

**КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 681.7.013.8

**ПРИНЦИП И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОГО ПОЛЮСНОГО
ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ МАГНИТОГРАФИРОВАНИИ**

Агалиди Ю.С., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

Предложена теоретическая модель, описывающая пространственные распределения составляющих напряженности магнитных полей рассеяния образца в условиях локального полюсного возбуждения

Вступлення

Среди многообразных задач дефектоскопии и неразрушающего контроля может быть выделена категория задач, связанных с акцентированным исследованием поверхностных и приповерхностных слоёв ферромагнитных изделий, то есть для данных исследований наиболее значимыми являются поверхностные дефекты, неоднородности рельефа поверхности и структуры поверхностных и приповерхностных слоёв. Подобная постановка задачи нередко возникает при исследованиях параметров напряженно-деформированного состояния объектов, оценке коррозионной стойкости материалов, криминалистических исследованиях рельефных маркировочных обозначений и т.п.

Очевидно, что для успешного решения данного класса задач необходимо применение методов и средств неразрушающего контроля, обладающих пространственной избирательностью, которые позволяют реализовать селективное возбуждение и съём сигнальной информации поверхностных слоёв объекта. Известно, что ряд методов неразрушающего контроля, например, вихретоковые и акустические, обладают такой избирательностью. В некоторой степени, подобная избирательность присуща и магнитным методам, например, - магнито-порошковому, в случае возбуждения образца переменным током [1]. В то же время, перечисленные методы неразрушающего контроля и реализующие их средства не всегда удовлетворяют техническим требованиям контроля (чувствительность, разрешающая способность, достоверность) и характеристикам объекта контроля (сложная форма исследуемой поверхности, неплоскостность и шероховатость участков поверхности, наличие лакокрасочного покрытия или коррозии).

Отмеченные факторы сложности и несовершенства исследуемых поверхностей объективно ухудшают качество контроля, порой снижая его достоверность до неприемлемого уровня. Одним из известных решений, позволяющих минимизировать влияние этих факторов, является, например, применение гибкого

промежуточного магнитного носителя в магнитографическом методе [2]. Несмотря на отмеченное преимущество магнитографический метод в его традиционной реализации [3,4] не обладает пространственной избирательностью, имеет низкую чувствительность (минимальный размер дефекта менее 10% толщины металла контролируемого изделия [2]) и невысокое пространственное разрешение (200-500мкм).

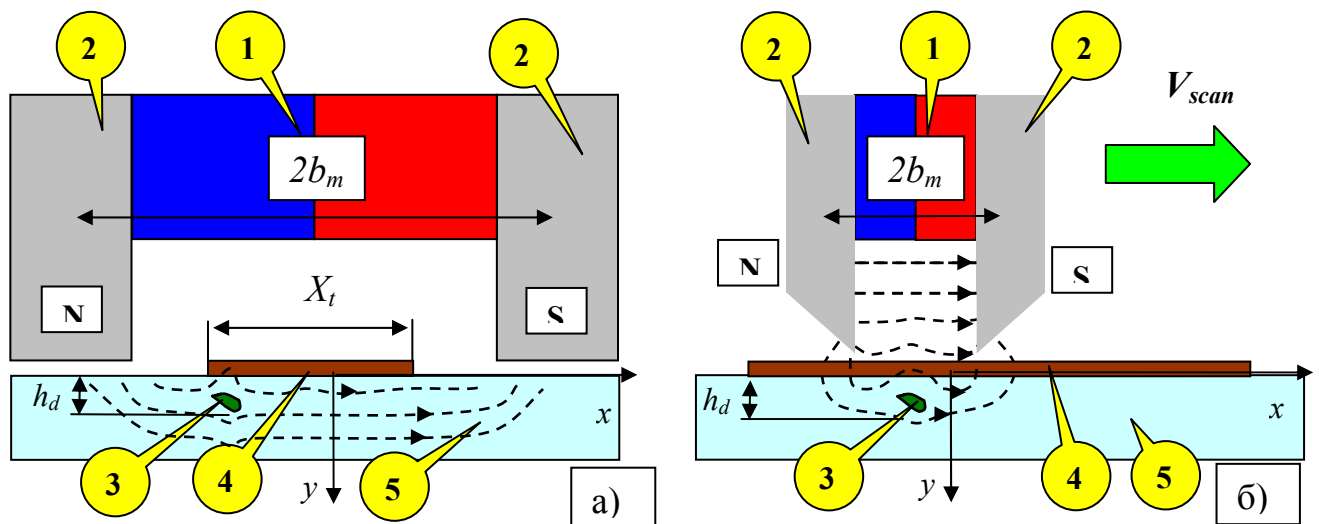
В решении вопроса повышения чувствительности и избирательности магнитографирования поверхностных слоёв, представляет интерес подход к намагничиванию образца и способ магнитной записи возбуждённых полей рассеяния, изложенный в патенте на изобретение [5], который заключается в локализации магнитного поля намагничивания в области магнитной записи.

Постановка задачи

В настоящей работе предстоит выполнить формализацию основных положений принципа локального намагничивания [5], в дальнейшем – локального полюсного возбуждения (ЛПВ). Необходимо предложить теоретическую модель магнитных полей рассеяния в условиях ЛПВ, последующий анализ которой позволит установить основные физические закономерности процесса магнитографирования для данного принципа намагничивания, а также влияние параметров генератора ЛПВ на функцию остаточной намагничённости.

Формализация основных положений принципа ЛПВ

Основные положения принципа намагничивания ЛПВ, отличающие его от традиционного для магнитографии принципа объёмного полюсного намагничивания (ОПВ), заключаются в следующем (Рис. 1):



1 – источник постоянного магнитного поля; 2 – магнитопровод; 3 – дефект; 4 – магнитная лента; 5 – исследуемый ферромагнитный образец

Рисунок 1 – Принципы намагничивания ОПВ (а) и ЛПВ (б)

1. Малая база намагничивания ЛПВ ($b_m \approx h_d; 2b_m \gg X_t$) должна обеспечивать локализацию магнитного поля в зазоре между генератором поля и поверхностью образца, а также в относительно небольшом объёме приповерхностных слоёв образца.

2. Магнитная лента находится между генератором намагничивания ЛПВ и поверхностью образца, пребывая в области высоких напряжённости магнитных полей рассеяния, близких по амплитуде к коэрцитивной силе материала магнитного носителя.

3. Генератор намагничивания ЛПВ должен сканировать исследуемую поверхность ($V_{scan}(t) > 0$) в продольном направлении, относительно ориентации магнитной ленты.

Синтез теоретической модели магнитных полей рассеяния в условиях ЛПВ

Для описания модели схемы ЛПВ представляется уместным применить аналитические подходы, используемые как в теории магнитной дефектоскопии, так и в теории магнитной записи сигналов, поскольку генератор ЛПВ в результате выполненной формализации, по своим параметрам и функциональному назначению приближается к магнитной головке записи.

