

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.16: 620.179.17

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-2(43)-88-95

ГЕНЕРАТОР ПОТУЖНИХ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПАКЕТНИХ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

*Салам Буссі ЕП, Мішел Кассаблі, *Г. М. Сучков, С. Ю. Плєснецов, Р. П. Мигущенко,
О. Ю. Кропачек, Ю. О. Плєснецов*

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» 61002,
Україна, м. Харків, вул. Курпичова, 2, hpi.suchkov@gmail.com*

Підвищити чутливість електромагнітно – акустичних перетворювачів можливо трьома основними методами: збільшення індукції поляризуючого магнітного поля; збільшення сили високочастотного струму в котушці індуктивності перетворювача; використанням сучасних методів обробки збуджених та прийнятих з виробу інформаційних пакетних імпульсів. Збільшення індукції магнітного поля перетворювача обмежено можливостями сучасних потужних постійних магнітів. Окрім того виникають великі складнощі при контролі ферромагнітних об'єктів контролю, обумовлених великою силою протягування та налипанням окалини до перетворювача. Використання сучасних методів обробки значно ускладнює і здорожчує прилад електромагнітно-акустичного контролю. З вибраних методів підвищення чутливості найбільш прийнятне шляхом збільшення потужності високочастотних генераторів струму живлення при умові збудження пакетних імпульсів. Процес живлення перетворювача виконується в два етапи. Збуджуються потужні високочастотні імпульси струму типу «меандр», що забезпечує роботу вихідних транзисторів в ключовому режимі. Виділення потужного синусоїдального високочастотного пакетного імпульсу струму виконується безпосередньо на електромагнітно – акустичному перетворювачі, елементи якого включені в резонансний контур з малою добротністю. На основі транзисторів, включених за двотактною схемою в ключовому режимі створена малогабаритна конструкція генератора, який збуджує в електромагнітно-акустичному перетворювачі піковий струм до 800 А та напругу на перетворювачі до 3 кВ в діапазоні частот 0,3...8 МГц. Експериментально встановлено, що нова конструкція ГЗІ дала можливість підвищити амплітуду імпульсів відбитих від плоскодонної моделі дефекту діаметром 2 мм по відношенню до амплітуди завад більше ніж в 2 рази.

Ключові слова: ультразвуковий, електромагнітно – акустичний перетворювач, дефектоскопія, польові транзистори, генератор імпульсів струму.

Повысит чувствительность электромагнитно - акустических преобразователей возможно тремя основными методами: увеличение индукции поляризующего магнитного поля; увеличение силы высокочастотного тока в катушке индуктивности преобразователя; использованием современных методов обработки возбужденных и принятых с изделия информационных пакетных импульсов. Увеличение индукции магнитного поля преобразователя ограничено возможностями современных мощных постоянных магнитов. Кроме того возникают большие сложности при контроле ферромагнитных объектов контроля, обусловленных большой силой прижатия и налипанием окалины к преобразователю. Использование современных методов обработки значительно усложняет и удорожает прибор электромагнитно-акустического контроля. Из выбранных методов повышения чувствительности наиболее приемлемым путем является увеличение мощности высокочастотных генераторов тока питания при условии возбуждения пакетных импульсов. Процесс питания преобразователя выполняется в два этапа. Возбуждаются мощные высокочастотные импульсы тока типа «меандр», что обеспечивает работу выходных транзисторов в ключевом режиме. Выделение мощного синусоидального высокочастотного пакетного импульса тока выполняется непосредственно на электромагнитно - акустическом преобразователе, элементы которого включены в резонансный контур с малой добротностью. На основе транзисторов, включенных по

двухтактной схеме в ключевом режиме, создана малогабаритная конструкция генератора, который возбуждает в электромагнитно-акустическом преобразователе пиковый ток до 800 А и напряжение на преобразователе до 3 кВ в диапазоне частот 0,3 ... 8 МГц. Экспериментально определено, что новая конструкция ГЗИ позволила повысить амплитуду импульсов отраженных от плоскодонного отражателя диаметром 2 мм по отношению к амплитуде помех более чем в 2 раза.

