі $-\frac{r}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot R_2}$;
 б) радіальна залежність у фазі $+\psi \approx 0,5$ рад
 Рис. 2.6 Розподіл індукованого струму при $f \approx 0,5$ кГц і $\mu r \approx 1,5$

Приступаючи до обговорення отриманих результатів, слід зазначити, які висновки хотілося б отримати на підставі чого ці висновки зроблено та, зрештою, обґрунтувати їхній інтерес для практики.

У загальному випадку (будь-які інструменти та будь-які метали) для реального магнітно-імпульсного тяжіння, в першу чергу, цікавить оцінка порівняльної значущості збуджуваних сил відштовхування і тяжіння.

Якщо інструмент – «індукторна система з притягуючим екраном», то у разі немагнітних зразків мова йде про Лоренцеві сили відштовхування і сили тяжіння Ампера. Для феромагнетиків до сил Ампера додаються сили тяжіння за рахунок магнітних властивостей металу, що обробляється.

Як у першому, так і в другому випадках необхідно простежити співвідношення сил відштовхування та сил тяжіння. Просто розрахунків цих сил для переконливості рекомендацій щодо практичного створення ІСПЕ вочевидь мало. Обґрунтування їхньої роботи- або навіть просто дієздатності має містити різні підходи до оцінюваних процесів. Тут мають бути результати аналізу всіх фізичних явищ, дія яких може призвести до превалювання тяжіння над відштовхуванням.

Одним з основних явищ такого типу є трансформація тимчасової форми індукованого струму при варіації робочих частот діючих полів відповідно до електрофізичних і геометричних характеристик оброблюваного металу [11-13].

Як показано у наведених вище роботах, для ідеального провідника, тобто при абсолютній відсутності проникнення діючих полів, індукований струм із точністю до знака повторює форму струму індуктора. Як наслідок, Лоренцевське відштовхування провідника від джерела поля (у класиці МІОМ, це магнітний тиск) максимально. У разі "прозорого" провідника індукований струм - це похідна струму індуктора. Тут відштовхування мінімальне.

Очевидно, що порівняння тимчасових форм індукованого струму та струму індуктора дозволяє отримати першу інформацію про можливе послаблення або посилення збуджуваних сил відштовхування Лоренца.

Аналіз графіків на рис. 2.2 – 2.8 приводить до таких висновків:

- при відносно високих частотах діючих полів ($f \sim 10,0$ кГц) фазова залежність індукованого струму наближається до відповідної форми індукторного струму (з точністю до знака). Радіальний розподіл значною мірою зосереджено поблизу витка;

- зниження робочої частоти дещо звужує першу напівхвилю індукованого струму, наближаючи залежність для індукованого струму до виду похідної індукторного струму. Радіальний розподіл «розпливається» площею під вікном витка;

- робочі частоти $\sim 2,0$ і $0,5$ кГц можна вважати досить низькими з погляду відповідності часових форм індукованих струмів похідної струму індуктора.

Таким чином, у розглянутій ІСПЕ для робочих частот нижче тимчасовий режим діючих полів відповідно до геометричних та електрофізичними характеристиками листових металів наближається до ідеалізації "прозорих" провідників. Лоренцеві сили відштовхування на немагнітні та магнітні сталі повинні ставати несуттєвими.

Примітка. При зниженні робочих частот разом із відштовхуванням падає і сила тяжіння, пропорційна квадрату струмів. Очевидно, під час створення реальних конструкцій інструментів ІСПЕ – типу слід орієнтуватися найбільше значення робочої частоти, на яку сили Лоренцевського відштовхування стають малозначними.

Видволюючись від конкретики висновків, сформульованих для окремих ситуацій, приходимо до наступного висновку:

В ІСПЕ з ідентичними листовими феромагнітними та неферомагнітними металами робочі частоти діючих полів менші

$\sim (1,0 \div 2,0)$ кДл можна вважати досить низькими для того, щоб тимчасові форми індукованих струмів наближалися до похідних тимчасових залежностей збудливих струмів в індукторі.

Для практики створення інструментів магнітно-імпульсного тяжіння запропонованого ІСПЕ – типу поняття низької частоти дуже цікаве, оскільки дає уявлення про тимчасові характеристики діючих полів, для яких інтегральна в часі дія сил Лоренца має наближатися до нуля. Відштовхування об'єкта, що обробляється, від індуктора якщо і буде проявлятися, то повинно бути дуже незначним.

На закінчення цього розгляду наведемо результати розрахунку розподілу індукованих струмів за товщиною немагнітних листових

Висновки у розділі 2

Розрахунки електродинамічних процесів в ІСПЕ, як технічного засобу для зовнішньої магнітно-імпульсного рихтування, з однаковими тонкостінними листовими феромагнітними та неферомагнітними металами (реально, один з них – допоміжний екран, другий – об'єкт обробки), між якими розміщений круговий виток зі струмом, виконані довільних робочих частот діючих полів, що відповідає реальній моделі досліджуваних процесів.

1. Узагальнення результатів, отриманих для індукованих струмів, показало, що в ІСПЕ з ідентичними листовими феромагнітними та

неферомагнітними металами тимчасові режими з характерними частотами діючих полів порядку $\sim (1,0 \div 2,0)$ кГц і нижче можна вважати низькочастотними, що наближаються до режиму металів

"прозорими провідниками".

2. Проведений аналіз дозволив виділити такі особливості силових процесів:

– в системі збуджуються електродинамічні та магнітні сили: електродинамічні сили – це сили Лоренца (відштовхування) та сили Ампера (тяжіння), поява магнітних сил (надалі названі силами магнітного тяжіння)

обумовлено впливом магнітних властивостей металу заготівлі;

– збуджувані сили різної фізичної природи в різний час досягають своїх максимальних значень; так, перший вплив проявляється з боку притягуючої сили Ампера, далі слідує Лоренцевское відштовхування і, нарешті, має місце магнітне тяжіння листової заготовки (див. стовпець - «фаза максимуму»);

– у разі немагнітних листових металів результуюче тяжіння або відштовхування обумовлено виключно діями, що по черзі діють, електродинамічної природи (Ампера і Лоренца);

– зі зростанням робочої частоти від 0,5кГц до 2кГц суттєво зростають сили електродинамічної природи (Ампера та Лоренца в 4-8 разів), сили магнітного тяжіння змінюються несуттєво (не більше ніж на $\sim 20\%$);

– для досить низьких робочих частот ($f = 0,5$ кГц) найбільший внесок у тяжіння вносять сили, зумовлені магнітними властивостями листових металів, але за підвищення частоти превалюючими в тяжінні стають сили електродинамічної природи – сили Ампера;

– дія відштовхувальних сил Лоренца дозволяє припустити, що механічний процес деформування листового металу може мати коливальний характер, що, своєю чергою, впливатиме якість результату виконання заданої виробничої операції.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІЧНИЙ ЗАСІБ РИХТУВАННЯ КУЗОВНИХ ПАНЕЛЕЙ
АВТОМОБІЛІВ АПК

