

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.16: 620.179.17

ГЕНЕРАТОРЫ ЗОНДИРУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОРТАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Р. П. Мигущенко¹⁾, Г. М. Сучков^{1)}, Ю. К. Тараненко²⁾, О. Н. Петрищев³⁾,
А. В. Десятниченко¹⁾*

- 1) – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, e-mail: suchkov_gm@mail.ru
- 2) – Днепропетровский университет им. Альфреда Нобеля, ул. Набережная Ленина, 18, г. Днепропетровск, 49000, e-mail: taranen@rambler.ru
- 3) – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056

Визначено основні положення з побудови потужних генераторів зондуючих імпульсів струму для живлення електромагнітно-акустичних перетворювачів (ЕМАП) різного призначення. Наведено конкретний приклад електричної схеми одного з варіантів виконання такого генератора. Показана висока ефективність застосування в кінцевих каскадах генератора потужних польових чи IGBT транзисторів. Встановлено, що запропоновані варіанти генераторів мають широку частотну смугу, дозволяють генерувати імпульси з піковою потужністю в десятки кВт і забезпечувати отримання амплітуд імпульсів відбитих з виробу, достатніх для роботи дефектоскопів, товщиномірів та інших пристроїв з ЕМАП.

Ключові слова: ультразвукові імпульси, генератор зондуючих імпульсів струму, потужність, електромагнітний перетворювач.

Определены основные положения по построению мощных генераторов зондирующих импульсов тока для питания электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) различного назначения. Приведен конкретный пример электрической схемы одного из вариантов исполнения такого генератора. Показана высокая эффективность применения в оконечных каскадах генератора мощных полевых или IGBT транзисторов. Установлено, что предложенные варианты генераторов имеют широкую частотную полосу, позволяют генерировать импульсы с пиковой мощностью в десятки кВт и обеспечивать получение амплитуд импульсов отражённых из изделия, достаточных для работы дефектоскопов, толщиномеров и других устройств с ЭМАП.

Ключевые слова: ультразвуковые импульсы, генератор зондирующих импульсов тока, мощность, электромагнитно-акустический преобразователь.

Fundamental principles for building high-power generators of current sounding impulses for supplying electromagnetic acoustic transducers of different purposes have been defined. Specific example of electrical diagram of one of design variants of such generator is provided. High efficiency of application in generator output stage of high-power field or IGBT transistors has been demonstrated. It is established that proposed variants of generators have wide frequency band and allow generating impulses with on-peak power of tens of kW as well as obtaining pulse amplitudes reflected from the item under test which are enough for operation of inspection equipment, thickness gauges and other devices with electromagnetic acoustic transducers.

Key words: ultrasonic pulses, generator of current sounding impulses, power, electromagnetic acoustic transducer.

Введение. Требования, предъявляемые к дефектоскопов, толщиномеров, приборов для генераторам для питания электромагнитно- акустических (ЭМА) преобразователей определения физико-механических характеристик материалов и др. устройств, связаны с

особенностями возбуждения и приема ультразвуковых импульсов путем применения магнитных и электромагнитных полей [1]. Многие специалисты считают, что чувствительность контроля с применением ЭМА способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов низкая (примерно в 30 тыс. раз ниже, чем традиционного контактного метода контроля [2]). Известно, что основными факторами, определяющими чувствительность ЭМА способа контроля при прочих равных условиях, являются [3-4]: величина индукции поляризующего магнитного поля; величина напряженности высокочастотного электромагнитного поля, определяемая подводимой мощностью к катушке индуктивности ЭМА преобразователя (ЭМАП); метод обработки принятой информации.

Тогда одним из направлений повышения чувствительности может быть увеличение величины индукции поляризующего магнитного поля. Но в этом случае возникают сложности при контроле объектов из ферромагнитных материалов. Увеличение индукции поляризующего магнитного поля приводит к значительному увеличению силы притяжения ЭМАП и, соответственно, к невозможности «ручного» сканирования изделия. Кроме того, к ЭМАП (с постоянными магнитами) прилипает окалина и другие частички металла, что приводит к снижению помехоустойчивости ЭМА прибора и к повреждению преобразователя.

