

УДК 620.179.17

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-99-109

ОДНОПОЛЯРНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ МЕТАЛОВИРОБІВ

К. Л. Ноздрачова, А. Ю. Слободчук*

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут";
61002, м. Харків, вул. Кирпичова 2, Україна; e-mail: nozdrachova@gmail.com*

Підвищити чутливість ємнісних ультразвукових перетворювачів можливо трьома способами: збільшенням ємності самого перетворювача, підвищенням прикладеного до обкладок перетворювача поляризуючої і імпульсної високочастотної напруги, використанням сучасних методів обробки збуджених і прийнятих з виробу інформаційних пакетних імпульсів. Збільшення ємності перетворювача обмежене конструктивними можливостями самого перетворювача і підбором діелектрика, що відокремлює пластину від поверхні електропровідного об'єкта контролю. Використання сучасних методів обробки прийнятої інформації значно ускладнює і здорожчує прилад із застосуванням ємнісного перетворювача. Найбільш прийнятним, на даний момент, способом підвищення чутливості є збільшення потужності високочастотних генераторів подачі напруги за умови збудження пакетних імпульсів. Представлений в статті генератор дозволяє створювати імпульсні пікової напруги в малоємнісних перетворювачах більш 3 кВ з частотами до 5 МГц з тривалістю в 1 період частоти заповнення та частотами зондування до 1 кГц. Експериментально показано, що за допомогою макета нового генератора отримані амплітуди імпульсів, що пройшли сталевий зразок товщиною 20 мм, відношення яких до амплітуди завод, прийнятих мініатюрним п'єзоелектричним перетворювачем, становить 13 разів. Використання розробленого потужного підсилювача імпульсів напруги дозволить підвищити амплітуду імпульсів прийнятих від перетворювача і багаторазово відображених у виробі.

Ключові слова: контроль якості, вимірювання, діагностика, перетворювач ємнісного типу, схемотехніка, генератор радіосигналів напруги, тривалість імпульсу, частота.

Повысить чувствительность емкостных ультразвуковых преобразователей возможно тремя способами: увеличением емкости самого преобразователя, повышением приложенного к обкладке преобразователя поляризующего и импульсного высокочастотного напряжения, использованием современных методов обработки возбужденных и принятых с изделия информационных пакетных импульсов. Увеличение емкости преобразователя ограничено конструктивными возможностями самого преобразователя и подборкой диэлектрика, отделяющего пластину от поверхности электропроводящего объекта контроля. Использование современных методов обработки принятой информации значительно усложняет и повышает цену прибора с применением емкостного преобразователя. Наиболее приемлемым на данный момент способом повышения чувствительности является увеличение мощности высокочастотных генераторов подачи напряжения при условии возбуждения пакетных импульсов. Представленный в статье генератор позволяет создавать импульсные пиковые напряжения в малоемкостных преобразователях более 3 кВ с частотами до 5 МГц с длительностью в 1 период частоты заполнения и частотами зондирования до 1 кГц. Экспериментально показано, что с помощью макета нового генератора получены амплитуды импульсов, прошедших стальной образец толщиной 20 мм, отношение которых к амплитуде шума, принятых миниатюрным пьезоэлектрическим преобразователем, составляет 13 раз. Использование разработанного мощного усилителя импульсов напряжения позволит повысить амплитуду импульсов, принятых от преобразователя и многократно переотраженных в изделии.

Ключевые слова: контроль качества, измерения, диагностика, преобразователь емкостного типа, схемотехника, генератор радиосигналов напряжения, длительность импульса, частота.

It is possible to increase the sensitivity of capacitive ultrasonic transducers in three ways: increasing the capacitance of the transducer, increasing the polarizing and pulsed high-frequency voltage applied in the transducer cover, using modern methods of processing information packet pulses excited and received from the product. The

increase in the capacity of the transducer is limited by the design capabilities of the transducer itself and the selection of the dielectric separating the plate from the surface of the electrically conductive testing object. Using modern methods of processing the received information significantly complicates and increases the cost of implementation of the device using a capacitive transducer. The most acceptable, at the moment, way to increase the sensitivity is to increase the power of high-frequency voltage supply generators provided that packet pulses are excited. The generator presented in the article allows to create pulsed peak voltages in low-capacitance transducers of more than 3 kV with frequencies up to 5 MHz with a duration of 1 period of the filling frequency and sounding frequencies up to 1 kHz. It was experimentally shown that using the prototype of a new generator, the amplitudes of the pulses transmitted through a steel sample 20 mm thick were obtained, the ratio of which to the noise amplitude received by the miniature piezoelectric transducer is 13 times. Using the developed powerful amplifier of voltage pulses will increase the amplitude of the pulses received from the transducer and repeatedly reflected in the product.

Keywords: testing, measurements, diagnostics, capacitive transducer, circuitry, voltage radio signal generator, pulse duration, frequency.

Вступ

Акустичні методи неруйнівного контролю засновані на реєстрації коливань, що збуджуються або виникають в об'єкті контролю (ОК). Їх застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності структури, міжкристалічної корозії, дефектів склеювання, пайки, зварювання тощо) в деталях і виробках, виготовлених з різних матеріалів.

Вони дозволяють контролювати геометричні параметри при односторонньому допуску до виробу, а також фізико-механічні властивості металів і металовиробів без порушення цілісності матеріалу. [1 - 3].

