

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Буссі Салам

УДК 620.179.16: 620.179.17

ДИСЕРТАЦІЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин
15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ Буссі Салам

Науковий керівник
Сучков Григорій Михайлович,
доктор технічних наук, професор

Харків - 2020

АНОТАЦІЯ

Буссі Салам. Електромагнітно-акустичні перетворювачі для ультразвукового контролю металовиробів. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».

Дисертація присвячена розробці нових ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів з джерелом імпульсного поляризованого магнітного поля, методів підвищення чутливості контролю та діагностики металовиробів з використанням перетворювачів такого типу.

Виконано аналітичний огляд та аналіз сучасних засобів і методів контролю та діагностики електромагнітно-акустичним методом [1–3] феромагнітних і електропровідних або тільки електропровідних виробів в умовах дії постійних та імпульсних поляризованих магнітних полів з урахуванням наявності когерентних завад різного типу, технічного рівня сучасних електромагнітно – акустичних перетворювачів, схемотехнічних рішень засобів їх живлення, прийому з виробів ультразвукових імпульсів та їх обробки, визначення відомих переваг, недоліків та можливостей використання в дослідженнях і розробках.

Визначені та обґрунтовані напрямки дисертаційного дослідження: розробка електромагнітно-акустичного перетворювача у вигляді спрощеної одновиткової моделі [4] джерела магнітного поляризованого поля з феромагнітним осердям та високочастотною котушкою, яка розміщена між осердям та металовиробом; шляхом моделювання [5] розподілення індукції поляризованого магнітного поля на торці осердя джерела магнітного поля та в поверхневому шарі як феромагнітного так і неферомагнітного металовиробу визначено особливості розташування високочастотної

катушки індуктивності під джерелом магнітного поля для ефективного збудження зсувних ультразвукових імпульсів (в центральній частині торця феромагнітного осердя) або поздовжніх ультразвукових імпульсів (біля периферійної частини торця феромагнітного осердя) [6].

Збільшення кількості витків катушки намагнічування при наявності феромагнітного осердя призводить до значного збільшення часу перехідних процесів при включенні живлення імпульсного джерела поляризованого магнітного поля і при його виключенні. В результаті час дії імпульсу живлення збільшується до 1 мс і більше, що призводить до збільшення сили притягування ЕМАП до феромагнітного виробу, додаткових втрат електроенергії, погіршенню температурного режиму перетворювача. Для зменшення часу дії імпульсу живлення джерела магнітного поля необхідно зменшувати кількість витків катушки намагнічування, але це призводить до зменшення величини магнітної індукції навіть при наявності феромагнітного осердя. В результаті раціонального вибору конструкції джерела магнітного поля встановлена необхідність виконання його катушки намагнічування плоскою двовіконною трьохвитковою і виготовляти з високоелектропровідного високотеплопровідного матеріалу [7-9]. Осердя повинно бути розміщено в вікнах катушки намагнічування тільки торцями. В результаті час дії імпульсу намагнічування зменшено до 200 мкс, що достатньо для контролю виробів товщиною до 300 мм.

Високочастотна катушка індуктивності виконана з двома лінійними робочими ділянками, які розташовуються під вікнами катушки намагнічування [9]. При протилежних напрямках високочастотного струму в цих робочих ділянках в поверхневому шарі виробу збуджуються синфазні потужні імпульси зсувних ультразвукових хвиль. При цьому відношення збуджуваних амплітуд зсувних та поздовжніх імпульсів перевищує 30 дБ. Тобто когерентні імпульси поздовжніх хвиль при контролі луна методом практично не будуть впливати на результати діагностики феромагнітних виробів.

Розроблені варіанти конструкцій електромагнітно-акустичних перетворювачів з одновитковими [7], двовитковими [8] та трьохвитковими [9] котушками намагнічування джерела імпульсного поляризованого магнітного поля. При одновитковій котушці [7] перехідні процеси при включенні імпульсу живлення мінімальні. Проте необхідно збуджувати в котушці струм з силою в кілька кА, що ускладнює температурний режим перетворювача та апаратуру живлення. При трьохвитковій котушці [9] намагнічування амплітуда донних імпульсів по відношенню до амплітуди завад перевищує 24 дБ, що дозволяє проводити контроль та діагностику значної кількості металовиробів. При використанні шихтованого осердя [9] відношення амплітуд корисного сигналу і шуму збільшилося до 38 дБ, що дає можливість проводити ультразвуковий контроль луна-методом.