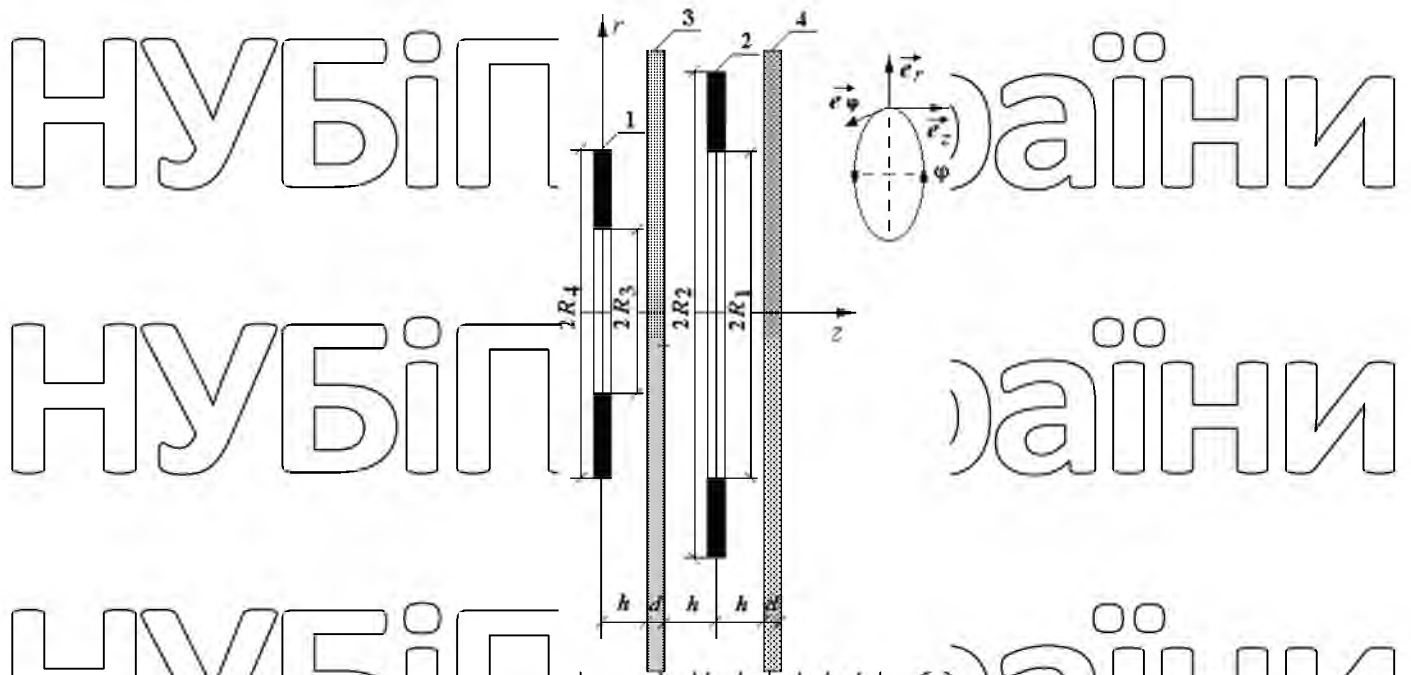
В експериментальній реалізації дослідженого варіанту ІСПЕ виток індуктора розміщувався у круговому пазу, виконаному в допоміжному металі екрану. Дане конструктивне рішення дозволило механічно зафіксувати положення витка та підвищити механічну міцність інструменту тяжіння загалом. Пріоритет пропозиції захищений патентом України [71].

Однак, вищеописаний варіант ІСПЕ має і недоліки, до яких, в першу чергу, слід віднести значну неоднорідність розподілу сил, що діють на об'єкт, що обробляється, в центральній частині системи.

Як випливає з феноменологічних міркувань, зазначену неоднорідність можна нівелювати, якщо ввести в конструкцію ІСПЕ додатковий виток, розташований концентрично і всередині основного витка, але поверх допоміжного екрану. При відповідному живленні струм, що збуджується в металі екрана полем додаткового витка, повинен сумуватися в часі та просторі з індуктованим струмом від основного витка. Зрештою, вирівнювання радіального розподілу інтегрального струму, що збуджується в металі допоміжного екрану, має дати певне вирівнювання радіального розподілу сил, що діють на об'єкт, що обробляється. Ця пропозиція була обґрунтована теоретично та експериментально. Її пріоритет захищений патентом України [72].

Мета цього розгляду – аналіз електродинамічних процесів в циліндричній «індукторній системі з екраном, що притягує», представленої двома однаковими тонкостінними листовими металами (Реально, один з них – допоміжний екран, другий – об'єкт обробки) і двома круговими витками, один з яких (основний) розміщений під екраном, а другий (додатковий) – над ним [72,128].

Розрахункова модель у циліндричній системі координат дана на рис. 3.1.



1 – додатковий виток індуктора (R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси); 2 – основний виток (R_3, R_4 – внутрішній та зовнішній радіуси);
3 – екран (d – товщина); 4 – заготівля (d – товщина);

h – відстань від основного витка індуктора до екрану та заготівлі та від додаткового витка до екрану

Рис. 3.1 – Розрахункова модель у циліндричній системі координат

При вирішенні прийемо такі припущення:

плоскі витки індуктора мають циліндричну форму, їх товщина дуже мала, так що вони не впливають на протікають електромагнітні процеси;

- має місце аксіальна симетрія $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$,

$$\left(\begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_c \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_c \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \end{array} \right) \quad (3.1-3.3)$$

З диференціальних рівнянь (3.1 – 3.3) з урахуванням виразу (3.4) у межах

прийнятих припущень (нехтуючи струмами усунення) отримаємо рівняння

$$j_{\varphi}(p, r, z) = (p \cdot \varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_{\varphi}(p, r, z) + j_{\varphi 1,2}^{(i)}(p, r, z),$$

$$j_{\varphi 1}^{(i)}(p, r, z) = j_1(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z), \quad j_{\varphi 2}^{(i)}(p, r, z) = j_2(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z - (2h + d));$$

У вільному півпросторі із зовнішнього сторони допоміжного екрану

$$\frac{\partial^2 E_{\varphi}^{(1)}(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_{\varphi}^{(1)}(p, r, z)) \right) = \mu_0 \cdot p \cdot j_{\varphi 1}^{(i)}(p, r, z). \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 E_{\varphi}^{(2)}(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_{\varphi}^{(2)}(p, r, z)) \right) - (p \cdot \gamma \cdot \mu) \cdot E_{\varphi}^{(2)}(p, r, z) = 0. \quad (3.6)$$

Відповідно до (В.6) рівняння (3.1 – 3.5) наводяться до звичайних лінійних диференціальних рівнянь другого порядку щодо образу. $-E(p, z)$.

З умови безперервності дотичних компонент вектора напруженості електромагнітного поля на межах виділених областей отримуємо системи рівнянь алгебри для визначення невідомих довільних постійних інтегрування у виразах для інтегральних образів.

$$\frac{d^2 E_{\varphi}^{(5)}(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_{\varphi}^{(5)}(p, \lambda, z) = 0.$$

Системи лінійних рівнянь алгебри є певними і дозволяють отримати єдині рішення поставленої електродинамічної задачі для довільних тимчасових залежностей полів і струмів в аналізованій «індукторній системі з притягуючим екраном» [21, 29].

Для практики, в першу чергу, цікавий так званий низькочастотний режим, коли екран і листові заготовки є "прозорими" для діючих полів.

3.2. Чисельні оцінки, основні результати

Отримані вирази приведемо до вигляду, зручного у обчисленнях.

У невластних інтегралах залежностей (3.42), (3.43) введемо нову змінну інтегрування $x = \lambda d$, $x \in [0; \infty)$. Крім того, припустимо, що

$$а) j_1(t) = j_{1m} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_{1m} \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi), \quad j_{1m} \text{ - амплітуда}$$

витках індуктора мають різні амплітуди, але змінюються у часу однаково за законом експоненційно-загасаючої синусоїди

$$б) j_2(t) = j_{2m} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_{2m} \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi), \quad j_{2m} \text{ - амплітуда.}$$

У термінах нової змінної формули з урахуванням прийнятих припущень по струмах у витках індуктора виразу (3.42), (3.43) набувають наступного вигляду

$$J_{\varphi}^{(\psi)}(\psi, r) = -J_m \int_0^{\infty} \left(\left(\frac{j_{1m}}{J_m} \right) \cdot f_1(x) + \left(\frac{j_{2m}}{J_m} \right) \cdot f_2(x) \right) \frac{e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x})}{x} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) dx,$$

Примітка 1. Індуктивності обчислені за формулами для циліндричних плоских витків. За наявності двох витків розглядається їхнє паралельне з'єднання.

Примітка 2. При однаковій ширині витків $\Delta R = R_1 - R_2 = R_1 - R_2 = 0,005 \text{ м}$ прийнята амплітуда струму може відповідати.

Примітка 3. Тричасові характеристики струмового імпульсу та параметри листової заготовки відповідають необхідному рівню її прозорості для діючих полів, а саме.

$$\omega \cdot \tau = (2\pi \cdot 1500) \cdot \tau = \left\| \tau = \mu_0 \gamma d^2 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ с} \right\| = 0,015 \ll 1.$$

Примітка 4. Незатемнені ділянки на графіках – ділянки, де відсутні сили, зумовлені наявністю витка між екраном та заготовкою.

Примітка 5. Сили тяжіння знайдені інтегруванням розподілених сил тяжіння площам відповідних ділянок

$$\{r \leq 1,2 \cdot R_2 = 0,036 \text{ м}, \psi \in [0; 2\pi]\}.$$

Примітка 6. У дужках наведено величини, обчислені у припущенні, що

наявність витка не впливає на радіальний розподіл сил тяжіння.