В останні роки виник великий інтерес в застосуванні перетворювачів, які використовують повітря в якості контактного середовища, але є обмеження в їх застосуванні. Спочатку ці пристрої були в вигляді високочастотних мікрофонів [4], але в цілому вони не могли працювати на частотах понад 200-300 кГц. Однак, подальші конструкції [5], дозволяють працювати в мегагерцовому діапазоні. Перетворювачі з повітряно-акустичним зв'язком можуть бути класифіковані на дві групи, п'єзоелектричні і ємнісні (або електростатичні).

У більшості випадків п'єзоелектричні перетворювачі з повітряно-акустичної зв'язком не ефективні при контролі виробів і мають низьку чутливість. Цей недолік обумовлений великими втратами в повітряному проміжку між виробом і перетворювачем. Проте, були досягнуті певні успіхи при розробці використанні в схемах високовольтних генераторів і широкосмугових підсилювачів для

збудження і прийому акустичних імпульсів [6, 7].

Існує кілька механізмів, за допомогою яких чутливість перетворювачів може бути збільшена. Відомі п'єзоелектричні приймачі звукового тиску містять п'єзокерамічний перетворюючий елемент, жорстко пов'язаний з металевою мембраною, що сприймає звуковий тиск, і п'єзокерамічний елемент для компенсації завад [8]. Металеві мембрани, прикріплені до 200 кГц п'єзоелектричного елемента, були використані, щоб збільшити зчеплення в повітрі. П'єзоперетворювач (ПЕП) складається з шарів різних матеріалів, які прикріплені до робочої поверхні датчика [9], з ідеальним акустичним імпедансом. Ці шари повинні бути товщиною чверті довжини хвилі, і, отже, вони зменшують загальну пропускну здатність пристрою. В якості шарів були використані такі матеріали, як плексиглас [10], силіконовий каучук [11], епоксидна смола [12], аерогель [13] і "тверде повітря" (ущільнені дрібні заповнені повітрям сфери) [14, 15].

Був також незначний успіх при використанні повітря під дуже високим тиском в якості контактного середовища, зі звичайними п'єзоелектричними пристроями, високочастотними підсилювачами і схемами високої потужності [16]. Інший спосіб для поліпшення невідповідності опору є використання п'єзоелектричного полімеру, який має акустичний опір, ближче до повітря, щоб зробити елемент, такий як полівініліденфторид (ПВДФ) [17], або сополімер [18]. Також незначний успіх отримали при використанні в якості контактного середовища повітря під дуже високим тиском, із звичайних п'єзоелектричних

пристроїв, підсилювачами і схемами великої потужності [16].

Інший метод полягає в модифікації звичайних п'єзокерамічних елементів так, щоб їх імпеданс зменшився, і, таким чином збільшуючи їх чутливість. Як правило, ПЕП виготовляють з п'єзокомпозитних матеріалів, і наповнювача, такого як епоксидна смола. П'єзокомпозитні матеріали мають різні властивості в залежності від того, як модифікований матеріал [19].

У світі широко використовують і розробляють різні схеми і види ультразвукових ємнісних мікромеханічних ультразвукових перетворювачів (ЄМУП) для генерації і детектування ультразвуку в повітрі [20]. Пристрій (рис. 1) являє собою плоский конденсатор з одним жорстким нерухомим електродом і гнучким рухомим (що представляє

собою мембрану) з повітряними порожнинами між ними. Мембрана являє собою діелектричний полімер, такий як поліетилентерефталат (ПЕТ або майлар), одна сторона якого анодована алюмінієм. На електроди подається постійна напруга зсуву, виникають протилежні заряди на двох електродах і рухома мембрана притягається до нерухомого електроду. Відбувається поширення ультразвуку в повітрі. Частота коливань залежить від товщини і маси мембрани. Мембрана ємнісного мікромеханічного перетворювача активується напругою. Зазвичай використовують напругу підвищеної частоти, особливо високочастотну напругу плюс зміщення постійним струмом. Розміри полімерної плівки на рис.1 і елементів задньої панелі сильно перебільшені для ясності.