Розроблено метод [10] ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю феромагнітних виробів, суть якого заключається в збудженні ультразвукових імпульсів шляхом формування в поверхневому шарі феромагнітного виробу двох рядом розташованих короткочасно намагнічених ділянок з протилежним напрямком векторів магнітної індукції поляризованого поля, збудженні в намагнічених ділянках пакетних імпульсів електромагнітного поля з протилежно направленими векторами напруженості тривалістю в кілька періодів високої частоти заповнення, при цьому збудження імпульсів електромагнітного поля виконують в момент часу, який дорівнює часу перехідних процесів з встановлення робочої величини індукції поляризованого магнітного поля, а прийом ультразвукових імпульсів відбитих з виробу виконується в період часу t_{np} , який визначається за виразом $T - t_1 - t_2 - t_3 < t_{np} = t_1 + t_2 + t_3 + 2H/C$, де T – тривалість імпульсу намагнічування; t_1 – час перехідних процесів з встановлення робочої величини індукції поляризованого магнітного поля; t_2 – час дії пакетного імпульсу електромагнітного поля; t_3 – час затухаючих коливань в плоскій високочастотній котушці індуктивності; H – товщина виробу або відстань в об'ємі виробу, які підлягають ультразвуковому

контролю; C – швидкість поширення зсувних ультразвукових хвиль в матеріалі виробу.

Встановлено [9], що завади в феромагнітному осерді, обумовлені ефектом Баркгаузена та магніострикційним перетворенням електромагнітної енергії в ультразвукову при збудженні ультразвукових імпульсів, практично виключаються за рахунок виготовлення осердя шихтованим, матеріал пластин осердя повинен мати низький коефіцієнт магніострикційного перетворення, пластини осердя повинні бути орієнтовані перпендикулярно провідникам робочих ділянок плоскої високочастотної котушки індуктивності, а також заповненням щілин між пластинами осердя рідиною із значною густиною, наприклад гліцерином.

Показано, що чутливість прямих ЕМА перетворювачів з імпульсним намагнічуванням при живленні розробленим генератором пакетних зондуючих високочастотних імпульсів [11] та прийомі малошумлячим підсилювачем [12] забезпечують виявлення плоскодонних відбивачів діаметром 3 мм і більше при частоті зондування 40 Гц, піковому високочастотному струмі 120 А, частоті зсувних лінійно поляризованих ультразвукових коливань 2,3 МГц, тривалості високочастотного пакетного імпульсу 6...7 періодів частоти заповнення, тривалості імпульсу намагнічування 200 мкс, густині струму намагнічування 600 А/мм² та при зазорі між ЕМАП і виробом 0,2 мм [9]. При цьому амплітуда луна імпульсу відбитого від дефекту по відношенню до амплітуди завод досягає 20 дБ.

Розроблені ЕМАП захищені 2 патентами на корисну модель.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, ультразвукові імпульси, дефект, діагностика, електромагнітно-акустичний, перетворювач, імпульсне джерело магнітного поля, плоска котушка намагнічування, феромагнітне шихтоване осердя, плоска високочастотна котушка, генератор зондуючих імпульсів, посилювач, завади.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Салам Буссі. Генератор потужних високочастотних пакетних імпульсів струму для живлення ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів / Салам Буссі, Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю., Плеснецов С.Ю. // *Методи та прилади контролю якості*. – 2019 - №2 (43). - С. 88–95.

2. Salam Boussi. Determination of the reliability of control of curved surfaces by eddy current transducer / Svetlana Tiupa, Igor Tiupa, Salam Boussi // *Український метрологічний журнал*. – 2019. - № 3. – С. 57-61. (НМБ Web of Science Core Collection).