Результати обчислень для кожного з варіантів індукторної системи притягуючим екраном наведено нижче на рис. 3.2-3.6

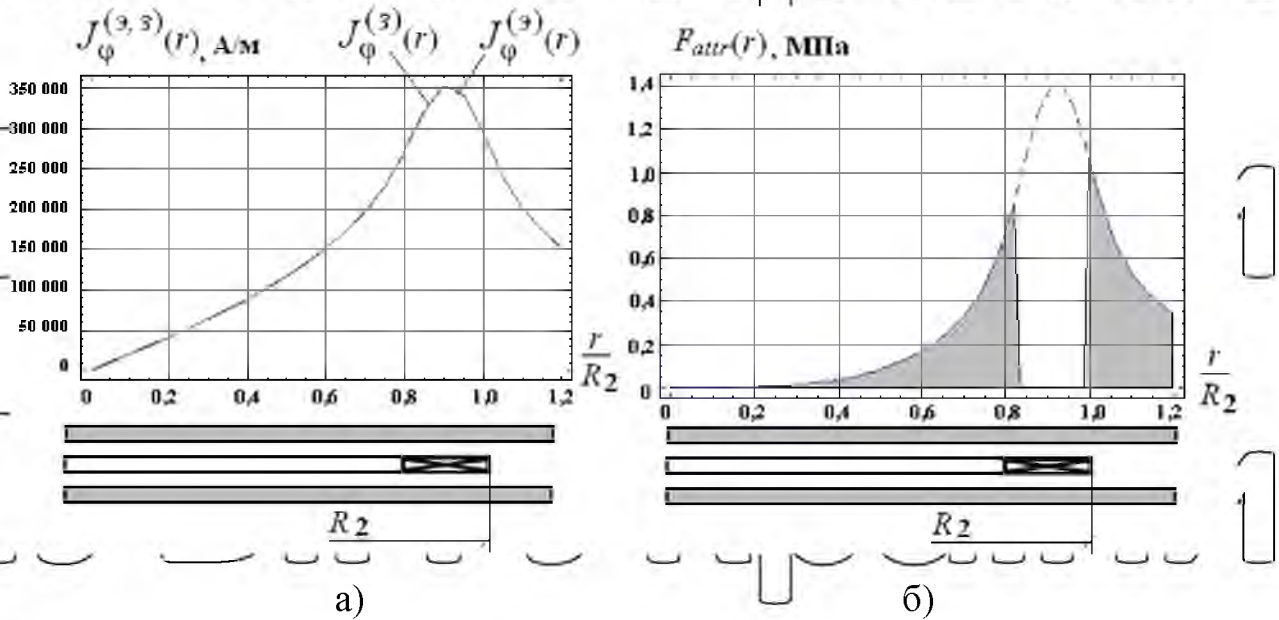
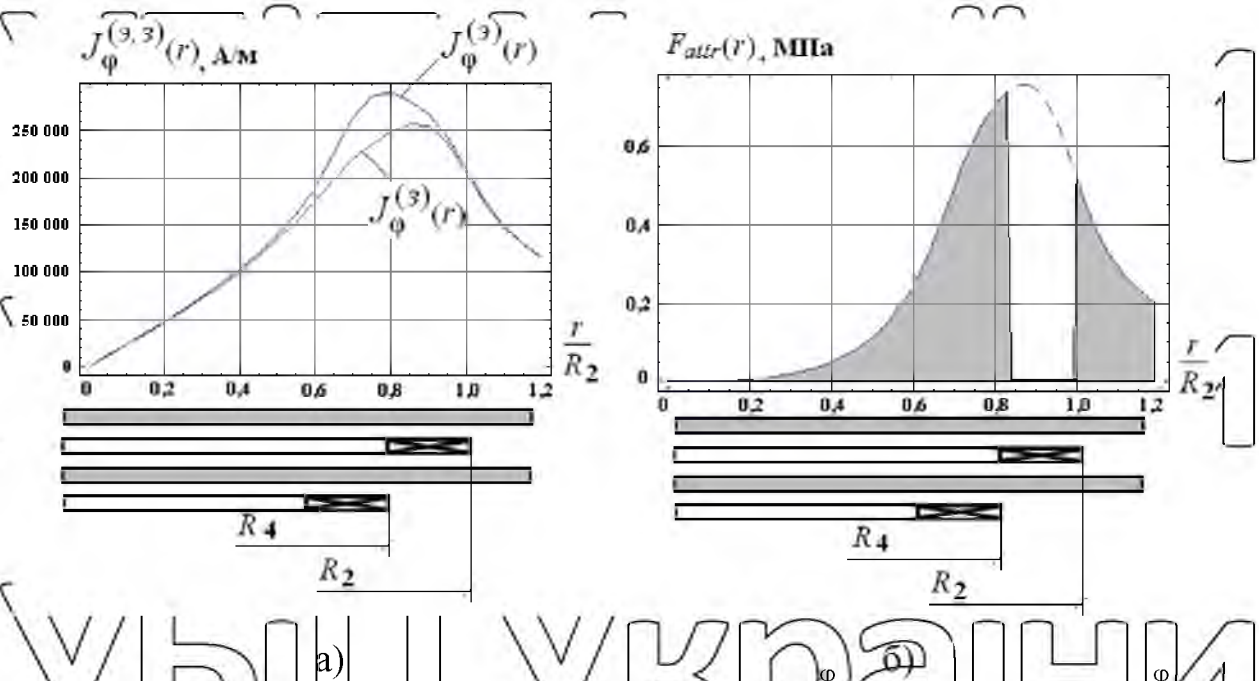


Рис. 3.2 – Варіант №1. Радіальні розподіли збуджуваних струмів та сил



а – густини струмів, індукованих в екрані б – розподілена сила тяжіння заготівлі

Рис. 3.3 – Варіант №2а. Радіальні розподіли збуджуваних струмів та сил

НУБІП УКРАЇНИ

Таблиця 3.1

Результати досліджень

№п/п	Варіант конструкції у розрахунках	Площа ділянки, м ²	Індуктивність системи, нГн	Сила тяжіння, Н	Середнє значення розподіленої сили тяжіння, МПа
1.	Варіант №1	0,004072	30	900,94(1628)	0,22 (0,40)
2.	Варіант №2а	0,004072	12,9	710,30(11180)	0,17 (0,28)
3.	Варіант №2б	0,004072	10,4	460,91(674,7)	0,13 (0,17)
4.	Варіант №3	0,004072	30	1375,38	0,33

Основні результати проведених обчислень зводяться до наступних положень:

– введення додаткового витка, розміщеного поверх допоміжного екрану, дозволяє сконцентрувати сили тяжіння в центральній частині робочої зони індукторної системи рис. 3.2-3.4;

– при введенні додаткового витка має місце зниження амплітуд діючих сил, що пояснюється незмінною величиною струму (як і у разі, коли додатковий виток відсутній), що подається на вхід індукторної системи, та прийнятим у розрахунках розподілом струму по витках, обернено пропорційним їх індуктивностям;

– для більш значущої концентрації сил у центрі робочої зони при збереженні або навіть збільшенні амплітуд збудливих сил тяжіння слід застосовувати відповідну схему живлення індукторної системи, що дозволяє регулювати амплітуди та розподіл струмів витками;

– Наочною ілюстрацією попереднього висновку є залежність на рис. 3.6, отримані для конструкції «індукторної системи з екраном, що притягує» Варіант №2б при подачі струму на вхід з амплітудою

~ 75 кА та розподіл за витками щодо 3/2 (внутрішній/зовнішній). Тут сумарна величина сили становить вже ~ 1,04 кН за середнього значення розподіленої сили ~ 0,25 МПа;

– особливо слід зазначити ефективну дієвість розглянутої індукторної системи при включенні лише «зовнішнього» та за відсутності «Внутрішнього» витка. Тут при достатній простоті конструктивного виконання в порівнянні з системою, що збуджується двома витками, мають місце досить високі значення сил тяжіння, що розвиваються, і їх середніх величин;

– зазначена більш висока силова ефективність системи за наявності лише «зовнішнього» витка порівняно з системою, де виток розташований у внутрішній порожнині, пояснюється відсутністю «провалу» у радіальному розподілі збуджених сил. Цей «провал» у конструкції з витком між листовими металами обумовлений його дією, що екранує, щодо сил тяжіння між індуктованими струмами;

– наявністю «внутрішнього» витка і, відповідно, «провалом» у розподілі сил тяжіння пояснюється і зниження силової ефективності при збудженні індукторної системи двома витками порівняно з конструкцією, де є лише «зовнішній» виток.