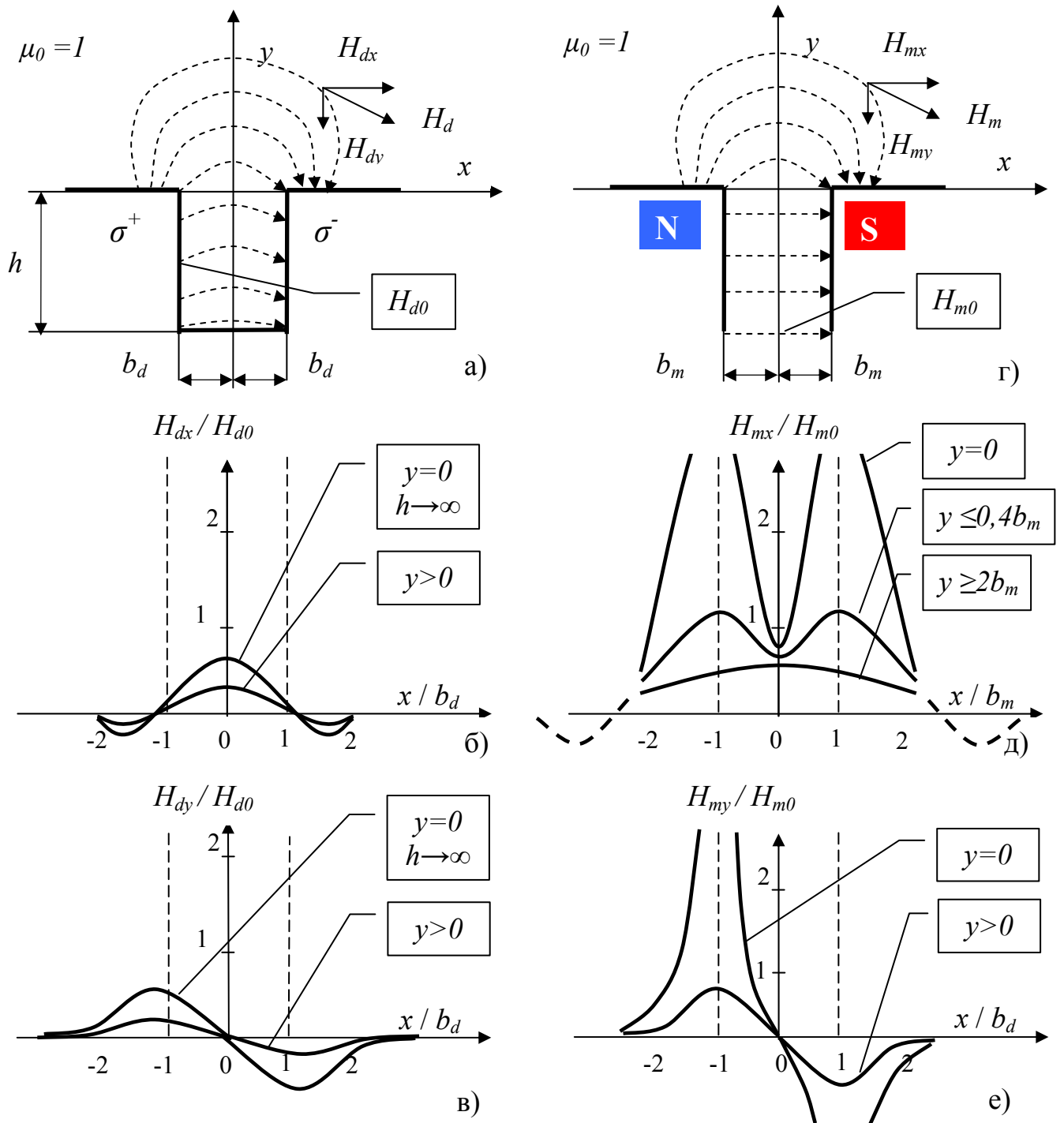
В теории магнитной дефектоскопии [4] аналитически решены задачи вычисления поля для некоторых моделей дефектов в безграничном пространстве с постоянной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$ (линейный случай). Решения для полей рассеяния дефектов получены на основе решения уравнений Максвелла ($\text{div} B = 0, \text{rot} H = 0$) с учетом граничных условий: непрерывности тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля на границе среды дефекта 1 и пространства 2 ($H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$); непрерывности нормальной составляющей магнитной индукции ($B_{n 1} = B_{n 2}$).

В работе [4], получены зависимости, описывающие поле над поверхностью дефекта типа «наружная трещина» (рис. 2а) для тангенциальной H_{dx} и нормальной H_{dy} составляющих напряжённости поля дефекта (рис. 2б, в).

В работе [6] по теории магнитной записи сигналов приведена модель поля рассеяния магнитной головки в статическом режиме (Рис. 2 г) для среды, магнитная проницаемость которой существенно уступает проницаемости сердечника головки.

Решение задачи магнитостатики для определения полей рассеяния МГ записи получено с использованием метода конформных отображений. При этом был принят ряд допущений: идеализация геометрии МГ (полюса с прямоугольными гранями, длина и глубина которых бесконечно велики); длина зазора бесконечно велика, а ширина весьма мала.

Относительная напряжённость составляющих поля рассеяния магнитной головки представлена графическими зависимостями рис. 2д, е).