Ключевые слова: ультразвуковой, электромагнитно - акустический преобразователь, дефектоскопия, полевые транзисторы, генератор импульсов тока.

It is possible to increase the sensitivity of electromagnetic-acoustic transducers by three main methods: increasing the induction of a polarizing magnetic field; increase in strength of high-frequency current in the inductor of the converter; using modern methods of processing information packet pulses excited and received from the product. The increase in magnetic field induction of the converter is limited by the capabilities of modern powerful permanent magnets. In addition, there are significant difficulties in monitoring ferromagnetic control samples, due to the large pressing force between the sample and the transducer and sticking of scale to the transducer. Usage of modern processing methods significantly complicates and increases the cost of electromagnetic-acoustic testing devices. Of the selected sensitivity-increasing methods, the most acceptable way is to increase the power of high-frequency current generators under the condition of excitation of packet pulses. Power supply process of the converter is carried out in two stages. Meander type powerful high-frequency current pulses are excited, which ensures operation of the output transistors in key mode. Isolation of a powerful sinusoidal high-frequency packet current pulse is carried out directly on the electromagnetic - acoustic transducer, the elements of which are included in the resonant circuit with low quality factor. Based on the transistors switched in the push-pull circuit in the key mode, a small-sized generator design has been created that excites a peak current of up to 800 A in the electromagnetic-acoustic transducer and a voltage of up to 3 kV in the transducer in the frequency range 0.3 ... 8 MHz. It was experimentally determined that the new design of the probe pulse generator made it possible to increase the amplitude of pulses reflected from a flat-bottom reflector with a diameter of 2 mm with respect to the interference amplitude by more than 2 times.

Key words: ultrasonic, electromagnetic-acoustic transducer, flaw detection, field effect transistors, current pulse generator.

Вступ.

Використання електромагнітно-акустичних (ЕМА) перетворювачів (ЕМАП) для ультразвукового контролю, діагностики металовиробів та вимірювань дозволяє суттєво підвищити економічні показники виробників продукції [1-2]. Досягнення та проблеми використання ЕМАП, приблизно за останні 15 років, висвітлені в статтях [3-7]. Єрмолов І.Н. в роботі [8] та Сазонов Ю.І. в статті [9] на основі аналізу теоретичних та практичних розробок для ЕМА контролю показали, що основними напрямками підвищення можливостей ультразвукового контролю з використанням ЕМАП є розробка нових перетворювачів зі значною індукцією поляризованого магнітного поля, генераторів потужних високочастотних імпульсів, малошумлячих посилювачів прийнятих з об'єкту контролю (ОК) імпульсів, швидкодіючих систем обробки інформації. Проте значна величина індукції магнітного поля майже унеможливує сканування феромагнітних ОК із-за надзвичайно сильного протягування ЕМАП до виробу особливо для портативних приладів контролю. Сучасні

швидкодіючі малошумлячі мікросхеми дають можливість зменшити величину завод, але вони достатньо дорогі. Ефективні системи обробки інформації, наприклад кореляційним методом [10], суттєво здорожують і ускладнюють конструкцію ультразвукових приладів.

Створення сучасних потужних високочастотних польових транзисторів з коротким часом переключання дає можливість суттєво підвищити величину пакетного струму в індукторі ЕМАП і, відповідно, підвищити чутливість ЕМА контролю, зменшити габарити портативних приладів, зменшити енергоспоживання. Розробки генераторів зондуючих високочастотних пакетних імпульсів струму (ГЗВПС) для ЕМА приладів, що опубліковані в роботах [10-11], в яких сформульовані необхідні вимоги до збуджуваних в індукторі ЕМАП імпульсів струму. Проте, враховуючі підвищення вимог до якості випускаємих ОК є необхідність в розробці портативних ГЗВПС з підвищеними характеристиками, тобто актуальність розробок нових ГЗВПС є безсумнівною.