Висновки у розділі 3

Висновки проведеного аналізу процесів у низькочастотному режимі діючих полів (ідеалізація прозорих провідників) сформульовані нижче.

1. Результуючі струми, як в екрані, так і заготівлі, односпрямовані та визначаються лінійною комбінацією індуктованих струмів - алгебраїчних доданків, кожне з яких обумовлено вкладом струму, що протікає у відповідному витку індуктора.

2. Введення додаткового витка, розміщеного поверх допоміжного екрану, дозволяє сконцентрувати сили тяжіння, які забезпечують проведення

рихтувальних операцій на кузовних панелях автомобілів, в центральній частині робочої зони індукторної системи.

3. При введенні додаткового витка має місце зниження амплітуд діючих сил, що пояснюється сталістю величини струму, що подається на вхід індукторної системи, і прийнятим у розрахунках розподілом струму по витках, пропорційним назад їх індуктивностям. Для більш значущої концентрації сил у центрі робочої зони при збереженні або навіть збільшенні амплітуд збудливих сил тяжіння слід застосовувати відповідну схему живлення індукторної системи, що дозволяє регулювати амплітуди та розподіл струмів витками.

4. Особливо слід зазначити ефективну дієвість розглянутої індукторної системи при ввічленні лише «зовнішнього» та за відсутності «Внутрішнього» витка. Тут при достатній простоті конструктивного виконання у порівнянні з системою, що збуджується двома витками, мають місце досить високі значення сил тяжіння, що розвиваються, і їх середніх величин.

5. Вазначена більш висока силова ефективність системи за наявності лише «зовнішнього» витка порівняно із системою, де виток розташований у внутрішній порожнині, пояснюється відсутністю «провалу» у радіальному розподілі збудливих сил. Цей «провал» у конструкції з витком між листовими металами обумовлений його дію, що екранує, щодо сил тяжіння між індуктованими струмами.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ КУЗОВНИХ ПАНЕЛЕЙ

Даний розділ присвячений опису експериментів з вимірювання характеристик та силової апробації ІСПЕ – технічних засобів зовнішньої магнітно-імпульсного рихтування, що збуджуються соленоїдами із зовнішньої та внутрішньої сторони допоміжного екрану у робочій зоні інструменту.

Як показали теоретичні дослідження, даний спосіб збудження системи дозволяє значно збільшити ефективність ІСПЕ, яка в рамках поставлених завдань має визначатися двома основними складовими:

- максимумом однорідності просторового розподілу індукованих струмів;

- максимумом передачі енергії в обмотку технічного засобу

Проведені експерименти спрямовані насамперед на встановлення достовірності теоретичних висновків. Відповідні висновки зроблено на основі вимірювань збуджуваних вихрових струмів, оскільки їхня взаємодія відповідне до закону Ампера визначає силові показники власне ІСПЕ, а також вимірювань струмів в обмотці інструменту магнітно-імпульсного тяжіння листових металів.

Завершує експериментальні дослідження силова апробація «індукторних систем з притягуючими екранами», виконана за допомогою модельної конструкції індукторної системи з екраном, що притягує. Індукторна система з притягуючим екраном є варіантом реального інструменту магнітно-імпульсного тяжіння заданих ділянок тонкостінних металів, наприклад, у виробничих операціях рихтування листових покриттів автомобільних кузовів.

4.1 Експериментальне обладнання

Перелік обладнання у проведених експериментах включає такі позиції.

1. Джерело потужності в модельних експериментах - низьковольтний

генератор струмових імпульсів [131].

2. Силове джерело потужності - магнітно-імпульсна установка МІУС-2 з енергією, що запасається до ~ 2 кДж і максимумом напруги ~ 2000 В [23, 64, 100-111].

3. Модельні варіанти «індукторної системи з екраном, що притягує» (конструкції з внутрішнім і зовнішнім соленоїдами).

4. Зразки немагнітної листової сталі з однаковою товщиною ~ 1 мм.

5. Узгоджувальні пристрої, що забезпечують реалізацію низькочастотного режиму $\sim 1,8 \div 2$ кГц.



1 - низьковольтний генератор струмових імпульсів, 2 - осцилограф,
3 - комп'ютер

Рис. 4.1 Комплекс для проведення модельних експериментів



а)



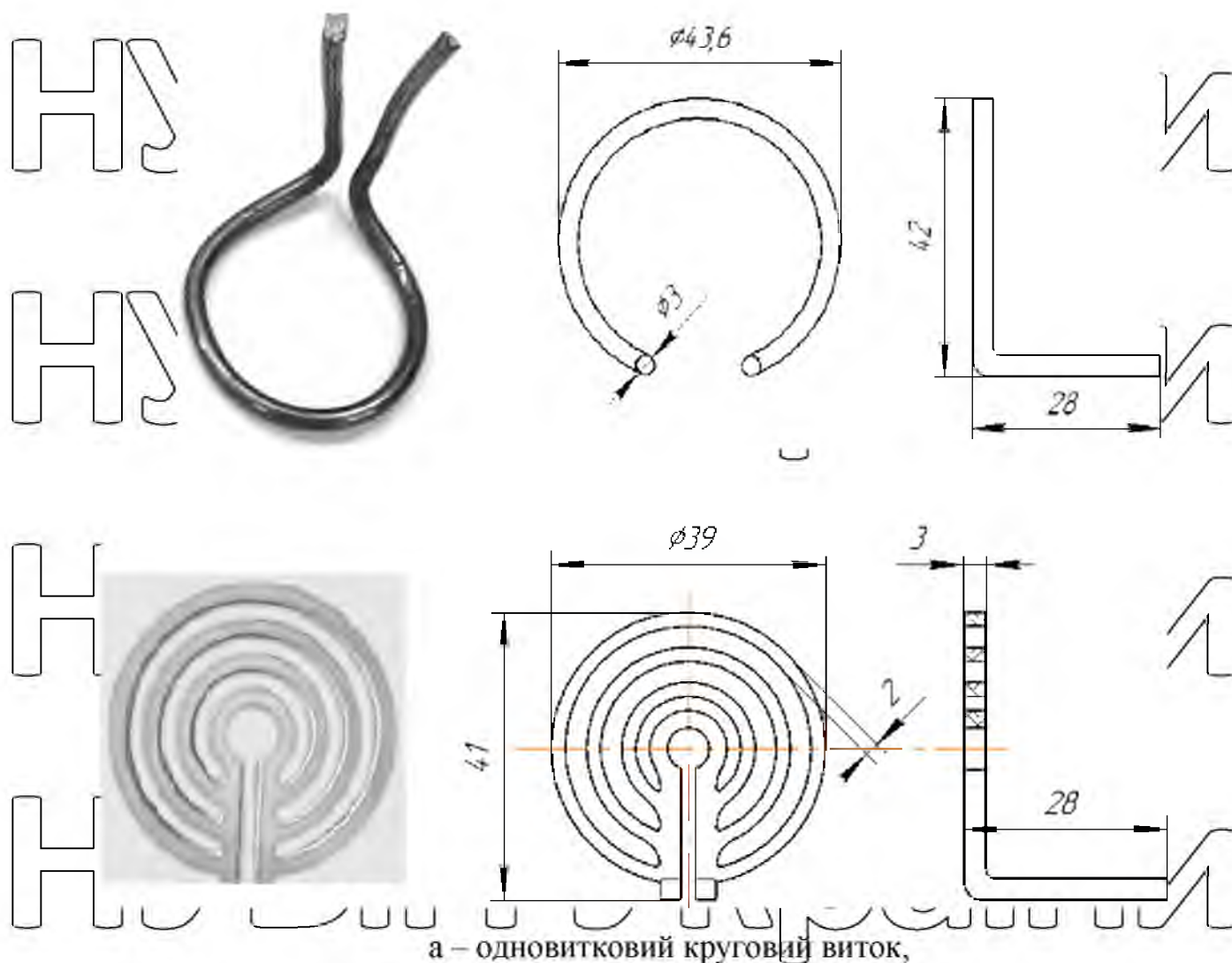
в)

а – «індукторна система з притягуючим екраном» (з боку внутрішнього витка впазу на площині екрану), б – узгоджувальний пристрій (внизу) із підключеною

ІСПЕ (вгорі), в – немагнітна листова сталь з висновками для вимірювання

розподілу щільності індукованого струму

Рис. 4.2 – Об'єкт експериментальних досліджень



а – одновитковий круговий виток,

б – круговий соленоїд з 4-х паралельних витків

Рис. 4.3 – Зразки збуджуючих соленоїдів

4.2. Модельні виміри

Основна мета справжніх експериментів – визначення ефективності введення в конструкцію ІСПЕ додаткового джерела магнітного поля у вигляді плоского кругового соленоїда, розміщеного із зовнішнього боку допоміжного екрану.