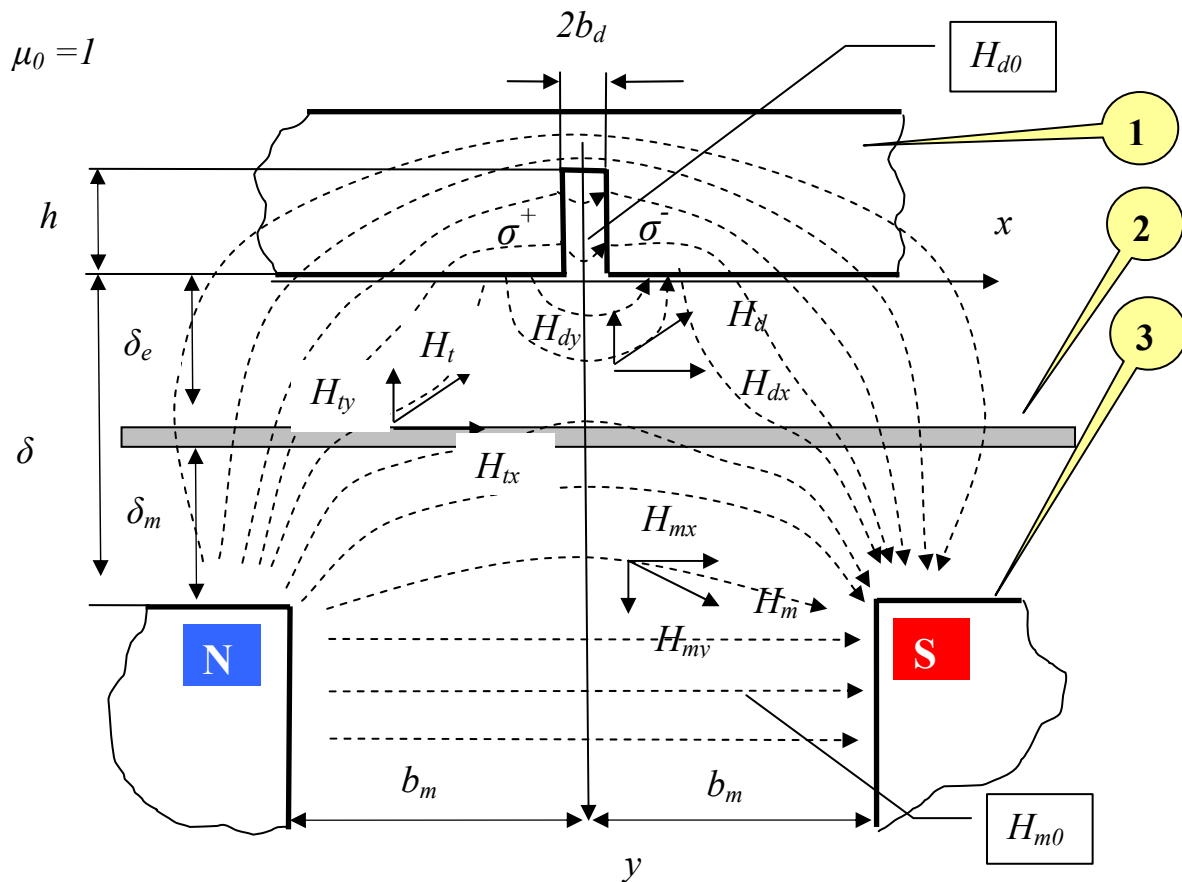


а, г – схеми моделей; б, д – функції відносительної напруженості тангенціальної складової поля; в, е – функції відносительної напруженості нормальної складової поля

Рисунок 2 – Магнітні поля розсіяння дефекта і магнітної головки записи

Сущность предлагаемой математической модели намагничивания в условиях ЛПВ состоит в том, что магнитные поля рассеяния в плоскости магнитной ленты H_t рассматриваются как следствие действия двух генераторов полей (совместное действие которых соответствует принципу суперпозиции) – собственно генератора ЛПВ (первичный генератор полей напряжённостью H_m (в зазоре - H_{m0})), и намагниченного образца с дефектом (вторичный генератор полей, напряжённостью H_d) (рис. 3):

$$\vec{H}_t = \vec{H}_m + \vec{H}_d \quad (1)$$



1 – ферромагнитный образец с поверхностным дефектом; 2 – магнитная лента; 3 – генератор намагничивания ЛПВ

Рисунок 3 – Схема модели магнитных полей рассеяния поверхностного дефекта в условиях ЛПВ

Функции пространственного распределения магнитных полей рассеяния в условиях ЛПВ получены для параметров и системы координат схемы (рис. 3) с использованием аналитических методов расчётов магнитных цепей на основе синтеза известных моделей магнитных полей рассеяния: поверхностного дефекта [4] и магнитной головки записи [6].

Для определения нормальной и тангенциальной составляющих напряжённости магнитного поля рассеяния на основе параметров модели (рис. 3) при

условиях: постоянной магнитной проницаемости образца $\mu_e = const$ (линейный случай); непрерывности составляющих магнитного поля на границе сред ($H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$ и $\mu_1 \cdot H_{n1} = \mu_2 \cdot H_{n2}$); идеализации геометрии генератора ЛПВ (полюса с прямоугольными кромками, длина и глубина которых бесконечно велики) получены следующие зависимости.

Нормальная и тангенциальная составляющие напряженности магнитного поля рассеяния генератора ЛПВ H_{mx} и H_{my} для зоны неконтакта ($0 < y < \delta$):

$$H_{mx} = H_m \cdot \cos \left[\frac{1}{2} \arctg \left(\frac{-2x \cdot (\delta - y)}{|x^2 - (\delta - y)^2 - b_m^2|} \right) \right], \quad (2)$$

$$H_{my} = H_m \cdot \sin \left[\frac{1}{2} \arctg \left(\frac{-2x \cdot (\delta - y)}{|x^2 - (\delta - y)^2 - b_m^2|} \right) \right],$$

где модуль напряженности магнитного поля рассеяния генератора ЛПВ H_m для области зоны неконтакта ($0 < y < \delta$) определяется как:

$$H_m = \frac{2H_{m0} \cdot b_m}{\pi \cdot \sqrt[4]{[x^2 - (\delta - y)^2 - b_m^2]^2 + 4x^2(\delta - y)^2}} \quad (3)$$

Нормальная и тангенциальная составляющие напряженности магнитного поля рассеяния дефекта H_{dx} и H_{dy} для области зоны неконтакта ($0 < y < \delta$) определяются как:

$$H_{dx} = \frac{H_{mx\delta} \cdot \mu_m \cdot b_m}{\mu_e \cdot b_d} \cdot \left[\arctg \frac{h \cdot (x + b_d)}{(x + b_d)^2 + y \cdot (y + h)} - \arctg \frac{h \cdot (x - b_d)}{(x - b_d)^2 + y \cdot (y + h)} \right], \quad (4)$$

$$H_{dy} = \frac{H_{my\delta} \cdot \mu_m \cdot b_m}{\mu_e \cdot b_d} \cdot \ln \left[\frac{(x + b_d)^2 + (y + h)^2}{(x + b_d)^2 + y^2} \cdot \frac{(x - b_d)^2 + y^2}{(x - b_d)^2 + (y + h)^2} \right],$$

где функционалы напряженностей для плоскости поверхности исследуемого образца $H_{mx\delta}$, $H_{my\delta}$ и $H_{m\delta}$ получены как частный случай формул (2) и (3) при условии ($y=0$):

$$H_{mx\delta} = H_{m\delta} \cdot \cos \left[\frac{1}{2} \arctg \left(\frac{-2x \cdot \delta}{|x^2 - \delta^2 - b_m^2|} \right) \right], \quad (2a)$$

$$H_{my\delta} = H_{m\delta} \cdot \sin \left[\frac{1}{2} \arctg \left(\frac{-2x \cdot \delta}{|x^2 - \delta^2 - b_m^2|} \right) \right],$$

$$H_{m\delta} = \frac{2H_{m0} \cdot b_m}{\pi \cdot \sqrt[4]{(x^2 - \delta^2 - b_m^2)^2 + 4x^2\delta^2}} \quad (3a)$$

Полученные функциональные зависимости позволяют выполнить, в качестве иллюстрации, численный расчёт математической модели схемы ЛПВ (рис. 4).