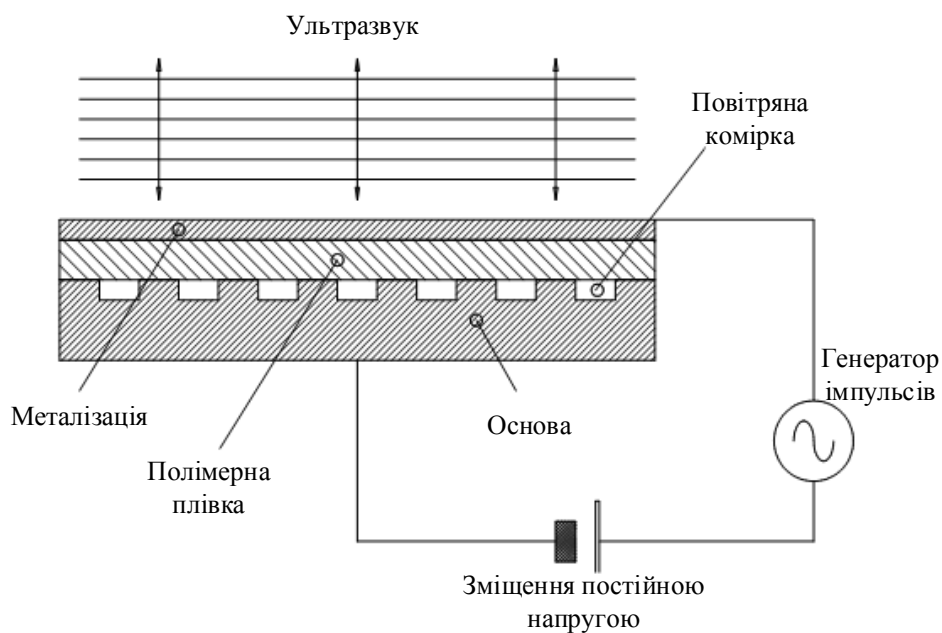


Рисунок 1 - Схема ємнісного перетворювача

При роботі в якості приймача, ультразвукові хвилі приводять до коливання мембрани, внаслідок чого змінюється ємність перетворювача, що може бути виміряна за допомогою електроніки. Ємнісні датчики даного типу служать як випромінювачами, так і приймачами ультразвукових сигналів.

Через малу масу мембрани, ЄМУП є ширококутовими тому з їх допомогою можна генерувати широкий спектр ультразвукових частот. Частотна характеристика визначається не тільки товщиною мембрани, але і шорсткістю

і розміром поверхні нерухомого електроду. Для генерації і реєстрації ультразвукових коливань в рідині їх необхідно герметизувати шляхом підбору матеріалу мембрани. Перетворювачі можуть працювати при температурах понад 500 °С.

Один елемент датчика може бути об'єднаний в масив, з'єднаних паралельно перетворювачів. (рис. 2). Частотний діапазон (100 кГц - 70 МГц), динамічний діапазон (130 дБ / В), максимальний тиск на виході (35 кПа/В), і чутливість приймача (50 дБ/Па/ Гц)

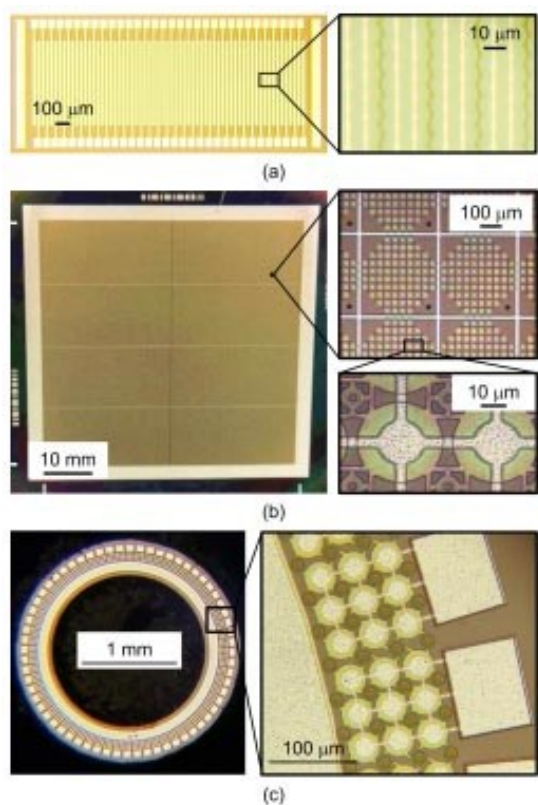


Рисунок 2 - ЄМУП масив:

- а) А 64 - елементний 30 МГц лінійний масив з кроком елементів 36 мкн;
 б) А 128 x 128 - елементний 30 МГц прямокутний масив з кроком елементів 420 мкн; с) А 64 елементний 10 МГц кругової масив з 100 мкн розміром елемента

Слід зазначити, що дані датчики в основному застосовуються в медичних ультразвукових перетворювачах (традиційних, вигнутих або матричних перетворювачах, в катетера), в бортових ультразвукових датчиках присутності, в датчиках тиску, в ультразвукових датчиках CO₂ для капнографії або в системах контролю повітря для будівель, в датчиках рівня рідини і якості рідини і в датчиках відбитків пальців. Використання датчиків даного типу в ультразвуковому неруйнівному контролі поки не знайшло застосування.

Останнім часом дослідження нових методів неруйнівного контролю та вдосконалення за рахунок стрімкого розвитку схемотехніки і електроніки вже існуючих набуває все більшого обороту. Не так давно було доведено перспективність застосування ємнісних перетворювачів в області неруйнівного

контролю, принцип роботи яких схожий з роботою ЄМУП [20], на відміну від них ємнісні перетворювачі (ЄП) складаються з двох обкладок, однією з яких (друга) служить сам об'єкт контролю (ОК), розміри і форму першої можна варіювати відповідно від сформованих завдань. Також чутливість ЄП залежить від діелектрика між пластинами і схемотехнічного рішення самого макета приладу. У даній роботі авторами розроблений потужний одно полярний підсилювач імпульсів напруги зі змінними параметрами для живлення перетворювачів ємнісного типу, що послужить значним підвищенням амплітуди прийнятих ультразвукових імпульсів.

Розробка, дослідження і аналіз результатів

Аналіз відомих літературних джерел [21-25] дозволив сформулювати вимоги до параметрів генератора високочастотних імпульсів (ГВІ), котрий повинен забезпечувати живлення ЄП, наприклад в найчастіше використовуваному для контролю і вимірювань частотному діапазоні. Він повинен формувати в ЄП, з нескінченним опором постійному струму, пакетні імпульси напруги з частотою заповнення від 1 до 5 МГц. Кількість періодів частоти заповнення імпульсу має становити 1 шт. Максимальна пікова амплітуда напруги на першій обкладці ЄП повинна бути не менше 3 кВ. Частоту слідування зондуєчих імпульсів необхідно регулювати в інтервалі від 10 Гц до 1 кГц в залежності від швидкості сканування ОК.