Другим направлением повышения чувствительности ЭМА контроля является увеличение мощности генератора, питающего ЭМАП. В работе [5] показано, что пиковая мощность, подводимая к преобразователю, может достигать несколько сотен киловатт и более. Наиболее просто получить мощный импульс возможно, сформировав его в виде однополярного тока, воспользовавшись способом ударного возбуждения. Использование ударного возбуждения характеризуется широким спектром, поэтому требует применения широкополосных трактов передачи и приема сигнала. Кроме того, ударное возбуждение обязательно связано с наличием значительной постоянной составляющей в сигнале генератора, что влечет за собой применение в приемном тракте усилителей постоянного тока (УПТ). Как известно, электрические тракты УПТ гораздо больше подвержены помехам, чем узкополосные тракты, что особенно существенно в производственных условиях. Кроме этого,

применение ударного возбуждения ограничивается относительно узкой полосой ЭМА датчиков, а также порождением широкого спектра ультразвуковых помех и т.п.

Устранить отмеченное противоречие возможно за счет формирования генератором высокочастотного пакетного импульса с заданным количеством периодов частоты заполнения [3]. Такой подход дает существенный выигрыш в концентрации спектральной мощности вблизи центральной частоты ЭМАП. Кроме того, отсутствие в спектре постоянной составляющей и ограниченность спектра дает возможность использования более узкополосного тракта приема и, как следствие, повышение помехоустойчивости контроля. Надо отметить, что использование различных по спектральному составу сигналов зависит от характера задачи (пространственного разрешения, величины «мертвой» зоны и т.п.), и требует применения методов приема и обработки сигнала.

Применение различных методов обработки принятой информации является отдельной сложной задачей. Но следует отметить, что эффективное применение методов обработки возможно только в случае использования для контроля достаточно длительных по времени сигналов [3]. В то же время, длительность зондирующих сигналов ограничена толщиной контролируемых объектов. В работе [3] для портативных ЭМА приборов рекомендуется выбирать длительность зондирующих импульсов из интервала 1...10 периодов частоты заполнения.

Из результатов анализа известных работ [6] можно сформулировать следующие требования к характеристикам генератора зондирующих импульсов (ГЗИ):

- низкое выходное сопротивление;
- максимально возможный пиковый ток, развиваемый в катушке индуктивности ЭМАП (как правило, десятки и сотни ампер);
- максимально возможное пиковое напряжение, подводимое к катушке индуктивности ЭМАП (как правило, сотни и тысячи вольт, в зависимости от количества витков катушки индуктивности ЭМАП);
- широкая полоса частот (в пределах применяемых частот комплекта ЭМАП для данного контрольного прибора);
- формирование пакетного импульса с заданным диапазоном регулируемой частоты заполнения;
- формирование пакетного импульса с заданным диапазоном регулируемой длительности, устанавливаемой в диапазоне

- 1...10 импульсов частоты заполнения;
 - формирование пакетного импульса с заданным диапазоном регулируемой частоты следования зондирующих сигналов;
 - генератор должен иметь устройства защиты при работе в режиме короткого замыкания и в режиме холостого хода.

Основная часть. Ранее при создании мощных ГЗИ с низким выходным сопротивлением использовали высоковольтные высокочастотные лампы типа ГМИ-83 [7]. Для их работы требовалось высокое напряжение – более 10 кВ. Для портативных ЭМА приборов такой подход из-за значительных массогабаритных параметров и значительного потребления электроэнергии является неприемлемым.

В настоящее время выпускаются мощные биполярные сверхвысокочастотные (СВЧ) транзисторы с достаточно значительной величиной напряжения питания. Однако, по мощностным параметрам они не могут конкурировать с лампами. Для компенсации этого недостатка предложено в выходном каскаде включить несколько двухтактных блоков из СВЧ транзисторов параллельно, общей нагрузкой которых является один

высокочастотный широкополосный повышающий выходной трансформатор. Принцип построения такого каскада поясняется рис. 1.