3. Salam Boussi. Electromagnetic-acoustic transducers for ultrasonic measurements, control and diagnostic of metal products / Salam Bussi, G.M. Suchkov, R.P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek, S.Yu. Plesnetsov // *Український метрологічний журнал*. – 2019. – № 4. – С. 41-49. (НМБ Web of Science Core Collection).

4. Салам Буссі. Особливості використання механізмів електромагнітно-акустичного перетворення при контролі якості прокатних виробів / Салам Буссі // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків, 2019. - № 11 (1336). - С. 70–75.

5. Салам Буссі. Современное состояние методов и средств ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно-акустических преобразователей / Салам Буссі, Сучков Г.М., Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю. , Плеснецов С.Ю. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків, 2019. - № 12 (1337). - С. 63-69.

6. Салам Буссі. Практичні розробки електромагнітно-акустичних перетворювачів / Салам Буссі, Плеснецов С.Ю // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків, 2019. - №26 (1351) – С. 57-65.

7. Салам Буссі. Моделювання поляризованого магнітного поля електромагнітно-акустичного перетворювача електромагнітної енергії в

ультразвукову / Сучков Г.М., Салам Буссі // Тези 19 міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатики та моделювання». 11-16 вересня 2019 р. - Кароліно-Бугаз. – С. 79.

8. Салам Буссі. Ультразвуковий перетворювач для безконтактного контролю виробів з феромагнітних матеріалів. WayScience / Салам Буссі // Матеріали 1 Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: літні диспути». 1-2 серпня 2019 р. – Дніпро. - С. 620–624.

9. Салам Буссі. Потужний електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукового контролю металовиробів / Салам Буссі // Матеріали 3-ї конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі». 17-19 вересня 2019 р. – Київ: НТУУ «КПІ». - С.50-51.

10. Салам Буссі. Малошумлячий полосовий посилювач для електромагнітно-акустичного перетворювача що контролює металовироби / Салам Буссі // Тези доповіді на VIII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасний рух науки». 3-4 жовтня 2019 р. – Дніпро, – С. 209–213.

11. Салам Буссі. Прямий синфазний електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукового контролю виробів з феромагнітних матеріалів лінійно поляризованими ультразвуковими хвилями / Салам Буссі // Тези 9-ої Національної науково-технічної конференції і виставці «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». 19-21 листопада 2019 р. – Київ, – С. 223-226.

12. Salam Boussi. The rationale of pulse magnetic field source EMAT design / Salam Bussi, S.Yu. Plesnetsov // 7-ма Всеукраїнська науково - практична конференція студентів і молодих учених "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання" 19-20 листопада 2019 р. - Івано-Франківськ. – С. 100-103.

13. Salam Boussi, Plesnetsov S. Yu. Requirements for non-contact

ultrasonic transducers for determination of properties of ferromagnetic materials / Salam Bussi, Plesnetsov S. Yu. // XIV Міжнародній науковій конференції «Фізичні явища в твердих тілах». 3-6 грудня 2019 р.– Харків: ХДУ ім. Каразіна. – С. 49.

ABSTRACT

Boussi Salam. Electromagnetic - acoustic transducers for ultrasonic testing of metalware. On the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering (Doctor of Philosophy), specialty 05.11.13 "Devices and methods of testing and determination of composition of substances" - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

The dissertation is devoted to development of new ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers with a source of pulsed polarizing magnetic field, methods of sensitive testing and diagnostics of metalware with the use of transducers of this type.

Analytical review and analysis of modern means and methods of testing and diagnostics via electromagnetic-acoustic method [1-3] of ferromagnetic and electrically conductive or strictly electrically conductive products under conditions of impact of constant and pulse polarizing magnetic fields taking into account the presence of coherent interferences of different types, technical level of modern electromagnetic circuits, means of their power supply, reception of ultrasonic pulses from metalware and their processing, determination of known advantages and disadvantages, and opportunities of their use in research and development.