На підставі аналізу характеристик елементів силової електроніки, автори даної статті, прийшли до висновку про доцільність застосування в вихідних каскадах широкополосних симетричних трансформаторів, включених паралельно, а потім послідовно для досягнення коефіцієнта трансформації рівним 10. Були виконані експериментальні дослідження можливостей ряду підвищувальних трансформаторів на основі сердечників з фериту. Встановлено, що вони не дозволяють формувати вихідний сигнал необхідного частотного діапазону. У той же час було показано, що в заявленому частотному діапазоні деякі моделі MOSFET транзисторів в одноканальних схемах включення переключуються з достатніми часовими проміжками.

Для реалізації розробленого технічного рішення запропоновано формувати вихідний імпульс генератора високовольтних імпульсів у вигляді меандру, який перетворюється в синусоїду за рахунок ємнісних складових коаксіального кабелю, що підводиться і самого ПЕТ. Такий підхід дає можливість спростити високовольтну частину генератора, особливо на високих частотах зондування, і отримувати в навантаженні значні амплітуди збуджуючої напруги. Експериментально встановлено доцільність застосування паралельного включення до 10 шт. ширококутних симетричних трансформаторів в мостовому включенні, що дозволяє збільшити напругу за рахунок застосування високо частотних широкополосних симетричних трансформаторів. Польові MOSFET транзистори повинні витримувати імпульсний струм до

100 А, а також мати затвор з відносно невеликою ємністю «витік-затвор» для швидкого перезарядження затвора, і в слідстві швидкої комутації навантаження.

Встановлено доцільність виготовляти ГВІ у вигляді трьох основних блоків - формувача сигналів з регульованими параметрами, гальванічної оптичної розв'язки і високо частотного ширококутвого підсилювача потужності.

На основі сформованого підходу розроблений ГВІ, який дозволяє виконувати вимоги, необхідні для живлення ЄП сучасних засобів контролю, вимірювання і діагностики. Як приклад такої розробки на рис. 3 приведена електрична принципова схема блоку формувача ГВІ.

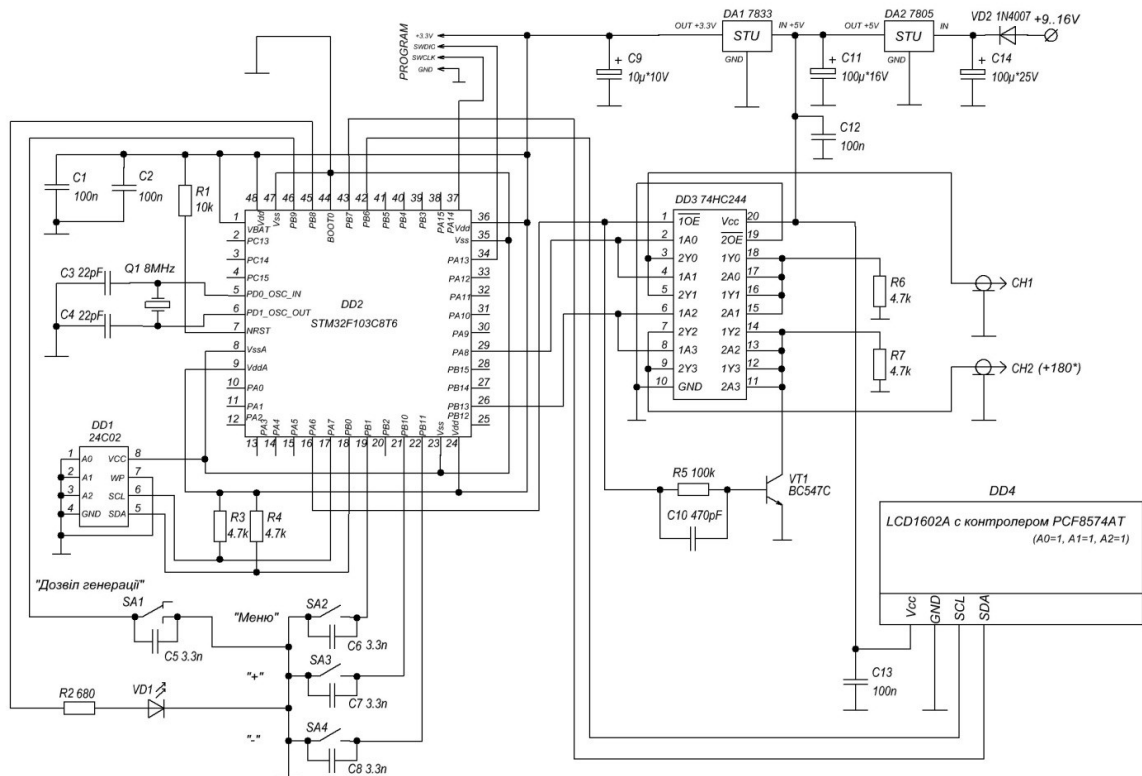


Рисунок 3 - Схема електрична принципова блоку формувача ГВІ

Пристрій для формування сигналів з регульованими параметрами виконаний на мікроконтролері DD2 типу STM32. Він формує послідовність прямокутних імпульсів амплітудою 3,3 В зі скважністю, рівною 2 (меандр), які необхідні для живлення наступних

каскадів ГВІ. Управління частотою і періодом проходження імпульсів здійснюється за допомогою кнопок SA1 SA4. Тимчасові діаграми вихідних сигналів блоку формувача показані на рис. 4 .