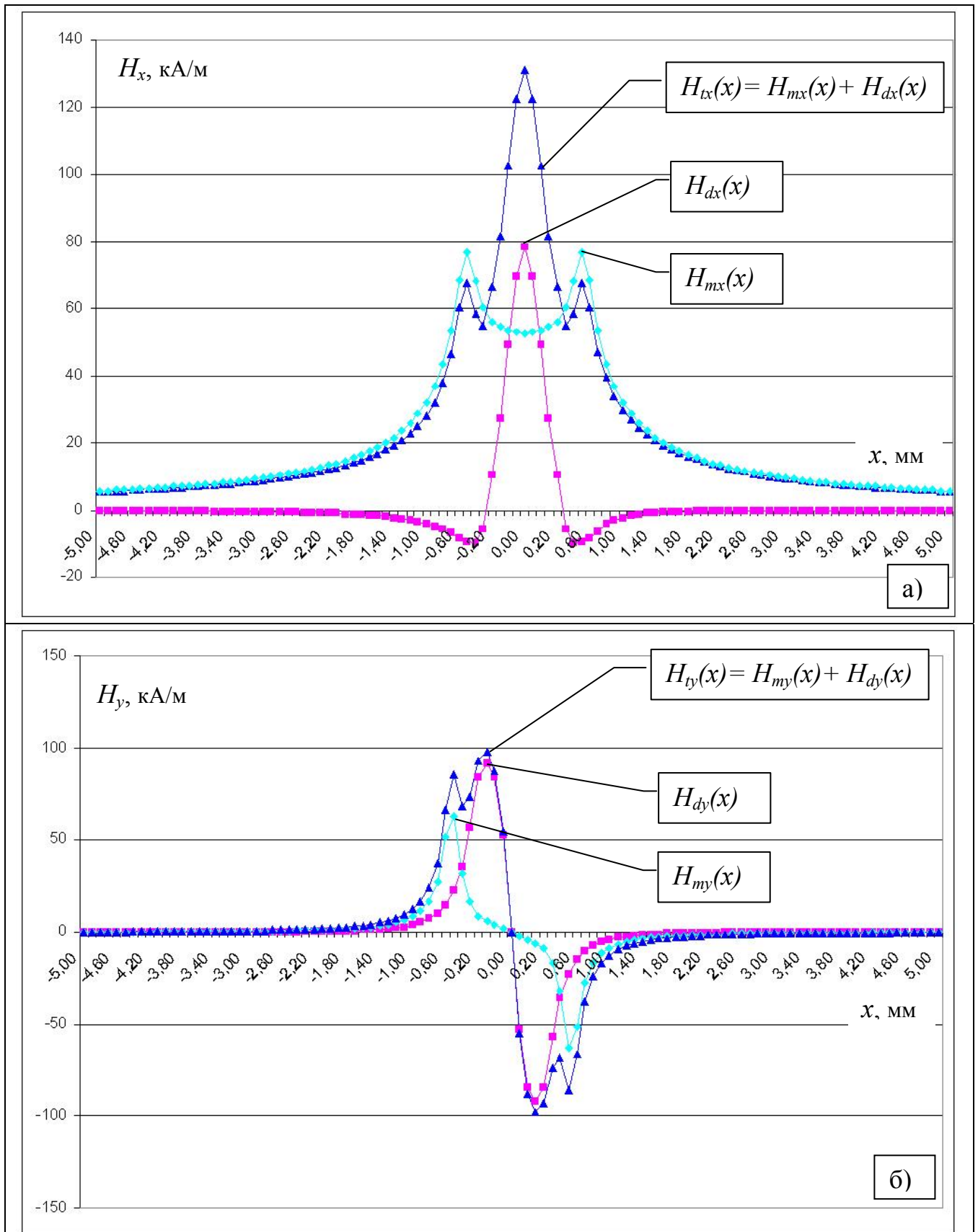


Рисунок 4 – Результати расчёта математической модели схемы ЛПВ - графики функций составляющих напряжённости полей рассеяния в плоскости магнитного носителя $y=0,2$ мм: а) продольной $H_{tx}(x)$; б) поперечной $H_{ty}(x)$

Выводы

1. Выполнена формализация основных положений принципа локального полюсного возбуждения для магнитографирования поверхностных и приповерхностных слоёв ферромагнитных изделий.

2. Предложена математическая модель намагничивания, описывающая пространственные распределения напряженности магнитных полей рассеяния образца в условиях локального полюсного возбуждения.

3. Предложенная теоретическая модель нуждается в оценке качества и исследовании её поведения, с целью установления основных физических закономерностей процесса магнитографирования для данного принципа намагничивания, а также определения влияния параметров генератора ЛПВ на функцию остаточной намагниченности магнитограммы, что и является предметом дальнейших исследований.

Литература.

1. Дж. Дохерти. Неразрушающие испытания // Экспериментальная механика. Под ред. А. Кобояси. Кн.2. – М.: Мир, 1990. – С.43-82.
2. ГОСТ 25225-82. Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод; Введ. 23.04.1982 – М.: Изд-во стандартов. 1982 - 16с.
3. Хусанов М.Х. Магнитографический контроль сварных швов. М.: Недра, 1973. – 176 с.
4. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. - 265с.
5. Патент на винахід (Україна) №42880 від 15. 11. 2001р., Бюл. №10, 7G 01N 27/82, 27/83: Спосіб магнітооптичного контролю виробу. Заявники патенту: Левий С.В., Агаліді Ю.С. По заявці № 99074257, від 22.07.1999. Приоритет від 05.10.2001. Автори винаходу: Левий С.В., Агаліді Ю.С.
6. Лауфер М.В., Крыжановский И.А. Теоретические основы магнитной записи сигналов на движущийся носитель. К.: Вища школа, 1982. -270 с.

<p>Агаліді Ю.С. Принцип та теоретична модель локального полюсного збудження при магнітографуванні. Запропоновано теоретичну модель, яка описує просторові розподіли складових напруженості магнітних полів розсіяння зразку в умовах локального полюсного збудження.</p>	<p>U. Agalidy. Principle and theoretical model of local polar stimulation for magnetographical. Theoretical model, which describe spatial allocation of examples magnetic field strength of local polar stimulation, was proposal.</p>
---	---

*Надійшла до редакції
10 червня 2006 року*

УДК 621.317

АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОБРОБКИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ШИРОКОПОЛОСНИХ ДАТЧИКІВ УЗ ДЕФЕКТОСКОПІВ

*Баженів В.Г., Галаган Р.М., Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

Проведено аналіз кореляційних характеристик імпульсів складної форми з метою вибору оптимального імпульсу для збудження широкополосних датчиків і подальшої математичної обробки

Вступ. Постановка задачі

Відомо, що кореляційні методи обробки сигналів широко застосовуються в радіолокації для визначення відстані до певної цілі [1, 2]. Такі методи характеризуються високою завадостійкістю і дуже високою точністю.