Мета роботи. Розробка потужних джерел імпульсів струму для живлення високочастотних ЕМАП для вимірювань, контролю і діагностики ОК на базі швидкодіючих польових транзисторів.

Розробка, дослідження і аналіз результатів

У відповідності з результатами раніше виконаних робіт [10–11] показано, що доцільно конструювати ГЗВПС з двох окремих гальванічно розв'язаних блоків – регулюємого формувача пакетних імпульсів і підсилювача потужності. Досвід побудови потужних генераторів зондуючих імпульсів для живлення ЕМА перетворювачів показує, що найбільш оптимальним, з енергетичної точки зору, є варіант побудови підсилювача у вигляді двотактної схеми, в якій всі каскади працюють в ключовому режимі. Це дозволяє істотно збільшити струми, комутовані транзисторами вихідного каскаду, значно знизити вимоги до характеристик елементів підсилювача потужності і підвищити стійкість підсилювача до перешкод, особливо перших його каскадів, завдяки наявності гістерезису рівнів перемикавання. Швидке переключення польових транзисторів дає можливість зменшити нагрівання транзисторів вихідних каскадів і використовувати їх без радіаторів, зменшуючи тим самим габарити приладу та енерговитрати.

За основу формування зондуючого сигналу вибрано дві послідовності, які зсунуті у часі протилежно по фазі [11]. Схема генератора, який формує початковий сигнал, показана на рис.1. Для формування цифрового сигналу використовується мікроконтролер LPC2468, який має можливість програмно змінювати власну тактову частоту в широких межах з малою дискретністю завдяки вбудованій системі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Опорна частота для ФАПЧ визначається кварцовим резонатором Y1. Управління частотою генерації, шпариністю і кількістю імпульсів здійснюється за допомогою кнопок S1 ... S7, які винесені на лицьову панель. Для відображення інформації про поточні настройки використовується дворядковий знакосинтезуючий рідкокристалічний дисплей LCD1. Яскравість підсвічування може плавно регулюватися вбудованим контролером

широкоімпульсної модуляції (ШИМ) процесора, вихід якого з'єднаний з затвором транзистора Q1. Сформований сигнал подається на буферний повторювач U2, з якого він надходить на вихід P1. До цього виходу підключається вхід підсилювача зондуючого імпульсу. Буферний повторювач використовується для посилення вихідного сигналу по струму, а також для захисту мікропроцесора, в разі замикань в схемі підсилювача, що виникають на етапі налагодження приладу і які можуть привести до попадання високої напруги до виходу P1. Для збереження налаштувань використовується зовнішня пам'ять U3. Пам'ять підключається до процесора по послідовному інтерфейсу I2C.

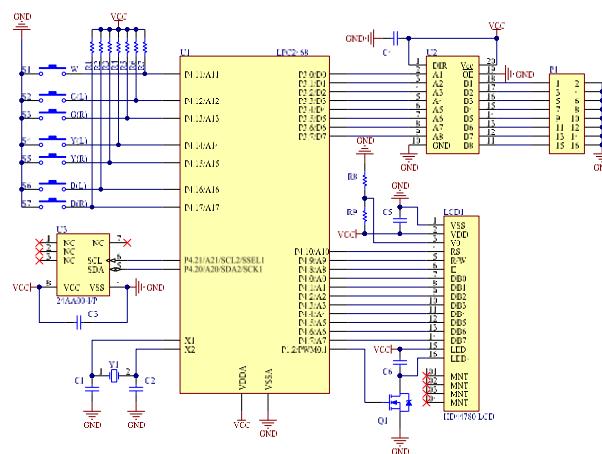


Рисунок 1 – Схема електрична-принципова генератора-задавача сигналів для ГЗІ [11].

Для прикладу, конструктивно генератор – задавач виконаний в окремому корпусі з винесеними на передню панель органами управління. З'єднувачі для підключення живлення і вихідного сигналу розміщені на задній кришці корпусу. Зовнішній вигляд формувача показаний на рис.2.