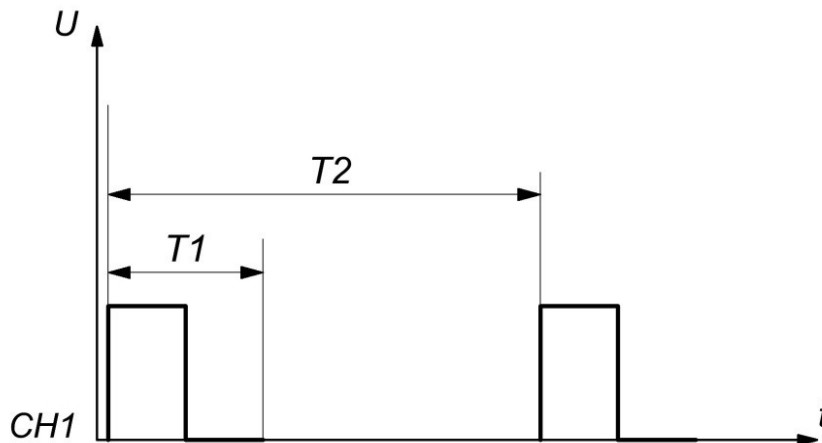


Рисунок 4 - Тимчасова діаграма вихідних сигналів блоку формувача:
 T1 – період збуджуючого імпульсу; T2 - період слідування імпульсів

Згенерований з виходу мікроконтролера DD2 імпульс надходить на вхід буферного повторювача DD3. Буферний повторювач використовується для посилення вихідного сигналу по напрузі до рівня 5В (рівень логічної «1» на виході з генератора) а також для забезпечення крутих фронтів, сформованих прямокутних послідовностей імпульсів.

Кнопка з фіксацією SA1 служить для дозволу генерації послідовності імпульсів. Її необхідність полягає в тому, щоб можна було вимкнути генерацію, зробити коригування параметрів генератора, а потім знову включити

генерацію із заданими параметрами. Кнопки SA2 SA4 необхідні для переходу по меню налаштувань і їх коригування. Збереження налаштувань генератора здійснюється в DD1.

Для захисту мікроконтролера DD2 від радіоперешкод, що наводяться по лініях виходу буфера DD3, застосовано пристрій гальванічної розв'язки, принципова схема якого зображена на рис. 5.

Відображення поточних параметрів здійснюється на рідкокристалічному індикаторі DD4.

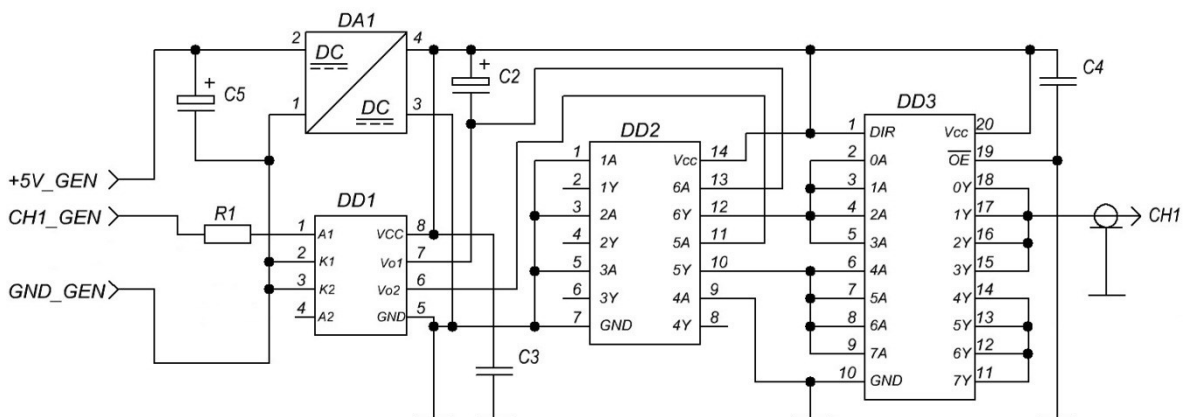


Рисунок 5 - Принципова схема модуля гальванічної опторозв'язки ГВІ

Модуль гальванічної опторозв'язки складається з DC / DC перетворювача DA1, оптопари DD1, інвертора логічних рівнів DD2 і буфера DD3. Вихід буферного повторювача

DD3 підключений до схеми високовольтного комутатора, який зображений на рис. 6. Високовольтний комутатор складається з буферного повторювача DD1 для регенерації

форми прийнятого сигналу, драйвера затвора MOSFET транзистора і високовольтного польового ключа (транзистора). Витік польового ключа підключається до первинної обмотки симетричного широкосмугового

високовольтного трансформатора. Другий контакт первинної обмотки трансформатора підключений до позитивної полярності джерела живлення напругою 300 Вольт.