The direction of the research is defined and justified: development of electromagnetic-acoustic transducer in the form of a simplified single-wind coil model [4] of a source of a magnetic polarizing field with a ferromagnetic core and a high-frequency coil, which is located between the core and the sample; by modeling [5] the distribution of induction of polarizing magnetic field at the end face of the core of the magnetic field source and in the surface layer of both ferromagnetic and non-ferromagnetic metallurgy the features of the location of the high frequency coil of inductance under the magnetic field source are

effectively determined for the effective excitation of shear ultrasonic pulses (near the peripheral end of the ferromagnetic core) [6].

The increase in number of winds of magnetization coil in presence of a ferromagnetic core leads to a significant increase in time of transients during the process of powering of a pulsed source of a polarizing magnetic field and during its switching off. As a result, the duration of the power pulse increases to 1 ms or more, which leads to an increase in the force of attraction of EMAP to the ferromagnetic product, additional losses of electricity, deterioration of temperature conditions of the transducer. To reduce the duration of powering pulse of magnetic field it is necessary to reduce the number of winds of the magnetizing coil, but this leads to a decrease in magnetic induction magnitude, even in presence of a ferromagnetic core. As a result of rational choice of the design of the magnetic field source, the flat coil of magnetization must be made with a two-window three-wind and made of high-conductive high-heat-conducting material [7-9]. The core should be placed in the windows of the magnet coil only by the ends. As a result, the action time of the magnetization pulse is reduced to 200 μs , which is sufficient for testing of samples up to 300 mm thick.

The high-frequency inductor coil is made of two linear working sections that are located under the windows of the coil [9]. In opposite directions of high-frequency current in these working areas, in-phase powerful pulses of shear ultrasonic waves are excited in the surface layer of the product. The ratio of the excited amplitudes of the shear and longitudinal pulses exceeds 30 dB. That is, the coherent pulses of longitudinal waves in the testing of the moon by the method will practically not affect the results of the diagnosis of ferromagnetic products.

Design variants of electromagnetic-acoustic transducers with one-wind [7], two-wind [8] and three-wind magnetization coils [9] of a source of a pulsed polarizing magnetic field are developed. With a single-coil [7], the transients are minimal when the power pulse is wound on. However, it is necessary to excite in

the coil a current of several kA, which complicates the temperature conditions of the transducer and power equipment. With a three-coil [9] magnetization, the amplitude of the bottom pulses in relation to the amplitude of the interference exceeds 24 dB, which allows for testing and diagnostics of large variety of samples. When using the charge core [9], the ratio of amplitudes increased to 38 dB, which makes it possible to monitor the echo by the method.

The method [10] of ultrasonic electromagnetic - acoustic testing of ferromagnetic products is developed. vectors of intensity with duration of several periods of high filling frequency, n and this excitation of the pulses of the electromagnetic field is performed at a time equal to the time of transients to establish the operating value of the induction of the polarizing magnetic field, and the reception of ultrasonic pulses reflected from the product is performed in the time period t_{np} , which is determined by the expression $T - t_1 - t_2 - t_3 < t_{np} = t_1 + t_2 + t_3 + 2H/C$, where T is the duration of the magnetization pulse; t_1 is the time of transients to establish the working value of the induction of a polarizing magnetic field; t_2 - time of packet pulse of electromagnetic field; t_3 is the time of damping oscillations in the flat high frequency inductor; H is the thickness of the product or the distance in volume of the product to be ultrasound; C is the velocity of propagation of shear ultrasonic waves in the material of the product.

It is established [9] that the interferences in the ferromagnetic core caused by the Barkhausen effect and magnetostrictive transformation of electromagnetic energy into ultrasound are practically excluded by production of the core blended, usage of the material of the core plates which has a low coefficient of magnetostrictive conversion, perpendicular core plates orientation in relation to the conductors of the working areas of the flat high-frequency inductor, as well as filling of the gaps between the plates with a high density fluid, such as glycerol.