Часові діаграми вихідних сигналів формувача показані на рис.3. Пакетні сигнали IN_P і IN_N мають період T_H утворюють пакет імпульсів зондуючої послідовності частоти заповнення, який подається на вхід підсилювача.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд формувача для ГЗІ.

Сигнали зсунені один щодо одного по фазі на 180°. Сигнал IN_S використовується для управління блоком подавлення перехідних процесів в високочастотній котушці індуктивності після проходження зондуючого імпульсу. При багаторазовому вимірі послідовності повторюються з періодом T_c , величина якого може регулюватися.

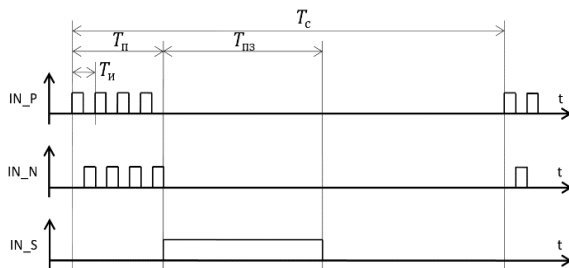


Рисунок 3 – Часові розгортки вихідних сигналів формувача.

Сигнали з формувача поступають на пристрій посилення пакетних сигналів - генератор зондуючих високочастотних імпульсів (ключовий посилювач потужності сигналу ГЗІ). Принципова електрична схема підсилювача зондуючого пакетного сигналу показана на рис.4.

Вихідний каскад підсилювача потужності виконаний на двох парах високочастотних польових транзисторів Q3 - Q6. Паралельне включення двох транзисторів в кожному плечі дозволило збільшити граничний струм комутації і знизити втрати за рахунок зниження опору плеча у відкритому стані

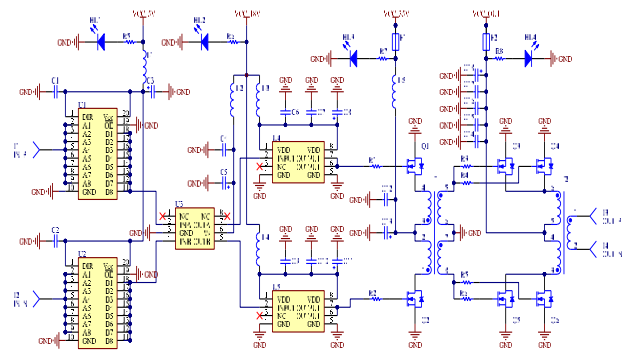


Рисунок 4 – Схема електрична принципова генератора зондуючих високочастотних пакетних імпульсів.

. Підсилювач має два входи IN_P і IN_N, на які подається сигнал з цифрового формувача. Сигнал надходить на вхід IN_P потрапляє на буфер U1, що підсилює вхідний сигнал по струму. З буфера сигнал надходить на вхід драйвера U3, що підвищує амплітуду сигналу до рівнів, необхідних для управління драйвером U4, який в свою чергу управляє відкриттям транзистора Q1. Коли транзистор Q1 відкривається, через одну з первинних обмоток трансформатора T1 починає текти струм. Сигнал з цього трансформатора відкриває транзистори Q3 і Q4 верхнього плеча вихідного каскаду і закриває (утримує в закритому стані) транзистори Q5 і Q6 протилежного плеча. Таке включення трансформатора T1 забезпечує захист від випадкового відкриття обох плечей вихідного каскаду і забезпечує швидке закриття транзисторів протилежного плеча. Після відкриття транзисторів Q3 і Q4 напруга живлення вихідного каскаду надходить на одну з первинних обмоток вихідного трансформатора T2. Подача на вхід IN_P логічного нуля повертає схему в початковий стан. Нижня плече схеми функціонує аналогічним чином.