Реалізація поставленої мети передбачає такі виміри:

- розподіл індукованих струмів;
- коефіцієнт трансформації струму узгоджуючим пристроєм безпосередньо в обмотки соленоїдів - K , що кількісно визначає рівень передачі

енергії в обмотку ІСПЕ.

Розподіл індукованих струмів формує уявлення про характер розподілу збуджуваних сил тяжіння, які амплітуди встановлюються величиною коефіцієнта – До.

Експерименти здійснювалися при різних варіантах електричного підключення 2-х збуджувачих соленоїдів («включено – вимкнено», "вимкнений - включений", "обидва включені").

Завершальні виміри були проведені при підключенні зовнішнього соленоїда, представленого чотирма паралельними гілками рис. 4.3б [132-136].

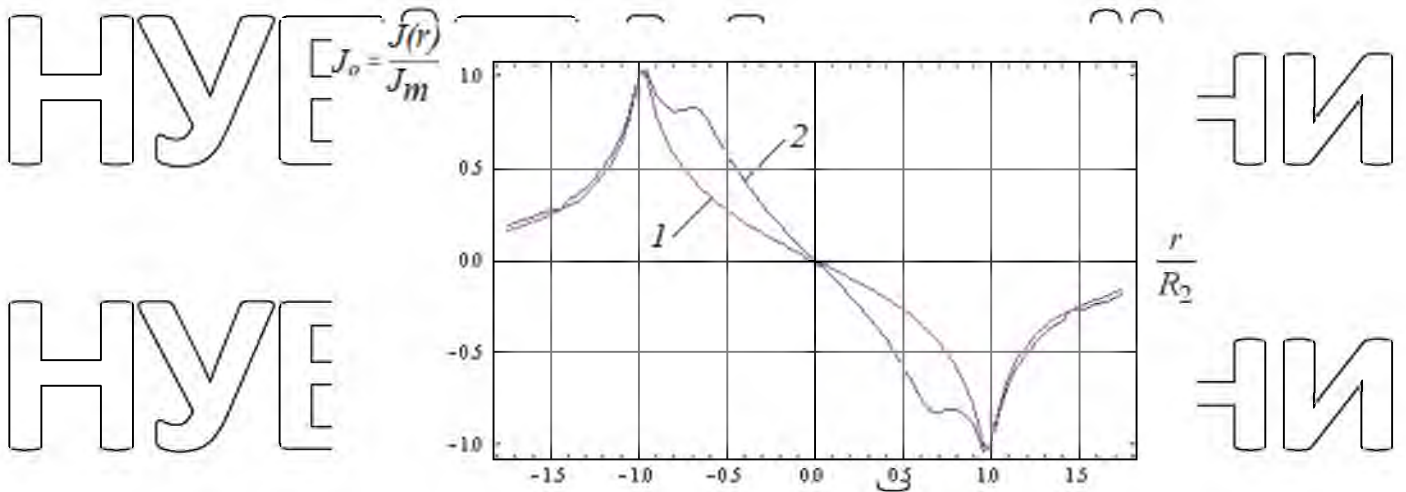
Розподіл індукованих струмів.

З апріорних міркувань очевидно, що для характеристики впливу додаткового джерела поля на радіальний розподіл індукованих струмів достатньо обмежитися вимірами лише в одному з елементів тяжіння ІСПЕ, наприклад, листового металу заготовки.

Джерело потужності – низьковольтний генератор

Результати вимірів показують, що підключення додаткового соленоїда із зовнішнього боку допоміжного екрану дозволяє сформувати більш рівномірний просторовий розподіл індукованих струмів і, як наслідок, більш рівномірний просторовий розподіл збудливих сил тяжіння.

Ілюстрацією позитивного впливу додаткового соленоїда на характер електромагнітних процесів, що протікають, є також розрахункові залежності на рис. 4.4.



1 - «основний індуктор - включений, додатковий індуктор - відключений»;
 2 - «основний та додатковий індуктори - включені»

Рис. 4.4 Розрахункові залежності радіальних розподілів лінійної щільності індукovanого струму у металі листової заготовки

(У відносних одиницях, нормування на максимум)

У останнє зауваження щодо результатів проведених вимірювань.

При введенні додаткового витка "вирівнювання" просторового розподілу індукovanого струму в листовій заготовці супроводжувалося зниженням його амплітуди на ~35%. Зазначена обставина стає зрозумілою, враховуючи, що додатковий виток екранувався металом доп. міжнього екрану. Як наслідок, послаблювалося сумарне магнітне поле, яке збуджується двома витками, порівняно з включенням лише одного з них - основного індуктора.

Як було зазначено раніше, досліджувана індукторна система підключається до узгоджувального пристрою, що забезпечує необхідний низькочастотний режим збудження і підвищення амплітуд діючих магнітних полів. Конструкція узгоджувального пристрою, що працює за принципом дії трансформатора, що підвищує струму, передбачає різні варіанти замкнутих контурів для протікання вторинних (індукованих) струмів. Наприклад, це контури (1-2) та (2-3) на рис. 4.8 відповідно до яких збуджувані вихрові струми частково замикаються власне у вторинній обмотці (контур (1-2)) і частково

протікають у робочій обмотці ІСПЕ (контур(2-3)). Очевидно, що ефективність її дієвості тим вища, чим рівень передачі енергії і, чим більша частина індуктованих струмів потрапляє в робочу обмотку інструменту [5, 6].

Типові осцилограми струмових імпульсів представлені на рис. 4.11.

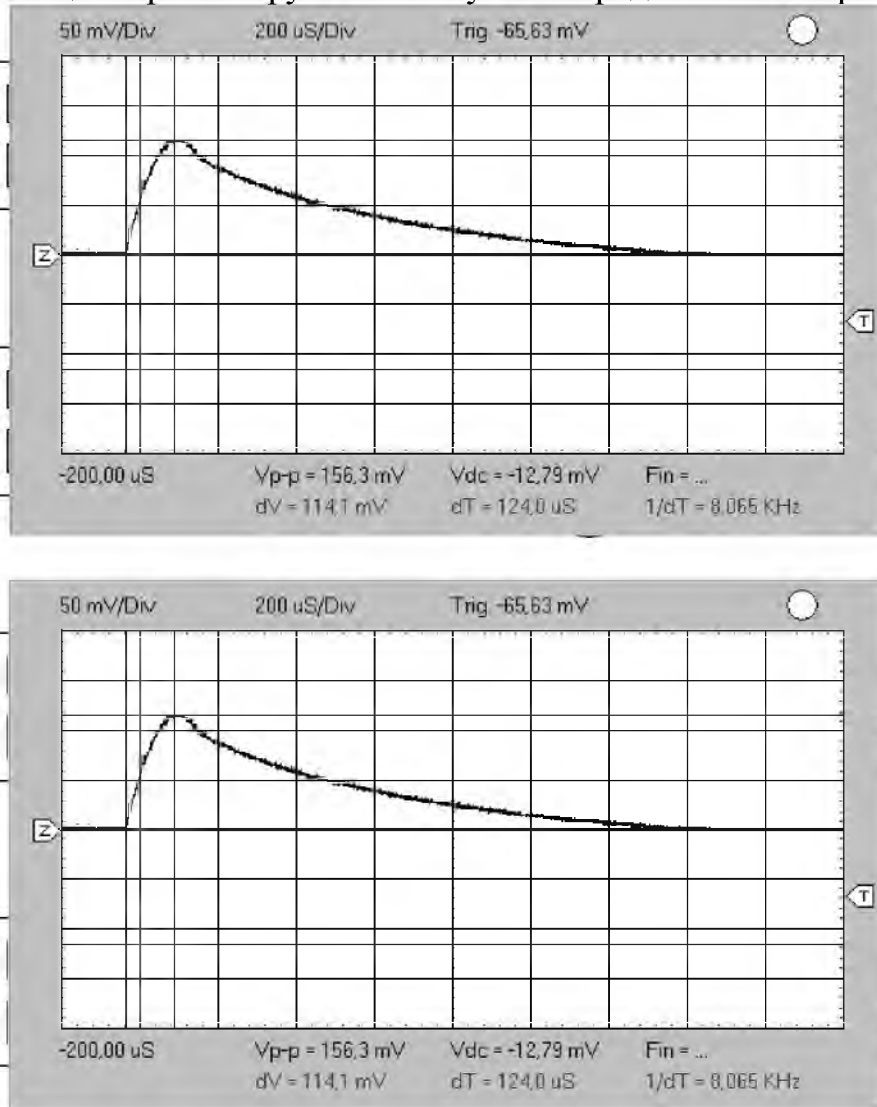


Рис. 4.5. Осцилограми струмових імпульсів

Результати вимірювань при різних варіантах включення конструкцій збудливих індукторів у дослідженій індукторній системі з екраном, що притягує, зведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати вимірів