Проте при побудові УЗ дефектоскопів кореляційну обробку використовували значно рідше, що обумовлювалось певними чинниками:

1) УЗ датчики, що широко використовувались в дефектоскопії, мали вузьку пропускну смугу (тому традиційно УЗ перетворювачі збуджуються «ударним імпульсом» і мають обмежений спектр; а як відомо, для ефективного використання кореляційних методів бажано мати сигнали складної форми з широким спектром);

2) Кореляційні методи вимагають використання складних апаратних засобів обробки, що призводило до значного збільшення габаритів усієї системи (це було небажано для розроблюваних мобільних дефектоскопів).

Останнім часом в зв'язку з появою композитних широкополосних УЗ датчиків, а також з розвитком і мініатюризацією процесорної техніки, стає актуальним використання кореляційних методів в УЗ дефектоскопії. При цьому змінюються підходи до збудження таких датчиків – замість ударного збудження можливе використання модульованих сигналів складної форми.

При цьому в якості збуджуючого сигналу рекомендується використовувати гаусівський радіоімпульс [3,4]. Це дозволяє отримати задані енергетичні характеристики датчиків.

Гаусівський радіоімпульс використовувався і для збудження звичайних резонансних датчиків. Але формування такого імпульсу вимагає значних апаратних затрат для реалізації збуджуючих генераторів. Відомо, що використання прямокутних імпульсів замість гаусівських значно спростило б схему генератора збуджуючих імпульсів.

Метою роботи є порівняльний аналіз впливу форми збуджуючого сигналу на похибку визначення максимуму кореляційної функції.

Вибір форми збуджуючого імпульсу

В якості імпульсів збудження було запропоновано розглянути три різні форми імпульсів.

Гаусівський радіоімпульс (рис.1a). Ця форма імпульсу є найбільш доцільною для збудження широкосмугових датчиків. Такі датчики характеризуються хоч і широкою, але все ж обмеженою частотною смугою (а, як відомо, важливою властивістю гаусівського радіоімпульсу є те, що його спектр теж описується гаусівською функцією і має ефективну обмежену ширину спектра) [5]. За допомогою мікроконтролера створити такі імпульси нескладно, але для збудження датчика їх треба попередньо підсилювати, що ускладнює схему і збільшує її габарити.

Цуг прямокутних відеоімпульсів (рис.1b). Вбір такої форми обумовлений тим, що високовольтні відеоімпульси простіше технічно реалізувати. Але спектр такого сигналу має вищі гармоніки, тому при передачі та прийомі його широкосмуговим датчиком форма сигналу може спотворюватись.

Цуг прямокутних відеоімпульсів, модульованих функцією Гауса (рис.1c). Останнім часом на ринку з'явилися спеціальні ключові схеми, що дозволяють формувати цуг послідовних високовольтних прямокутних імпульсів різної амплітуди.