Зображення підсилювача зондуючого сигналу показано на рис.5. Вихідні транзистори, що розташовуються з нижньої сторони плати забезпечені алюмінієвими тепловідвідними радіаторами. Це може бути необхідним при високій частоті зондування – до 1 кГц і більше.

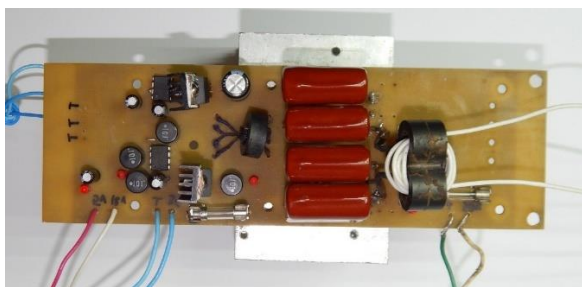


Рисунок 5 – Зображення плати ГЗІ.

Для проведення первинного запуску і перевірки працездатності підсилювача використовувалося навантаження активним опором 50 Ом.

Зображення величини напруги на високочастотній котушці індуктивності та струм, який протікає в котушці індуктора перетворювача показані на рис.6 і рис.7 відповідно. З аналізу рис. 7 витікає що піковий струм в індукторі ЕМАП може досягати 400...500 А. При використанні резонансних перетворювачів [12] з невеликою добротністю струм може досягати 600...800 А. Тобто чутливість контролю з використання таких ГЗІ може бути суттєво збільшена.

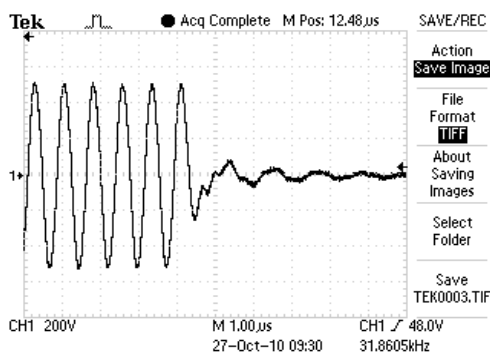


Рисунок 6 – Напруга на високочастотній котушці індуктивності ЕМАП.

Перевірка амплітудно-частотної характеристики ГЗІ при навантаженні на активний опір показала, що вона рівномірна в діапазоні 0,3...8 МГц, що дає можливість збуджувати ультразвукові імпульси практично у всьому діапазоні частот, що використовуються при ультразвуковому контролі.

На рис.7 видно високочастотні викиди струму при переключенні силових транзисторів вихідного каскаду ГЗІ. Проте вони мають

частоту що суттєво перевищує використовувану для збудження ультразвукових імпульсів частоту. Такі завади легко подавляються з допомогою фільтрів полосового посилювача прийнятих ультразвукових пакетних сигналів з доволі вузькою полосою частот.

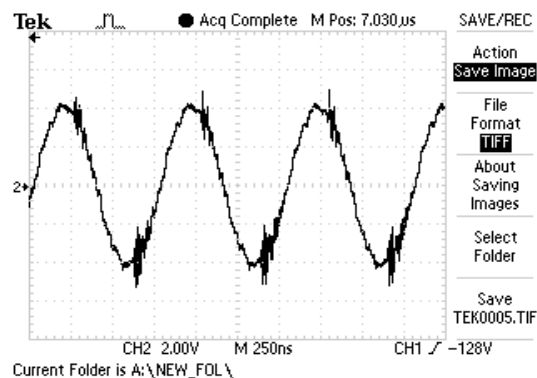


Рисунок 7 – Струм в високочастотній котушці індуктивності ЕМАП, який виміряний з допомогою активного шунта опором 0,01 Ом.

Для портативних приладів має суттєве значення електроспоживання від батареї. Оскільки найбільшу потужність (більше 90%) споживає силовий вихідний каскад, тому досліджено його середній струм споживання силового підсилювача. Залежність струму споживання від частоти наведена на рис.8. Виміри проводилися для 6 імпульсів в збуджувальному пакетному сигналі. Як видно з графіка зі збільшенням частоти струм споживання знижується. Це пов'язано зі зменшенням тривалості імпульсу, а, отже, зі зменшенням часу, протягом якого високочастотні транзистори вихідного каскаду залишається у відкритому стані.