Збудливі індуктори	Електричний вхід узгоджувального пристрою, J_{BX}, A	Електричний вхід ІСПЕ, $I_{СПЕ}, A$	K
Одновитковий основний	4678,1	14095,8	3,01
Одновитковий додатковий	3656,9	10156,9	2,78
Одновитковий основний та одновитковий додатковий	4469,4	13000,0	2,91
Одновитковий основний та додатковий круговий соленоїд з 4-х паралельних гілок	4504,5	18075,2	4,01

З даних табл. 4.1 випливає, що додатковий одновитковий індуктор практично не впливає на коефіцієнт трансформації. Відхилення його величини від найбільшого значення не перевищує 8%.

Введення в схему ІСПЕ додаткового кругового соленоїда з 4-х паралельних гілок призводить до підвищення рівня енергії, що трансформується в обмотку, на ~25%. Фізично, ця обставина пояснюється досить значним зменшенням повного опору обмотки ІСПЕ, представленої декількома паралельними гілками, порівняно з можливими шляхами замикання індукovanого струму металу вторинної обмотки узгоджувального пристрою.

В цілому, основні результати проведених вимірювань зводяться до наступним положенням:

- підключення додаткового соленоїда із зовнішнього боку допоміжного екрану в «індукторній системі з притягуючим екраном» дозволяє сформувати більш рівномірний розподіл індукванних струмів і, як наслідок, більш рівномірний просторовий розподіл збудливих сил тяжіння. Очевидно, цей ефект є результатом суперпозиції двох

просторово рознесених джерел магнітного поля;
 введення додаткового витка супроводжувалося зниженням амплітуди індукованого струму ~35%. Зазначена обставина обумовлена екрануванням частини магнітного поля, що збуджується, металом допоміжного екрану;

– конструкція додаткового джерела магнітного поля із зовнішнього боку допоміжного екрану істотно впливає величину коефіцієнта трансформації струму в ІСПЕ. Виконання його у вигляді кругового соленоїда з 4-х паралельних гілок дозволяє збільшити рівень енергії, що трансформується в обмотку інструменту тяжіння на ~25%.

У процесі експерименту виявилися відмінні риси запропонованої виробничої операції:

– рихтування здійснено із зовнішнього боку вм'ятини, що видаляється, що в реальній практиці означає відсутність необхідності в розбиранні пошкодженої конструкції кузовного покриття автомобіля;

– рихтування здійснено без пошкодження захисного лакофарбового покриття;

– найбільш ефективним режимом рихтування є режим з багаторазовим повторенням силових імпульсів тяжіння. При одноразовому впливі видимих змін у зміні вм'ятини немає;

якість рихтування, як ступінь вирівнювання рівня недеформованої частини поверхні, встановлюється робочою площиною інструменту, яка механічно обмежує процес тяжіння металу вм'ятини. При виробничій необхідності (наприклад, витягування заданого декоративного профілю) опуклість на рівній поверхні можна отримати за допомогою порожнистої прокладки між металом та інструментом.

Висновки у розділі 4

Основні результати проведених експериментів можна узагальнити такими положеннями.

1. Вимірювання характеристик:

– підключення додаткового соленоїда із зовнішнього боку допоміжного екрану в «індукторній системі з екраном, що притягує» дозволяє сформувати більш рівномірний просторовий розподіл збудливих сил тяжіння;

– введення додаткового витка супроводжується цілком очікуваним і зрозумілим зниженням амплітуди індукованого струму на $\sim 35\%$;

– конструкція додаткового джерела магнітного поля із зовнішнього боку допоміжного екрану істотно впливає величину коефіцієнта трансформації струму в ІСПЕ. Виконання його у вигляді кругового соленоїда з 4-х

паралельних гілок дозволяє збільшити рівень енергії, яка трансформується в обмотку інструменту тяжіння на $\sim 25\%$;

– у запропонованій конструкції інструменту максимум коефіцієнта трансформації становить $3,85 \div 4,01$.

2. Експериментальна рихтування:

– проведено успішну практичну апробацію реального інструменту зовнішньої магнітно-імпульсного рихтування – «індукторної системи з притягуючим екраном», конструкція якої відрізняється наявністю двох джерел магнітного поля, розміщених на поверхнях додаткового екрану;

– найбільш ефективним режимом магнітно-імпульсного рихтування є режим з багаторазовим повторенням силових імпульсів тяжіння;

– практично підтверджено позитивні особливості магнітно-імпульсного рихтування заданих ділянок кузовного покриття автомобіля:

а) операція здійснена із зовнішнього боку вм'ятини, що видаляється, що в реальній практиці означає відсутність необхідності в розбиранні пошкодженої конструкції кузовного покриття автомобіля;

б) операцію рихтування здійснено без пошкодження захисного лакофарбового покриття;

в) операція дозволяє регулювати ступінь витягування металу на заданій ділянці зразка, що деформується, залежно від умов поставленого виробничого завдання.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз як традиційних методів рихтування, так і прогресивних магнітно-імпульсних методів відновлення кузовних елементів автомобілів. Визначено, що сучасне промислове виробництво вимагає подальшого розширення переліку операцій ремонту, де магнітно-імпульсні методи мають незаперечні переваги. Особливе місце тут займають виробничі операції з магнітно-імпульсного тяжіння заданих ділянок плоских металевих поверхонь - зовнішня безконтактна магнітно-імпульсна рихтування. Показано, що виникла потреба у розробці, створенні та вдосконаленні як методів зовнішнього кузовного ремонту з використанням енергії імпульсних магнітних полів, так і технічних засобів, які дозволяють ефективно реалізувати ці методи.

2. Проведено теоретичні дослідження електромагнітних процесів за низьких частот $f = 2\text{кГц}$ сили тяжіння, зумовлені дією закону Ампера (66%), суттєво перевищують сили магнітного тяжіння (26%) та сили Лоренцевського відштовхування (8%). Отримано, що у діапазоні робочих частот від $0,5\text{кГц}$ до 2кГц істотно зростають сили електродинамічної природи (Ампера і Лоренца в $4\div 8$ разів), сили магнітного тяжіння змінюються несуттєво (не більше, ніж $\sim 20\%$). Показано, що як для магнітних, так і для немагнітних листових сталей кузовних панелей автомобілів тяжіння преважес над відштовхуванням в діапазоні робочих частот діючих полів - $\leq 2\text{кГц}$, так при струмі індуктора $\sim 50\text{кА}$ результуюче тяжіння для рихтування може досягати 230кПа .

Розроблено рішення щодо конструктивного виконання технічного засобу зовнішньої безконтактної рихтування - «індукторна система з притягуючим екраном», що збуджується полем двох кругових витків. Проведено чисельні оцінки внаслідок яких визначено, що ведення додаткового витка, розміщеного поверх допоміжного екрану, дозволяє сконцентрувати сили тяжіння в центральній частині робочої зони індукторної системи. Саме при подачі струму на вхід з амплітудою $\sim 75\text{кА}$ та розподілі по витках щодо $3/2$ (внутрішній/зовнішній) сумарна величина сили становить вже $\sim 1,04\text{кН}$ при

середньому значенні розподіленої сили $\sim 0,25$ МПа. Виконання додаткового витка у вигляді кругового соленоїда з 4-х паралельних гілок дозволяє збільшити рівень енергії, що трансформується на обмотку інструменту тяжіння, на $\sim 25\%$.