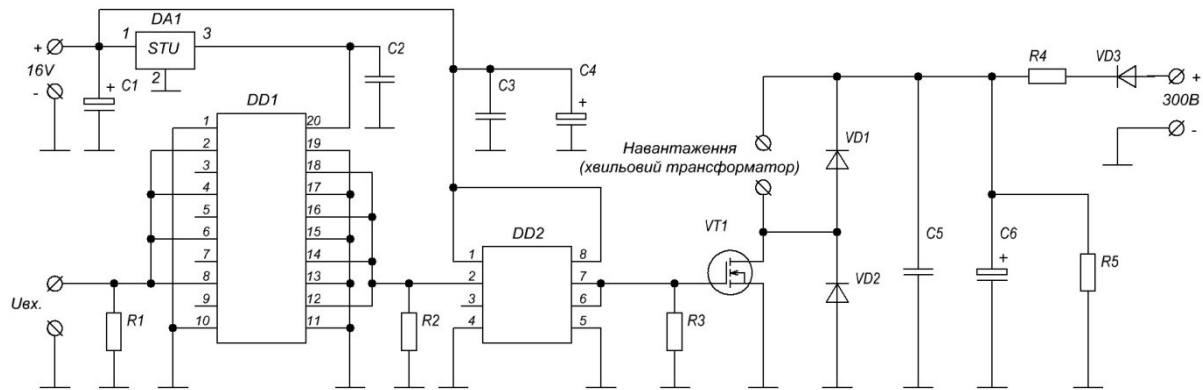


Рисунок 6 - Принципова схема високовольтного комутатора ГВІ

Симетричний широкосмуговий трансформатор зображений на рис. 7. Він складається з десяти феритових кілець, розмірами K20x12x6 і має по сім витків коаксіального кабелю RG59 з хвильовим опором 75 Ом. Кожен з трансформаторів є згоджувачем, тобто має хвильовий опір по 75 Ом по входу і виходу. Входи всіх десяти трансформаторів включені паралельно, а виходи послідовно. Це означає, що вхідний хвильовий опір отриманого симетричного широкосмугового трансформатора становить 7,5 Ом, тобто в 10 разів менше хвильового опору коаксіального кабелю. Для того, щоб робота трансформатора була узгодженою, вихід трансформаторної збірки необхідно навантажити на опір рівний 10 кратному опору коаксіального кабелю, тобто 750 Ом. Блоки живлення на схемах не вказані.

Для виконання експериментальних досліджень щодо збудження ультразвукових імпульсів ЄП розроблений стенд, блок-схема якого наведена на рис. 8. До складу стенду входить електропровідні плоско паралельні пластини 9 товщиною 20 мм (об'єкт контролю) без зачистки його поверхні введення ультразвукових імпульсів. На пластину 9 через діелектрик 8 товщиною 0,06 мм помістили круглий електрод 7 зі сталі товщиною 0,25 мм і діаметром 26 мм. До електроду 7, через розділовий конденсатор 5 (ємність якого на порядок більше ємності перетворювача)

прикладається змінна напруга з амплітудою 3 кВ. Для виключення тимчасового впливу поляризаційного ефекту в діелектрику під електродом ЄП на результати вимірювань амплітуди, у складі стенду використане джерело поляризуючої електричної напруги 6 (3 кВ). Пакетні імпульси тривалістю 1 період і частотою 5 МГц формуються генератором 1, який через гальванічну розв'язку 2 генерує імпульси на високовольтний комутатор 3, функція якого в комутації первинної обмотки підвищувального широкополосного симетруючого трансформатора 4 на «землю» для створення на вторинній обмотці імпульсів високої напруги.

Щоб не допустити влучення поляризуючої напруги на трансформатор застосований плівковий неполярний конденсатор 5. З протилежного боку пластини 9 встановлений мініатюрний п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) 10 (з резонансною частотою 5 МГц, радіусом 2 мм), підключений до малошумливого смугового підсилювача 11 з коефіцієнтом посилення рівним 1000. З виходу підсилювача 11 прийнятий сигнал подається на осцилограф 12.