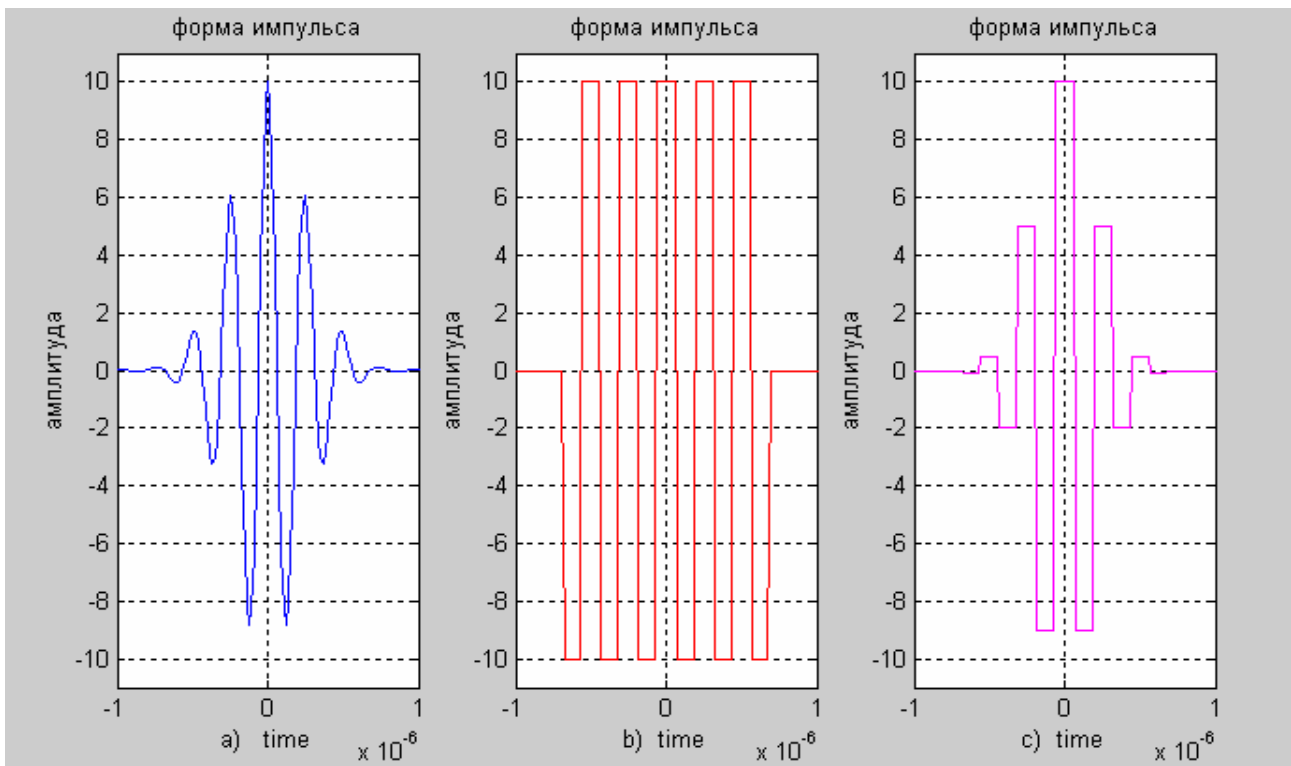


Рисунок 1 – Форми використовуваних сигналів

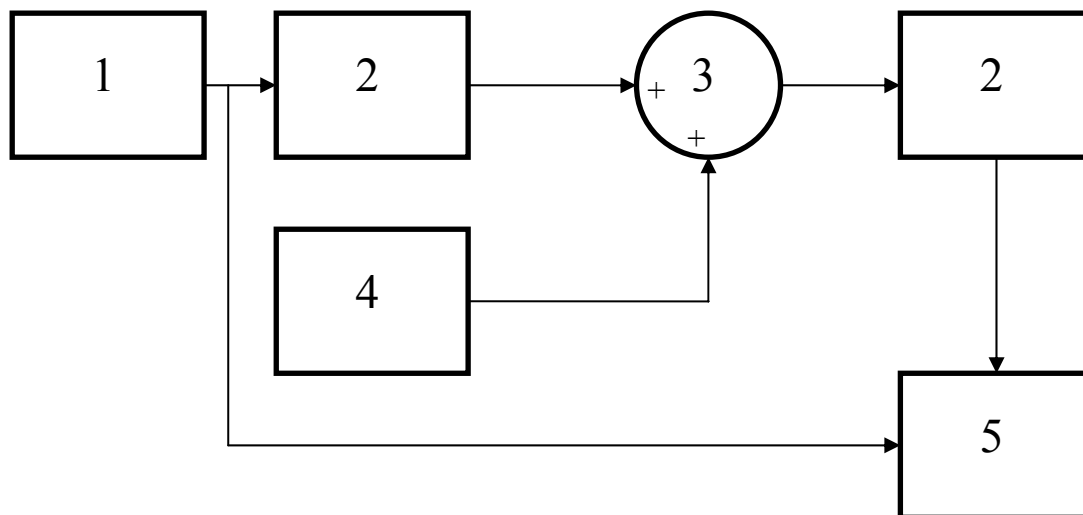
Вибрані форми сигналів були відтворені в середовищі MATLAB 6.0. Математичне моделювання теж проводилось в даному середовищі [6].

Схема експерименту

Основним завданням було дослідити вплив шумів об'єкта контролю та характеристик датчика на точність визначення кореляційної функції (КФ) для заданих форм сигналів.

Опорна частота сигналів обиралась рівною 2 або 4 МГц (кількість періодів дорівнювала 5-6). Частота дискретизації – 65 МГц (з такою частотою працює блок восьмиканальних АЦП ADS 5272 фірми Burr-Brown, рекомендований для побудови ультразвукових систем). Смуга пропускання широкосмугового датчика встановлювалась в межах від 1 до 15 МГц. Еталонний час зсуву складав 5 мкс.

Було запропоновано наступну схему моделювання (рис.2). Еталонний сигнал заданої форми створювався за допомогою вбудованих функцій MATLAB – блок 1. Такий же еталонний сигнал зсувався по відношенню до першого на фіксований час. Оскільки час зсуву був фіксований та відомий, то після певної обробки зсунутого сигналу, можна було б визначити вплив цієї обробки на точність визначення часу затримки за допомогою КФ.



1 – формувач збуджуючого еталонного сигналу заданої форми; 2 – широкосмуговий датчик (в якості схеми заміщення використано еліптичний смуговий фільтр зі смугою пропускання 1-15 МГц); 3 – суматор; 4 – генератор шуму; 5 – корелятор

Рисунок 2 – Схема моделювання

Послідовність дій була наступною: зсунутий сигнал фільтрувався перший раз (таким чином моделювалось збудження датчика на випромінення – блок 2). Потім сигнал через суматор 3 змішувався з шумом, який генерує блок 4 (причому рівень сигнал/шум задавався в межах 0.5-10). Цим самим моделювався

процес проходження корисного сигналу в об'єкті контролю і його відбиття від дефекту. Суміш корисного сигналу і шуму подавалась вдруге на фільтр (таким чином моделювався прийом сигналу широкосмуговим датчиком).

На останньому етапі визначався максимум кореляційної функції двох сигналів: еталонного та обробленого, після чого визначався часовий зсув між еталоном та обробленим сигналом. Цей зсув порівнювався із заданим часом, далі визначалась похибка. Для збільшення точності визначення максимуму КФ застосовувалась інтерполяція отриманої функції з кроком 1/100.

При моделюванні враховувалась затримка при фільтрації.

Отримані результати

На рис. 3 приведені часові діаграми, отримані для різних форм сигналів при моделюванні.

Для кожної форми сигналу проводилось більше 100 моделювань вимірювань при різних співвідношеннях сигнал/шум (С/Ш), після чого визначалась дисперсія похибки для кожного співвідношення.

Нижче на рис. 4 приведено графіки залежності середнього квадратичного відхилення (СКВ) похибки вимірювання зміщення еталонного сигналу для кожної форми сигналів від співвідношення С/Ш. З графіка чітко видно, що отримана залежність СКВ для кожної форми сигналів має випадковий характер. В даному випадку навіть важко казати про яку-небудь функціональну залежність. З графіку лише видно, що при збільшенні співвідношення С/Ш СКВ зменшується.

«Сплески» на графіку (рис.4) мають приблизно однакову величину. Це наводило на думку, що ці помилкові дані є наслідком певної неоднозначності при визначенні максимуму КФ між еталонним сигналом та зсунутим фільтрованим (на який накладався шум) сигналом.

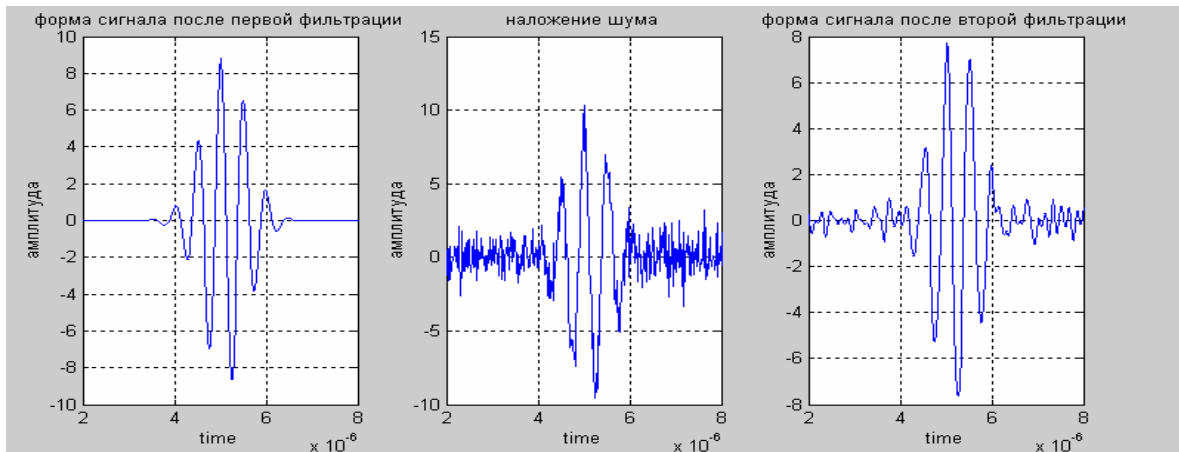
При визначенні СКВ враховувався той факт, що КФ складних періодичних сигналів теж являється періодичною з чітко вираженим одним максимумом. Період цієї функції відповідає періоду корельованих сигналів. Однак при кореляції вихідного сигналу та зсунутого фільтрованого (на який накладався шум) сигналів КФ не мала чітко вираженого максимуму. Таких максимумів ставало два – причому один відповідав дійсному зміщенню сигналу, а інший (помилковий) – був зсунутий на період.