Для повышения мощностных возможностей и улучшения тепловых режимов выходного каскада все СВЧ транзисторы работают в ключевом режиме. При этом для уменьшения величины «мертвой» зоны, обусловленной переходными и релаксационными процессами, СВЧ транзисторы дополнительно управляются транзисторами, включенными в цепи их эмиттеров. Эти же цепи являются выравнивающими для токов, проходящих через соответствующие двухтактные блоки.

Экспериментальные исследования работы схемы по рис. 1 показали, что количество двухтактных блоков целесообразно выбирать больше 5. Для обеспечения ключевой работы СВЧ транзисторов в их базе необходимо создавать значительный ток, что усложняет предварительные каскады ГЗИ. Ограничения по напряжению питания СВЧ транзисторов, а также невозможность нарастить их количество ограничивают мощность такого типа ГЗИ. Важно также то, что СВЧ транзисторы имеют высокую стоимость.

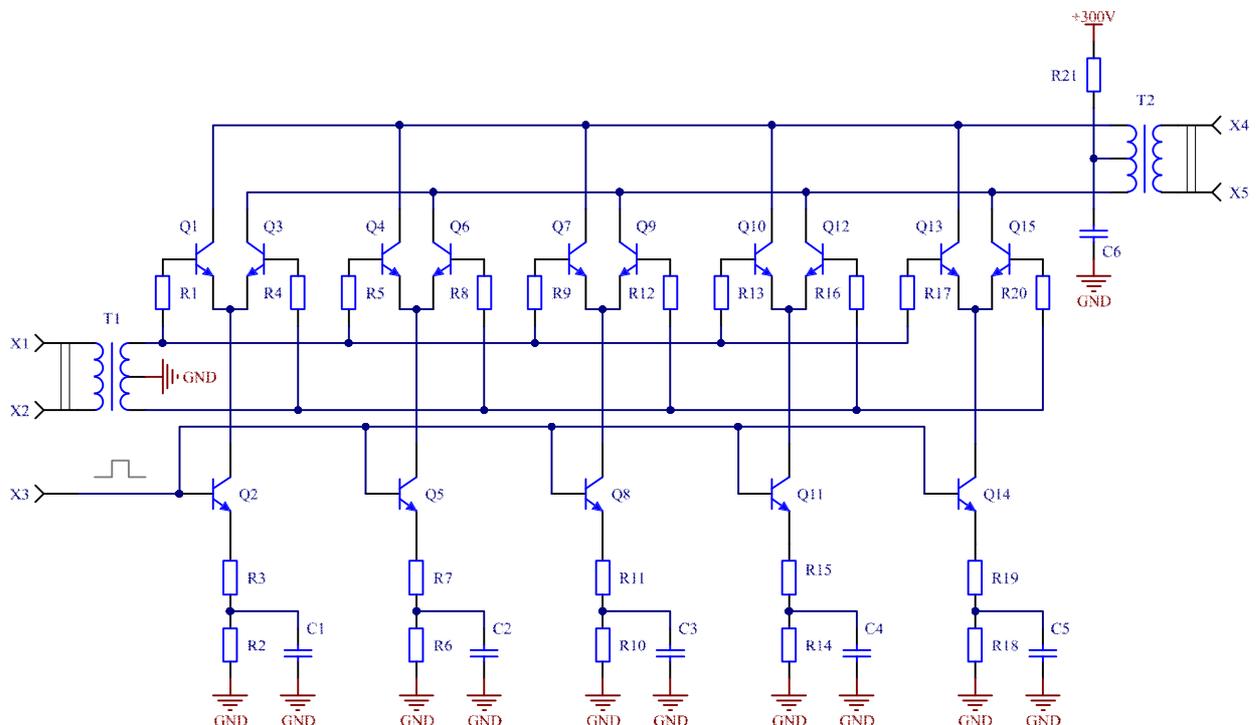


Рисунок 1 – Схема построения выходного каскада мощного транзисторного генератора зондирующих импульсов для питания ЭМАП

В радиотехнике широко применяют мощные полевые и биполярные с изолированным затвором транзисторы. При этом в технической документации указывается, что они могут эффективно работать на частотах до 0,1 МГц.