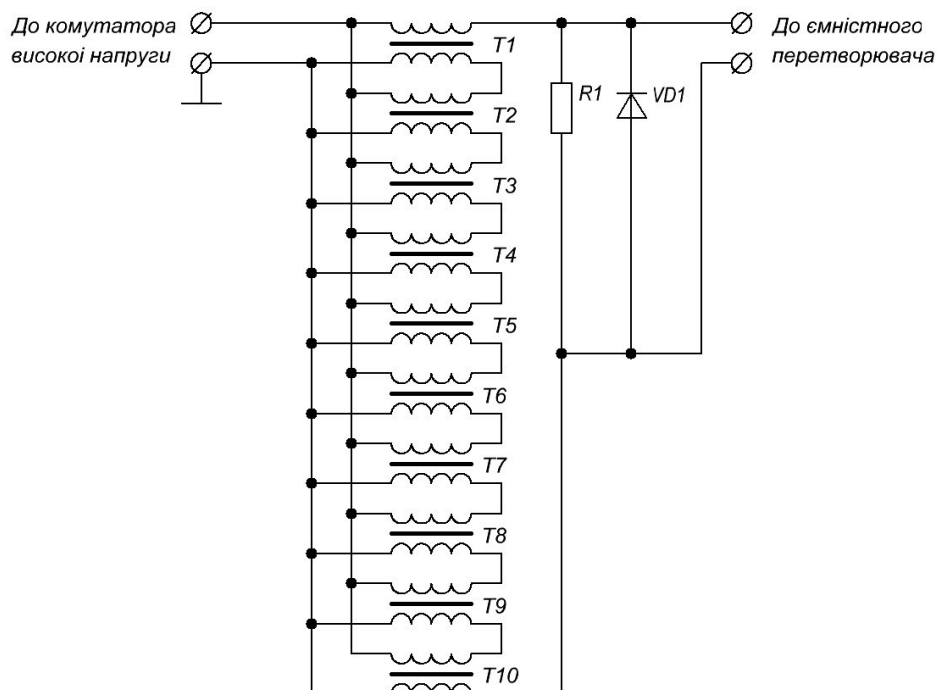


Рисунок 7 - Симетричний підвищувач широкосмуговий трансформатор

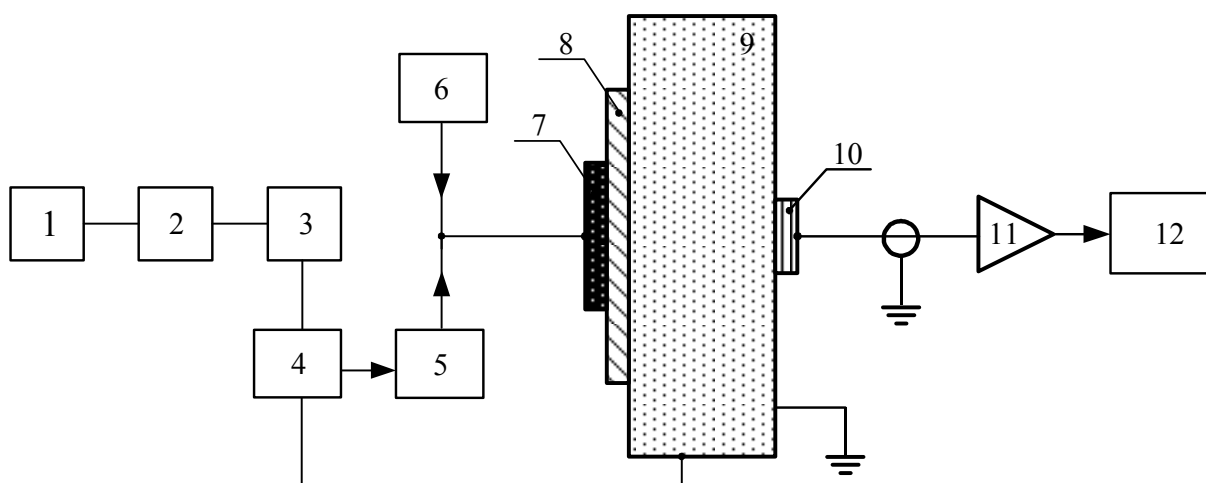


Рисунок 8 - Блок-схема експериментальної установки:

1 - генератор високочастотних імпульсів; 2 - гальванічна розв'язка; 3 - високовольтний комутатор; 4 - підвищувач широкосмуговий симетруючий трансформатор; 5 - розділовий конденсатор; 6 - джерело поляризуючої електричної напруги; 7 - електрод ЄП; 8 - діелектричний шар; 9 - об'єкт контролю; 10 - мініатюрний ПЕП; 11 - малoshумливий смуговий підсилювач; 12 - осцилограф

На рис.9 показана реалізація на екрані осцилографа ультразвукових імпульсів, що випромінюються ЄП і прийнятих мініатюрним ПЕП.

Аналіз даних наведених на рисунку 8 показує, що відношення амплітуд донних

імпульсів і завад без застосування методів обробки прийнятих донних імпульсів становить близько 13. Таким чином, підтверджується можливість проведення вимірювань.

Розробленим ГВІ за рахунок збільшення величини поляризуючої напруги і пікової

composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: Resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites. *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 1985. SU 32. P. 481-498.

11. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. High-frequency acoustic wave measurements in air'. *Proc. IEEE 1983 Ultrason. Symp.*, Vol.1, P. 581-584.

12. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. Acoustic resonator transducer for operation in air. *Elec. Lett.* 1985. No 21. P. 694-696.

13. Krauß O., Gerlach R., Fricke J. Experimental and theoretical investigations of SiO₂-aerogel matched piezo-transducers. *Ultrason.* 1994. No 32, P. 217-222.

14. Teshigawara M., Shibata F., Teramoto H. High resolution (0.2mm) and fast response (2ms) range finder for industrial use in air. *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, P. 639-642.

15. Tone M., Yano T. and Fukumoto A. High-frequency ultrasonic transducer operating in air. *Japan. J. Appl. Phys.* 1984, No 23, P. 436-L438.

16. Fortunko C.M., Schramm R.E., Teller C.M., Light G.M., McColskey J.D., Dubé W.P. Renken M.C. Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging. *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval.* 1995. Vol. 14A and 14B, Ch. 312, P. 951-958.

17. Platte M. PVDF ultrasonic transducers for ultrasonic testing. *Ferroelectrics.* 1991, No 115. P. 229-246.

18. Ohigashi H., Koga K., Susuki M. Nakamishi T. Piezoelectric and ferroelectric properties of P(VDF-TrFE) copolymers and their application to ultrasonic transducers. *Ferroelectrics* 1984, No 60. P. 263-276.

19. Newnham R.E., Skinner D.P. Cross L.E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Mat. Res. Bull.* 1978. No 13. P. 525-536.