При визначенні максимуму КФ це необхідно було враховувати, щоб не отримати помилкових даних.

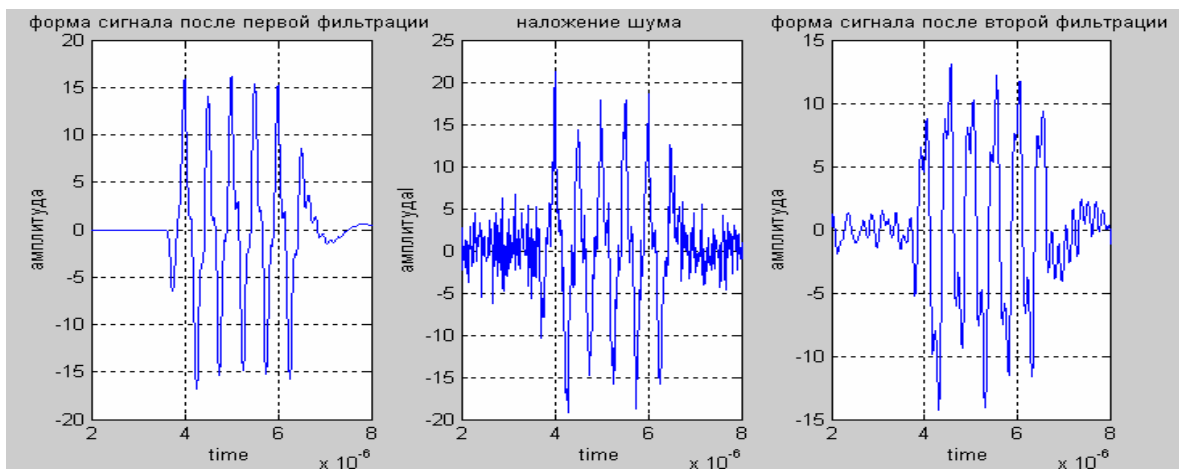
Було розроблено програмний алгоритм відсіювання помилкових даних («сплесків»). Кінцевий результат кореляційної обробки з використанням програмного алгоритму відсіювання «сплесків» представлено на рис.5.

З графіків чітко видно, що СКВ зменшується при збільшенні співвідношення С/Ш.

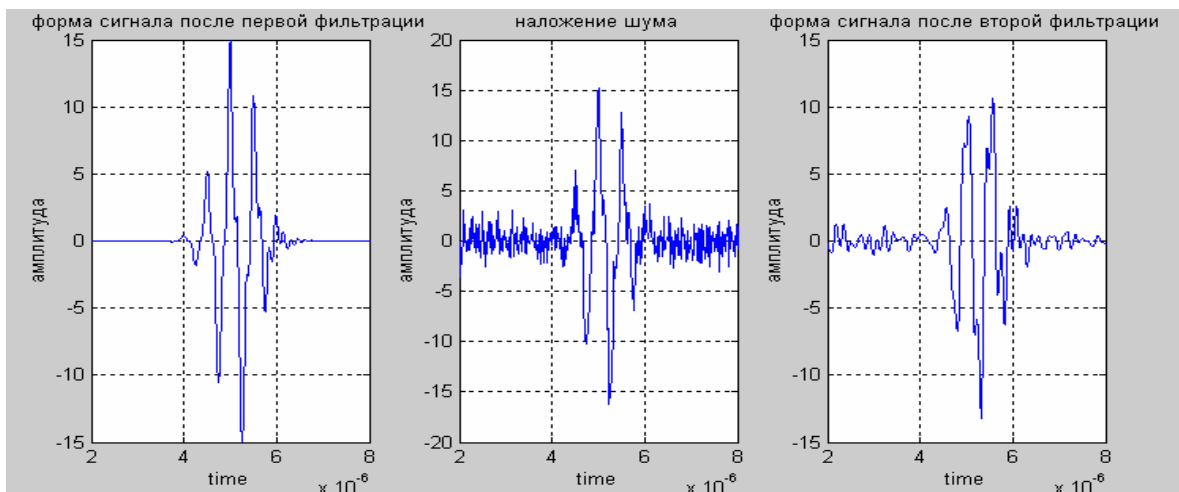
Результати для кожної форми сигналів майже однакові.



а)



б)



в)

а) гаусівський імпульс; б) цуга прямокутних імпульсів; в) цуга прямокутних відеоімпульсів, модульованих функцією Гауса
Рисунок 3 – часові діаграми при співвідношенні С/Ш=1