3. Проведено експериментальну апробацію розроблених конструкцій технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування елементів кузовних панелей автомобілів, у запропонованій конструкції інструменту досягнуто максимум коефіцієнта трансформації становить $3,85\text{--}4,01$, а це дозволяє здійснити операцію без пошкодження захисного лакофарбового покриття без розбирання та з контрольованою вм'ятини в залежності від умов поставленого виробничого завдання.

В результаті проведених досліджень мети магістерської роботи було досягнуто – розроблено та вдосконалено інструменти зовнішньої рихтування на основі методів магнітно-імпульсного впливу, що дозволяють підвищити ефективність рихтування кузовних панелей легкових автомобілів, виготовлених як з феромагнітних, так і немагнітних металів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Батигін Ю. В. Розрахунок полів та струмів в індукторній системі з притягуючим екраном та додатковим витком як інструменту рихтування / Ю. В. Батигін, Є. А. Чаплигін, С. А. Шиндерук // Електротехніка і електромеханіка. – Х., 2015. – № 1. – С. 57–62.
2. Батигін Ю. В. Аналіз електромагнітних процесів в індукторній системі – інструмент рихтування автомобільних кузовів / Ю. В. Батигін, Є. А. Чаплигін, С. А. Шиндерук // Електротехніка і електромеханіка. – Х., 2015. – № 2. – С. 53–56.
3. Батигін Ю. В. Експериментальні дослідження процесів в індукторній системі з притягуючим екраном при введенні додаткового витка / Ю. В. Батигін, Є. А. Чаплигін, С. А. Шиндерук // Електротехніка та електромеханіка. – Х., 2014. – № 5. – С. 58–61.
4. Рихтування кузовних панелей індукційною індукторною системою циліндричної геометрії з тонкостінним екраном / А. В. Ігнатів, С. А. Шиндерук, Є. А. Чаплигін, О. С. Сабокар // Вісник ХНАДУ. - Х., 2014 - Вип. 64. - С. 30 - 36.
5. Шиндерук С. А. Універсальний інструмент магнітно-імпульсного рихтування у низькочастотному режимі діючих полів / С. А. Шиндерук // Вісник Національного технічного університету «ХПУ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х.: НТУ «ХП», - 2013. – № 29 (1002). - 164 с. - С. 86-92.
6. Пат. 92037 України, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів багатовітковою круговою індукційною індукторною системою / Батигін Ю. В., Ігнатів О. В., Чаплигін Є. О., Шиндерук С. О., Сабокар О. С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. - № u 2014 02116; заявл. 03.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. №14.
http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AB14_1/index.html. – Назва 3

екрана.

7. Батигін Ю. В. Розрахунок електродинамічних процесів в індукційній індукторній системі з немагнітними металами / Ю. В. Батигін, А. В. Гнатов, С. А. Шиндерук // Науково-теоретичний журнал «Вісник БДТУ ім. В. Г. Шухова». - Білгород, 2014. - № 3. - С. 169-174.

8. Аналіз процесів в індукційній індукторній системі з ідентичними листовими немагнітними металами: materialy X Mezinárodní vědecko-praktická konference [«Moderní vymoženosti vědy-2014» Technické vědy]. (Praha, 27 січня – 05 лютого 2014 року) / О. В. Гнатов, С. А. Шиндерук, М. В. Барбашова. - Praha : Publishing House "Education and Science" sro, 2014.

Díl 39. – 88 сторін. - S. 8 - 13.

9. Розрахунок розподілу індукованих струмів за товщиною листового металу в симетричній індукційній індукторній системі: збірник праць III Всеросійської науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів [«Енергоефективність та енергобезпека виробничих процесів»], (Тольятті, 15-17 квітня 2014). В. Гнатов, С. А. Шиндерук. - Тольятті: ТДУ, 2014. – 371 с. - С. 243-247.

10. Розрахунок індукованих струмів та напруженостей у симетричному універсальному інструменті магнітно-імпульсного рихтування: збірка матеріалів V Міжнародної науково-практичної конференції [«Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2013)»], (Херсон, 28-30 травня, 2013 р.) / Шиндерук С. А. - Херсон: Херсонська державна морська академія, 2013. - Т.2. - 240 с. - С. 167 - 170.

11. Імпульсні магнітні поля у ремонтних технологіях сучасності [«Перспективні інновації в науці, освіті, виробництві та транспорті 2014»] зб. наук. праць за матеріалами науково-практичної інтернет-конференції (Одеса, 16-26 грудня 2014 р.) / О. В. Гнатов, С. А. Шиндерук // Збірник наукових праць SWorld. Вып. №4(37). Т. 2. - Иваново: Научный світ, 2014. – 106 с. - С. 40 - 44.

12. Пат. EP 1341621 B1 Німеччина, B21D 1/06. Planishing device and

method / Meichtry Ralph; заявник та патентовласник Rentsch & Partner. -

№00977335.9; заявл. 05.12.2000; опубл. 13.06.2002.

13. Пат. 6,874,347 B2 USA (США), B21D 1/06. Planishing device and method / Meichtry Ralph; заявник та патентовласник Meichtry Ralph. - № 10/258,397

; заявл. 13.01.2002; опубл. 05.04.2005.

14. Пат. WQ 03/008125 A1, B21D 1/06. Device and method for removing dents in sheet steel parts / Meichtry Ralph; заявник та патентовласник IP&T Rentsch & Partner. - № 1354/01; заявл. 19.07.2002; опубл. 30.01.2003.

15. Пат. EP 1459814 B1 Німеччина, B21D 1/06. Пристрій для переміщення дентів від мети металеві Meichtry Ralph; заявник та патентовласник Rentsch Rudolf A., Rentsch & Partner. - № 04006194.7; заявл. 17.03.2003; опубл. 16.03.2004.

16. Пат US WO/2006/119661. Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; заявник та патентовласник Rentsch & Partner. - № 60/680,303; заявл. 11.05.2006; опубл. 16.11.2006.

17. Пат. US 2008/0163661 A1 USA (США), Дент ремонтування методу і пристрою / Meichtry Ralph, Kouba Ivan; заявник та патентовласник Ostrolenk faber gerb & soffen, New York. - № 11/910,788; заявл. 11.05.2006; опубл. 10.07.2008.

18. Welcome to BETAG Innovation // [Електронний ресурс] - 2013. Режим доступу: <http://www.betaginnovation.com>. - Назва з екрана.

19. Батигін Ю. В. Історичні аспекти виникнення магнітно-імпульсного тяжіння тонкостінних листових металів МІОМ // Ю. В. Батигін, А. В. Гнатів // Електротехніка та електромеханіка. - Х., 2011. - № 4. - С. 10-12.

20. Гнатів А. В. Аналіз електродинамічних процесів в циліндричних індукторних системах-інструментах магнітно-імпульсного рихтування: монографія / А. В. Гнатів. - Харків: ХНАДУ, 2013. - 292 с.

21. Туренко А. Н. Імпульсні магнітні поля для прогресивних

технологій. Т.3. Теорія та експеримент тяжіння тонкостінних металів імпульсними магнітними полями: монографія / А. Н. Туренко, Ю. В. Батигін, А. В. Гнатів. - Харків: ХНАДУ, 2009. - 240 с.

22. Батигін Ю. В. Імпульсні магнітні поля для прогресивних технологій. Магнітно-імпульсні технології безконтактної рихтування кузовних елементів автомобіля: монографія / А. В. Гнатів, Ю. В. Батигін, Е. А. Чаплігін. - Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 242 с.

23. Гнатів А. В. Концепція відновлення кузовних панелей автомобілів методами зовнішньої безконтактної рихтування: дис. ... доктора техн. наук:

05.22.20 / Гнатів Андрій Вікторович. - Х., 2014. - 391 с.

24. Синельников А. Ф. Кузова легкових автомобілів: обслуговування та ремонт / Синельников А. Ф., Штоль Ю. Л., Скрипніков Є. А. - М.: Транспорт, 1995. - 256 с.

25. Кузовні роботи: [посібник з самостійного ремонту. Кольорові фотографії]. - Дніпропетровськ: Моноліт, 2011. - 164 с.

26. Ремонт та фарбування кузовів автомобілів [підготовка до фарбування, зварювання, рихтування та багато іншого. Практичний посібник]; за ред. С. Афоніна. - Ростов-на-Дону: "ПОНЧИК". 2003. - 140 с.