It is shown that the sensitivity of direct EMA transducers with pulse magnetization when powered by a batch high frequency probe pulse generator [11] and when receiving via a low noise amplifier [12] provide detection of flat-bottomed reflectors with a diameter of 3 mm or more, probe frequency of 40 Hz,

peak high-frequency current of 120A, shear linearly polarized ultrasonic oscillations of 2.3 MHz, high frequency packet pulse duration 6...7 filling frequency periods, magnetization pulse duration 200 μ s, magnetization current density of 600 A / mm² and at the gap between the EMAP and the product of 0.2 mm [9]. The amplitude of the echo momentum reflected from the flaw in relation to the noise amplitude reaches 20 dB.

The EMATs developed are protected with 2 utility model patents.

Key words: ultrasonic testing, ultrasonic impulses, flaw, diagnostics, electromagnetic-acoustic, transducer, pulsed magnetic field source, flat magnetization coil, ferromagnetic charge core, flat high frequency coil, probe pulse generator, amplifier, interference.

REFERENCES

1. Salam Bussi. Generator potuzhnykh visokochastotnykh paketnykh impulsiv strumu dlya zhivlennya ultrazvukovykh elektromagnitno-akustichnykh peretvoryuvachiv / Salam Bussi, Suchkov G.M., Migushenko R.P., Kropachek O.Yu. , Plesnetsov S.Yu. // Metodi ta priladi kontrolyu yakosti. – 2019 – No2 (43). – P. 88–95.
2. Salam Boussi. Determination of the reliability of control of curved surfaces by eddy current transducer / Svetlana Tiupa, Igor Tiupa, Salam Boussi // Ukrayinskij metrologichnij zhurnal. – 2019. – No 3. – P. 57–61. (NMB Web of Science Core Collection).
3. Salam Boussi. Electromagnetic - acoustic transducers for ultrasonic measurements, control and diagnostic of metal products / Salam Bussi, G.M. Suchkov, R.P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek, S.Yu. Plesnetsov // Ukrayinskij metrologichnij zhurnal. – 2019. – No 4. – P. 41–49. (NMB Web of Science Core Collection).
4. Salam Bussi. Osoblivosti vikoristannya mehanizmiv elektromagnitno-

akustichnogo peretvorennya pri kontroli yakosti prokatnih virobiv / Salam Bussi // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». – Kharkiv, 2019. – No 11 (1336). – P. 70–75.

5. Salam Bussi. Sovremennoe sostoyanie metodov i sredstv ultrazvukovogo kontrolya prokata s primeneniem elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej / Salam Bussi, Suchkov G.M., Migushenko R.P., Kropachek O.Yu., Plesnetsov S.Yu. // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». – Kharkiv, 2019. – No 12 (1337). – P. 63–69.

6. Salam Bussi. Praktichni rozrobki elektromagnitno-akustichnih peretvoryuvachiv / Salam Bussi, Plesnetsov S.Yu // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». – Kharkiv, 2019. – No26 (1351) – P. 57–65.

7. Salam Bussi. Modelyuvannya polyarizuyuchogo magnitnogo polya elektromagnitno-akustichnogo peretvoryuvacha elektromagnitnoyi energii v ultrazvukovu / Suchkov G.M., Salam Bussi // Tezi 19 mizhnarodnoyi naukovo-tehnicnoyi konferenciyi «Problemi informatiki ta modelyuvannya». 11–16 veresnya 2019 r. – Karolino-Bugaz. – P. 79.

8. Salam Bussi. Ultrazvukovij peretvoryuvach dlya bezkontaktynogo kontrolyu virobiv z feromagnitnih materialiv. WayScience / Salam Bussi // Materiali 1 Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi internet-konferenciyi «Integraciya osviti, nauki ta biznesu v suchasnomu seredovishi: litni disputi». 1–2 serpnia 2019 r. – Dnipro. – P. 620–624.

9. Salam Bussi. Potuzhnij elektromagnitno – akustichnij peretvoryuvach dlya ultrazvukovogo kontrolyu metalovirobiv / Salam Bussi // Materiali 3-yi konferenciyi z mizhnarodnoyu uchastyu «Nerujnivnij kontrol v konteksti asocijovanogo chlenstva Ukrayini v Yevropejskomu soyuzi». 17–19 veresnya 2019 r. – Kiyiv: NTUU «KPI». – P. 50–51.