При підключенні перетворювача до виходу підсилювача, котушка і схема узгодження перетворювача, а також вихідний трансформатор ГЗІ, утворюють резонансний контур з певною добротністю. У свою чергу, висока добротність при значній величині повітряного шару між ЕМАП і ОК веде до плавного наростання амплітуди на датчику, і до плавного спадання. Перше змушує використовувати більшу кількість імпульсів для досягнення достатнього рівня амплітуди, а друге викликає вільні коливання після закінчення подачі зондуєчих імпульсів

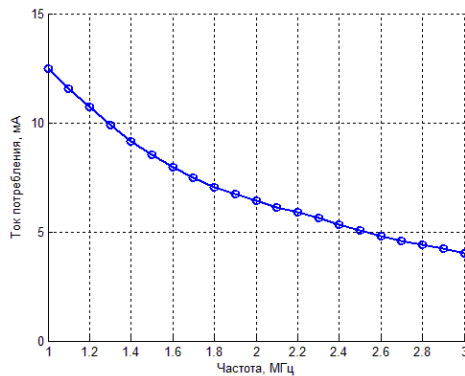


Рисунок 8 – Залежність середнього струму споживання вихідного каскаду ГЗІ від частоти зондування.

Все це призводить до значного подовження за часом зондуючого імпульсу, що в свою чергу призводить до збільшення неконтрольованої приповерхневої зони ОК. Для збільшення швидкості наростання зондуючого сигналу слід збільшувати струм вихідного сигналу ГЗІ, а для зменшення коливальних, після закінчення зондування - так званого «дзвону», використовувати спеціальні схеми подавлення. Найбільш очевидним є просте замикання виходу трансформатора або входу ЕМА датчика після закінчення зондувального імпульсу, однак високий рівень напруги (амплітуда може досягати значень ± 3000 В) не дозволяють використовувати для цього швидкодіючі польові транзистори. Було запропоновано використовувати понижуючий трансформатор, підключений паралельно виходу ГЗІ. Цей трансформатор знижував рівень сигналу до амплітуди менше 100 В, що дозволяє підключити її вторинну обмотку до стоку і витоку польового транзистора, рис.9. Подавлення вільних коливань здійснювалося відкриванням транзистора, який замикає вторинну обмотку трансформатора. Для цього використовувався імпульс $T_{пз}$ за рис. 3.

Перевірка роботи схеми за рис.9 показала, що час дії перехідних процесів в ЕМАП зменшився в 2...3 рази. Відповідно зменшено «мертву зону» при контролі ОК.

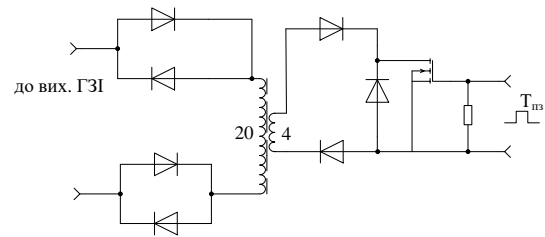


Рисунок 9 – Схема подавлення перехідних процесів в ЕМАП після закінчення дії зондуючого імпульсу.

Перевірка чутливості з виявлення моделей дефектів в вигляді плоскодонних відбивачів діаметром 2 мм в зрізці зі сталі ст.45, показала, що величина амплітуди лінійно поляризованих ультразвукових імпульсів з заповненням 6 періодів частоти 2,5 МГц збільшилася більше ніж 2 рази. Це підтвердило ефективність використання вдосконаленого ГЗВПІС в складі приладу для ЕМА контролю металовиробів.

Висновки.