27. Шкунов І.В. Кузовний ремонт у гаражі: [ілюстрований практичний посібник] / І.В. Шкунів. - М.: ТОВ "Світ Автокниг", 2009. - 136 с.

28. Пат. 6,538,250 B1 USA (США), B21D 1/12. Apparatus and method for vacuum dent repair / Borchert Donald Paul; заявник та патентовласник Dent Defyer Inc. - № 09/707,562; заявл. 06.11.2000; опубл. 25.03.2003.

29. Пат. 5,734,256 USA (США), G05F 1/70. Apparatus for protection of power-electronics in series compensating systems / Einar V. Larsen, Allen M. Ritter; заявник та патентовласник General Electric Company, Fort Wayne. -

№ 454,671; заявл. 31.05.1995; опубл. 31.03.1998.

30. Зварювання KRIPTON // [Електронний ресурс] - 2015. - Режим доступу: <http://krypton.ua/a21622-spotter.html>. - Назва з екрана.

31. IntelliDent Paintless Dent Repair // [Електронний ресурс] – 2015. – Режим доступу: <http://www.intelldentpaintlessrepair.com> – Назва з екрана.

32. KUZOVSPEC // [Електронний ресурс] – 2015. – Режим доступу: <http://kuzovspec.ru/remont/vakuumnaya-rixtovka-kuzova>. – Назва з екрана.

33. Пат. 7,124,617 B2 USA (США), B21J 15/24 B21D 5/00. Magnetic dent removal device, method and kit / Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe; заявник і власник патенту Eric Richard Satterlee, Wayne Tanabe, Hickory, Arlington Heights. - № 10/341,611; заявл. 14.01.2003; опубл. 24.10.2006.

34. Пат. 7,143,627 B2 USA (США), B21J 15/24. Apparatus and method for removing dents from metal / James M. Akins; заявник та патентовласник James M. Akins, Dublin. - № 11/138,057; заявл. 26.05.2005; опубл. 05.12.2006.

35. Пат. 4,252,008 USA (США), B21D 26/14. Apparatus for removing dents from automobile bodies and the like / William L. Dibbens; заявник та патентовласник William L. Dibbens. - № 12/648; заявл. 16.02.1979; опубл. 24.02.1981.

36. Пат. 6,014,885 USA (США), B21D 1/06. Dent removal apparatus and method of operation / Gerald J. Griffaton; заявник та патентовласник Gerald J. Griffaton, Berwyn. - № 08/958,424; заявл. 27.10.1997; опубл. 18.01.2000.

37. Electromagnetic Dent Removal: onsite repairs in minutes // [Електронний ресурс] – 2015. – Режим доступу: http://www.boeing.com/commercial/aviationservices/brochures/34241_ElectDentRemoval04-05.pdf.

38. Використання магнітно-імпульсних технологій для ремонту та відновлення транспортних засобів. Дев'ята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба [«Новітні технології для захисту повітряного простору»], (Харків, 17 – 18 квітня 2013 р.) : А. В. Гнатов, С. О. Шиндерук, І. С. Трунова, Щ. Ст Аргун, М. Ст Барбашова. - Харків: ХУПС ім. Т. Кожедуба, 2013. - 424 с. - С. 248.

39. Безконтактні магнітно-імпульсні технології для рихтування кузовів транспортних засобів: матеріали п'ятої міжнародної науково-практичної

конференції [«Проблеми та перспективи розвитку євразійських транспортних систем»], (Челябінськ, 17–18 травня, 2013 р.) / О. В. Гнатов, І. В. Аргун, І. С. Трунова, С. А. Шиндерук. - За ред. О. Н. Ларіна, Ю. В. Різдвяного. -

Челябінськ: Видавничий центр ЮУрГУ, 2013. - 313 с. - С.71-75.

40. Зовнішня рихтування кузовних панелей автомобілів із застосуванням технологій магнітно-імпульсного обробки металів: збірник наукових праць за матеріалами міжнародної заочної науково-практичної конференції № 5 (5) [«Актуальні напрямки наукових досліджень ХХІ століття:

теорія та практика»], (17-18 грудня 2013 р.) / О. В. Гнатов, Є. А. Чаплигін, С. А.

Шиндерук. – Воронеж: «ФДБОУ ВПО ВГЛТА», 2013. – 499 с. С. 178-183.

41. Експериментальні дослідження інструменту безконтактної магнітно-імпульсного рихтування на основі суміщеного узгоджувального пристрою / Ю. В. Батигін, А. В. Гнатов, С. А. Шиндерук [та ін.] // Вісник ХНАДУ. – Х., 2013. – Вип. 60. - С. 049 - 052.

42. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно імпульсного обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хавін В. Л.; заявник та патентовласник ХПІ. - № 2004010542; заявл. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. №2.

43. Баранов М. І. Петро Леонідович Капіца – основоположник техніки сильних імпульсних магнітних полів / М. І. Баранов // Електротехніка та електромеханіка. - 2005. - № 3. - С. 5-8.

44. Чаплигін Є. А. Розробка циліндричних індукційних індукторних систем для магнітно-імпульсного тяжіння тонких металевих листів: дис. ... кандидата техн. наук : 05.09.13 / Чаплигін Євген Олександрович. - Харків, 2009. - 169 с.

45. Пат. 3,196,649 USA (США), Devices for metal-forming by magnetic tension / Harold P. Furth; заявник та патентовласник Advanced Kinetiks, Inc., Costa Mesa, California. - № 173,680; зав'ял. 16.02.1962; опубл. 27.07.1965.

46. Пат. 3,998,081 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic dent

puller/Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявник та патентовласник The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 489,290; заявл. 17.07.1974; опубл. 21.12.1976.

47. Пат. 4,148,091 USA (США), H02M 5/40. Electromagnetic force machine with universal portable power supply / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявник та патентовласник The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 864,735; заявл. 27.12.1977; опубл. 03.04.1979.

48. Пат. 4,986,102 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic dent remover with tapped work coil / Hendrickson Glen I., Hansen Karl A.; заявник та патентовласник The Boeing Company, Seattle, Wash. - № 355,563; заявл. 23.05.1989; опубл. 22.01.1991.

49. Пат. 5,046,345 USA (США), B21D 1/06. Power supply for electromagnetic proof load tester and dent remover / Zieve Peter B.; заявник та патентовласник Peter B. Zieve. - № 451,106; заявл. 15.12.1989; опубл. 10.09.1991.

50. Electromagnetic Dent Removal [Електронний ресурс] – 2012. – Режим доступу: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.

51. Electromagnetic Dent Removal [Електронний ресурс] – 2013. – Режим доступу: <http://www.fluxtronic.com>.

52. Direction Change of Force Action upon Conductor un Frequency Variation of Acting magnetic Field: proceedings of 1-st International Conference [«High Speed Metal Forming»], (Dortmund, March 31/April 1, 2004) / Yц. V. Batygin, V.I Lavinsky, LT Khimenko. - Dortmund, Німеччина, 2004. - P. 157-160.

53. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного обробки тонкостінних металевих заготовок / Батігін Ю. В., Лавінський В. І., Хіменко Л. Т.; заявник та патентовласник ХПІ. - № 2004/010512; заявл. 23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. №5.

54. Батігін Ю.В. Фізичні засади можливих напрямів розвитку магнітно-імпульсного обробки тонкостінних металів / Ю.В. Батігін, В.І. Лавінський, Л.Т. Хіменко // Електротехніка та електромеханіка. ОХ., 2004. - № 2. - С 80-84.

55. Батігін Ю.В. Імпульсні магнітні поля для прогресивних технологій

/ Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хіменко Л. Т. – Т. 1; за ред. проф. Ю.В. Батигіна. – [2-ге вид.] – Харків: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.

56. Лабораторія електромагнітних технологій [Електронний ресурс]

2013. – Режим доступу: <http://electromagnetic.com.ua>.

57. Аргун І. В. Розробка магнітно-імпульсного установки для зовнішньої безконтактного рихтування автомобільних кузовів: дис. ...

кандидата техн. наук : 05.22.20 / Аргун Ірина Валеріївна. – Харків, 2014. – 162 с.

58. Трунова І. С. Розробка технічних засобів зовнішньої рихтування

кузовних панелей легкових автомобілів: дис. ... кандидат техн. наук : 05.22.20 /

Трунова Ірина Сергіївна. - Харків, 2014. - 178 с.