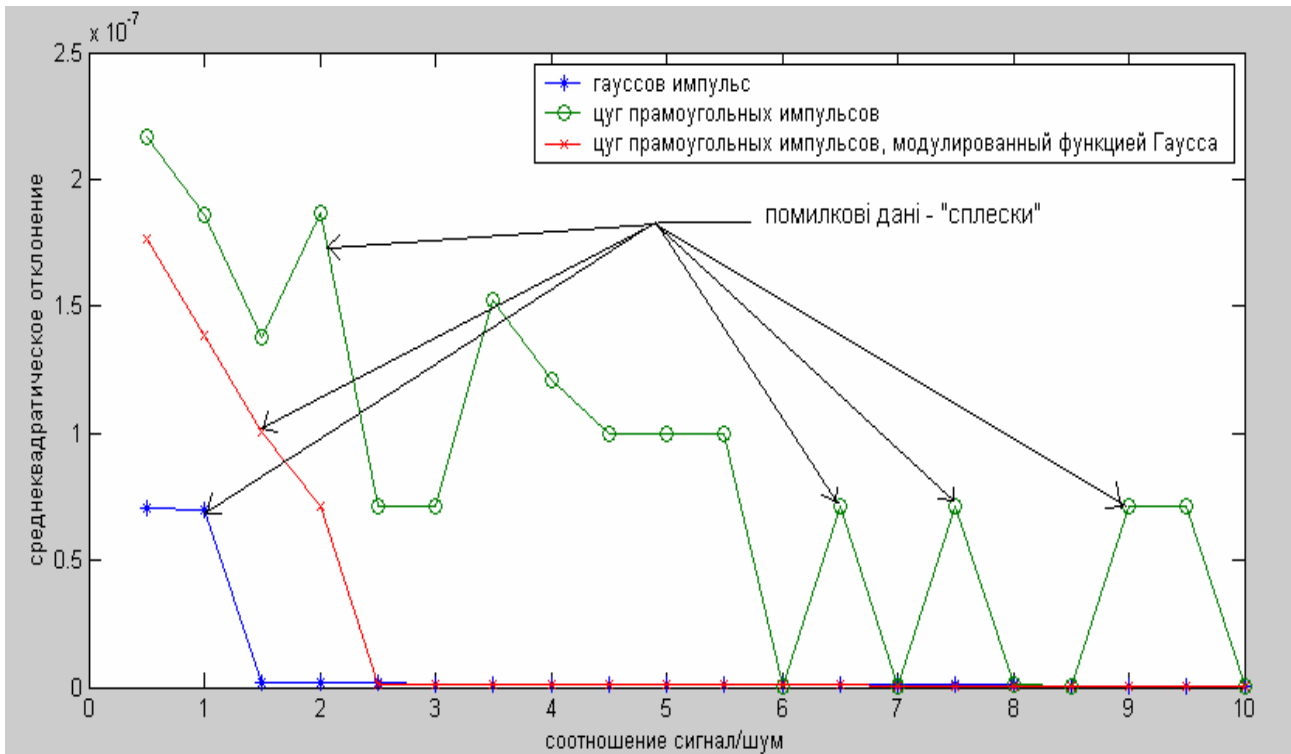


Рисунок 4 – Залежність СКВ від співвідношення сигнал/шум

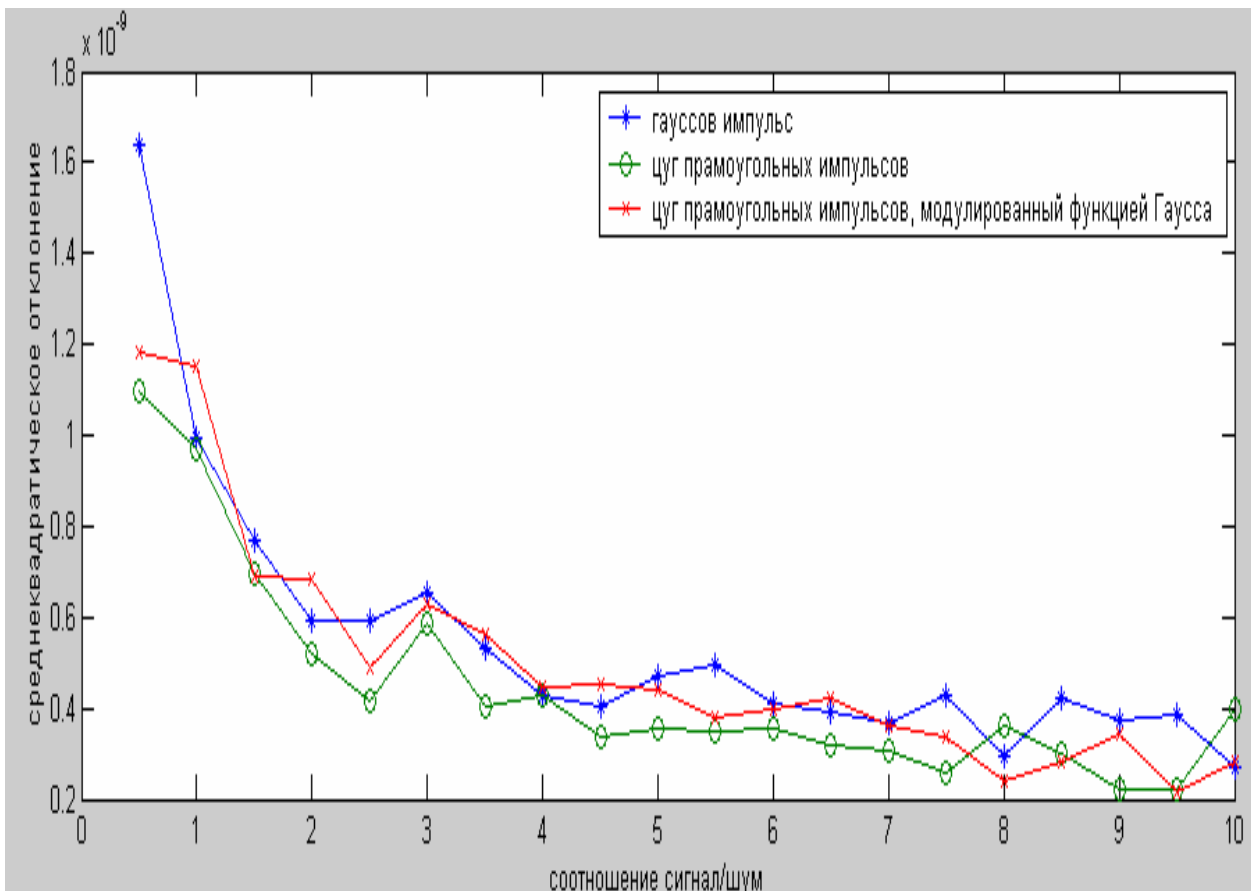


Рисунок 5 – Скорегована залежність СКВ від співвідношення сигнал/шум

Висновки

Отримані результати дають підстави рекомендувати використовувати в якості імпульсів збудження цуг прямокутних відеоімпульсів, модульованих функцією Гауса, або просто цуг прямокутних імпульсів, оскільки ці форми сигналів апаратно простіше реалізувати.

Однак для того, щоб використовувати програмний алгоритм обробки отриманих даних (для збільшення точності), необхідно проводити **n**-вимірювань (принаймні, більше 10). А це збільшує час обробки отриманої інформації.

Доцільним продовженням роботи є експериментальне підтвердження отриманих результатів моделювання.

Література

1. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці. – Х: Сміт, 2003. – С. 580. – Том.1.
2. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. – Л: Энергия, 1972, С. 816.
3. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. – М.: Металлургия, 1991. – С.725
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2004. – С.864.
5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М: Высшая школа, 2003. – С.462.
6. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. 2-е издание. – СПб.: Питер, 2006. – С.751.

Баженов В.Г., Галаган Р.М. **Анализ корреляционной обработки акустических сигналов широкополосных датчиков УЗ дефектоскопов.**

Проведён анализ корреляционных характеристик импульсов сложной формы с целью выбора оптимального импульса для возбуждения широкополосных датчиков и последующей математической обработкой.

Galagan R.M., Bazhenov V.G. **Analysis of correlation processing of acoustic defectoscope broadband probe signals.**

The article analyses correlation characteristics of complex form pulses. The purpose of the analysis is determine the most appropriate pulse form for stimulating broadband probes and its subsequent mathematical processing.

*Надійшла до редакції
10 червня 2006 року*