10. Salam Bussi. Maloshumlyachij polosovij posilyuvach dlya elektromagnitno-akustichnogo peretvoryuvacha sho kontrolyuye metalovirobi / Salam Bussi // Tezi dopovidi na VIII mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi internet-konferenciyi «Suchasnij ruh nauki». 3 4 zhovtnya 2019 r. – Dnipro. – P. 209–213.

11. Salam Bussi. Pryamij sinfaznij elektromagnitno-akustichnij peretvoryuvach dlya ultrazvukovogo kontrolyu virobiv z feromagnetnih materialiv linijno polyarizovanimi ultrazvukovimi hvilyami / Salam Bussi // Tezi 9-oyi Nacionalnoyi naukovo-tehnichnoyi konferenciyi i vistavci «Nerujnivnij kontrol ta tehnicna diagnostika». 19–21 listopada 2019 r. – Kiyiv, – P. 223–226.

12. Salam Boussi. The rationale of pulse magnetic field source EMAT design / Salam Bussi, S.Yu. Plesnetsov // 7-ma Vseukrayinska naukovo–praktichna konferenciya studentiv i molodih uchenih "Metodi ta zasobi nerujnivnogo kontrolyu promislovogo obladnannya" – 19–20 listopada 2019 r. – Ivano-Frankivsk. – P. 100–103.

13. Salam Boussi, Plesnetsov S. Yu. Requirements for non-contact ultrasonic transducers for determination of properties of ferromagnetic materials / Salam Bussi, Plesnetsov S. Yu. // XIV Mizhnarodnij naukovij konferenciyi «Fizichni yavisha v tverdih tilah». 3–6 grudnya 2019 r. – Kharkiv: HDU im. Karazina. – P. 49.

ЗМІСТ

Назва	Стор.
Вступ	4
Розділ 1. Аналіз виконаних досліджень і розробок з ультразвукового електромагнітно-акустичного контролю та діагностики	13
1.1. Основні положення щодо побудови ЕМАП.....	13
1.2. Сучасні ЕМА перетворювачі.....	21
1.3. Висновки до розділу 1.....	33
Розділ 2. Модельні дослідження та розробка основних положень створення джерела імпульсного магнітного поля ЕМА перетворювачів	36
2.1. Розробка основних підходів щодо побудови джерела імпульсного магнітного поля ЕМАП	36
2.2. Моделювання просторового розподілу магнітного поля, створеного імпульсним джерелом ЕМАП	42
2.3. Визначення форми високочастотних котушок індуктивності ЕМАП.....	50
2.4. Основні динамічні характеристики джерела імпульсного магнітного поля	55
2.5. Моделювання впливу зміни повітряного прошарку між ЕМАП і ОК на форму збуджуваного магнітного поля і його динаміку.	61
2.6. Висновки до розділу 2	65
Розділ 3. Експериментальні дослідження факторів, які визначають ефективність роботи електромагнітно - акустичних перетворювачів	67
3.1. Концепція конструювання ЕМА перетворювача прямого типу для прийому і збудження імпульсів об'ємних зсувних ультразвукових коливань для контролю феромагнітних ОК	67
3.2. Висновки до розділу 3.....	102
Розділ 4. Розробка методів і основних пристроїв, які забезпечують роботу електромагнітно-акустичного перетворювача, та експериментальні дослідження факторів, що визначають процес	

контролю металовиробів та його ефективність	105
4.1. Вдосконалення електромагнітно-акустичного перетворювача з імпульсним поляризуючим магнітним полем.....	105
4.2. Розробка макета генератора зонduючого сигналу.....	112
4.3. Розробка макета смугового малозавадного підсилювача прийнятого ультразвукового сигналу	122
4.4. Удосконалення блоку живлення джерела імпульсного намагнічування.....	126
4.5. Висновки до розділу 4.....	128
Висновки.....	130
Список використаних джерел інформації.....	134
Додаток А. Список публікацій здобувача.....	152
Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	155