Підтверджено подальше підвищення можливостей ЕМА приладів за рахунок вдосконалення конструкцій генераторів зондуючих пакетних імпульсів височастотного струму. На основі нових швидкісних польових транзисторів, включених за двотактною схемою в ключовому режимі створена малогабаритна конструкція генератора, який збуджує в ЕМАП піковий струм до 800 А та напругу на перетворювачі до 3 кВ в діапазоні частот 0,3...8 МГц.

Встановлено, що нова конструкція ГЗІ дала можливість підвищити амплітуду імпульсів відбитих від моделі дефекту діаметром 2 мм по відношенню до амплітуди завад більше ніж в 2 рази.

Список використаних джерел

1. Судакова К.В. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции/ К.В. Судакова, И.Л. Казюкевич // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 3. С. 8–10.
2. Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок / А.В.

Семеренко // Территория NDT. - 2014. - №1. С.42-43.

3. Плеснецов С.Ю. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (обзор) / Г.М. Сучков, А.И. Корж, М.Д. Суворова // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2018. - №2. - С. 24-31.

4. Сучков Г.М. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей. (обзор) / Г.М. Сучков, С.Ю. Плеснецов, А.И. Корж и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2018. - №3. - С. 27-34.

5. Сучков Г.М. Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (обзор, ч.1) / Г.М. Сучков, С.Ю. Плеснецов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. -2018. -№4. -С.45-50.

6. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (обзор, ч.2) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2019. - №1. - С 47-54.

7. Сучков Г.М. Чувствительность ультразвукового контроля ЭМА способом при выявлении естественных внутренних дефектов металлоизделий. Возможности ЭМА толщинометрии. (Обзор ч.3) / Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, С.Ю. Плеснецов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2019. - №2. С.51-57.

8. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия, 2004. № 10. С. 13-48.

9. Сазонов Ю.И. Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования // XXVII сессия Российского акустического общества, посв. памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смолякова и В.И. Попкова. С.-Петербург. 16-18 апреля 2014. 17 с.

10. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля

металлоизделий: докт. дис. // Харьков, НТУ «ХПИ», 2005. 521 с.

11. Мигущенко Р.П. Генераторы зондирующих импульсов для питания портативных электромагнитно-акустических преобразователей / Р.П. Мигущенко, Г.М. Сучков, Ю.К. Тараненко и др. // Методи та прилади контролю якості, 2015. - № 2(35). - С.5-11.

12. Мигущенко Р.П. Электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия / Р.П. Мигущенко, Г.М. Сучков, Х.К. Радев и др. // Технічна електродинаміка, 2016, №2, с.78-82.

References

1. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции / К.В. Судакова, И.Л. Казыкевич. *V mire nerazrushayushhego kontrolya*. 2004. No 3. P. 8-10.

2. Semerenko A.V. Primenenie EMAP dlya kontrolya korrozii i erozii paronagrevatelej kotel'nykh ustanovok. *Territoriya NDT*. 2014. No1. P.42-43.

3. Novy'e teoreticheskie issledovaniya i razrabotki v oblasti elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya (obzor) / S.Yu. Plesneczov, G.M. Suchkov, A.I. Korzh, M.D. Suvorova. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushhij kontrol*. 2018. No 2. P. 24-31.

4. Novyie razrabotki elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovateley. (obzor) / G.M. Suchkov, S.Yu. Plesnetsov, A.I. Korzh i dr. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*. 2018. No 3. P. 27-34.

5. Chuvstvitelnost kontrolya elektromagnitno-akusticheskimi preobrazovatelyami (obzor, ch.1) / G.M. Suchkov, S.Yu. Plesnetsov. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*. 2018. No4. P.45-50.

6. Suchkov G.M., Plesnetsov S.Yu. O chuvstvitelnosti ultrazvukovogo kontrolya poverhnostnyimi volnami, vzbuzhdaemyimi i prinimaemyimi elektromagnitno-akusticheskimi preobrazovatelyami (obzor, ch.2). *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*. 2019. No 1. P. 47-54.