20. Sahdom A.S. Application of Micro Electro-Mechanical Sensors (MEMS) Devices with Wifi Connectivity and Cloud Data Solution for Industrial Noise and Vibration Measurements.. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1262, 1st Colloquium on Noise, Vibration and Comfort 7 March 2019, Selangor, Malaysia DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1262/1/012025>

21. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of

ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics.* 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>

22. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Теория и практика електромагнітно-акустического контролю. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография. Харків: ТОВ «Планета-принт», 2016. 230 с.

23. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия. *Технічна електродинаміка.* 2016. №2. С. 78–82.

24. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics.* No 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>

25. Мигачев С.А., Куркин М.И., Смородинский Я.Г. Бесконтактное возбуждение звука в металле видеоимпульсом электрического поля. *Дефектоскопия.* 2016. № 11. С. 48—53.

References

1. Ermolov I. N., Lange Yu. V. Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik: V 7 t. Pod obsch. red. V. V. Klyueva. T. 3: Ultrazvukovoy kontrol M.: Mashinostroenie, 2004. 864 p. [in Russian]

2. Kanevskiy I.N. Salnikova E.N. Nerazrushayuschie metodyi kontrolya: ucheb. Posobie. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2007. 243 p. [in Russian]

3. Suchkov H.M., Nozdrachova K.L., Mishchanchuk E.V., Yeroshchenkov V.M. Prylady i metody akustychnoho kontroliu: navch. posibn. Kharkiv : NTU «KhPI», 2011. 220 p. [in Ukrainian]

4. W. Kuhl, G.R. Schodder and F.-K. Schröder, 'Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonics, *Acustica* 1954, No 4. P. 519-532.

5. W. Manthey, N. Kroemer and V. Mágori, Ultrasonic transducers and transducer arrays for

applications in air, *Meas. Sci. Techn.* 1992, No 3. P. 249-261

6. Chimenti D.E., Fortunko C.M. Characterization of composite prepreg with gas-coupled ultrasonics. *Ultrasonics* 1994. No 32. P. 261-264.

7. Rogovsky A.J. Development and application of ultrasonic dry-contact and air-contact C-scan systems for non-destructive evaluation of aerospace composites. *Mat. Eval.* 1991. No 49, P. 1491-1497.

8. Babic M. 200-kHz ultrasonic transducer coupled to the air with a radiating membrane, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* 1991 UFFC-38. P. 252-255.

9. Lynnworth L.C. Ultrasonic impedance matching from solids to gases. *IEEE Trans. Sonics, Ultrason.* 1965 SU-12. P. 37-48.

10. Gururaja T.R., Schultze W.A., Cross L.E., Newnham R.E., Auld B.A. Wang Y.J. Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: Resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites. *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 1985. SU 32. P. 481-498.

11. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. High-frequency acoustic wave measurements in air'. *Proc. IEEE 1983 Ultrason. Symp.*, Vol.1, P. 581-584.

12. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. Acoustic resonator transducer for operation in air. *Elec. Lett.* 1985. No 21. P. 694-696.

13. Krauß O., Gerlach R., Fricke J. Experimental and theoretical investigations of SiO₂-aerogel matched piezo-transducers. *Ultrason.* 1994. No 32, P. 217-222.

14. Teshigawara M., Shibata F., Teramoto H. High resolution (0.2mm) and fast response (2ms) range finder for industrial use in air. *Proc. 1989 IEEE Ultrason. Symp.*, P. 639-642.

15. Tone M., Yano T. and Fukumoto A. High-frequency ultrasonic transducer operating in air. *Japan. J. Appl. Phys.* 1984, No 23, P. 436-L438.

16. Fortunko C.M., Schramm R.E., Teller C.M., Light G.M., McColskey J.D., Dubé W.P. Renken M.C. Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging. *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval.* 1995. Vol. 14A and 14B, Ch. 312, P. 951-958.

17. Platte M. PVDF ultrasonic transducers for ultrasonic testing. *Ferroelectrics*. 1991, No 115. P. 229-246.

18. Ohigashi H., Koga K., Susuki M. Nakamishi T. Piezoelectric and ferroelectric properties of P(VDF-TrFE) copolymers and their application to ultrasonic transducers. *Ferroelectrics* 1984, No 60. P. 263-276.

19. Newnham R.E., Skinner D.P. Cross L.E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Mat. Res. Bull.* 1978. No 13. P. 525-536.

20. Sahdom A.S. Application of Micro Electro-Mechanical Sensors (MEMS) Devices with Wifi Connectivity and Cloud Data Solution for Industrial Noise and Vibration Measurements.. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1262, 1st Colloquium on Noise, Vibration and Comfort 7 March 2019, Selangor, Malaysia DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1262/1/012025>

21. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics*. 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>

22. Miguschenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Desyatnichenko A.V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeliy: monografiya. Harkiv: TOV «Planeta-print», 2016. 230 p. [in Russian]

23. Miguschenko R.P., Suchkov G.M., Radev H.K., Petrishchev O.N., Desyatnichenko A.V. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel dlya ultrazvukovoy tolschinometrii ferromagnitnyh metalloizdeliy bez udaleniya dielektricheskogo pokryitiya. *TehnIchna elektrodinamika*. 2016. No2. P. 78-82. [in Russian].

24. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics*. No 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>.

25. Migachev S.A., Kurkin M.I., Smorodinskiy Ya.G. Beskontaktnoe vzbudzhenie zvuka v metalle videoimpulsom elektricheskogo polya. *Defektoskopiya*. 2016. No. 11. P. 48-53. [in Russian].