Нами проведены экспериментальные исследования работы таких транзисторов при их работе в ключевом режиме и при принудительном закрытии. На первом этапе создания генераторов для ЭМА контроля были проведены измерения параметров мощных транзисторов с изолированным затвором (IRF510, IRF530, IRF540 и др.) и биполярных транзисторов с изолированным затвором (типа IGBT). Для измерений был разработан импульсный многокаскадный усилитель, в качестве последнего каскада которого использовалась пара испытуемых транзисторов, включенных по двухтактной трансформаторной схеме (см. рис. 1).

Задающий импульсный генератор формирует требуемую последовательность импульсов (1...10 периодов с несущей частотой, регулируемой в пределах 0,1...5 МГц) с периодом повторения 0,1...2 кГц.

В качестве устройств раскачки использованы трансформаторные двухтактные каскады на широкополосных логических элементах (МС74АС245). При необходимости использовался дополнительный широкополосный каскад на ключевых полевых транзисторах средней или большой мощности. Целью исследований была проверка частотных свойств оконечных каскадов, а также их нагрузочная способность.

По результатам целого ряда экспериментов на первом этапе работ для получения максимальной мощности при несущей частоте 1...8 МГц был признан оптимальным выходной каскад на транзисторах типа IRF530. Для повышения выходной мощности было использовано параллельное включение выходных транзисторов. При этом длительность передних и задних фронтов импульсов не превышало 7 нс.

Быстрое развитие технологии и расширение номенклатуры мощных транзисторов позволило в дальнейшем увеличить пиковую мощность ГЗИ до 10 кВт и более. При этом первоначальная схема претерпела усовершенствования, а номенклатура транзисторов, применимых в качестве выходных, была расширена.

В мощных двухтактных трансформаторных усилителях для обеспечения требуемых временных характеристик (минимальной «мертвой» зоны) чрезвычайно важную роль

играет качество трансформаторов. Было проведено изучение работы трансформаторов с объемным витком, одинарным низкоомным витком (коаксиальный кабель, медная трубка и т.п.), с параллельным включением витков. Несмотря на большой опыт работы с трансформаторными устройствами, в разработанных схемах потребовалось вносить усовершенствования, связанные, в первую очередь, с чрезвычайно низким проходным сопротивлением насыщенных транзисторов (порядка 10...100 мОм) и высокой импульсной мощностью. Для уменьшения времени релаксации системы после импульса возбуждения требуется минимизация, в первую очередь, индуктивности рассеяния, а также паразитной емкости обмотки трансформатора.

Наиболее подходящими для решения поставленной задачи оказались трансформаторы с параллельным включением обмоток. Такое решение обеспечивает минимизацию индуктивности рассеяния за счет сразу двух факторов: параллельное включение индуктивностей и малые потери в коэффициенте магнитной связи первичной и вторичной обмоток. Кроме того, уменьшение площади обмотки (по сравнению, например, с объемным витком) ведет к уменьшению и паразитной емкости. Также уменьшена суммарная длина наиболее низкоомной обмотки за счет минимизации размера трансформатора до предельно допустимого. При этом нижняя частота полосы пропускания частот (f_n) должна рассчитываться из условия $2\pi f_n L_\mu \approx 4\rho$ (L_μ – индуктивность намагничивания, ρ – волновое сопротивление в данном сечении).

Также установлено, что некоторое влияние на время релаксации оказывают и механические параметры наборных ферритовых сердечников. Показано, что склейка ферритовых колец уменьшает время релаксации. По-видимому, такой эффект объясняется демпфированием слабого магнитострикционного перераспределения энергии из электромагнитной в механическую и обратно.

Таким образом, проведенные исследования и оптимизация параметров компонентов усилителя позволили получить хорошие результаты при разработке генераторов для ЭМА приборов.

Для исследований характеристик был изготовлен ГЗИ для питания портативных ЭМАП, предназначенных для обнаружения внутренних дефектов. Он состоит из двух частей: формирователя исходных сигналов и усилителя мощности (рис. 2).

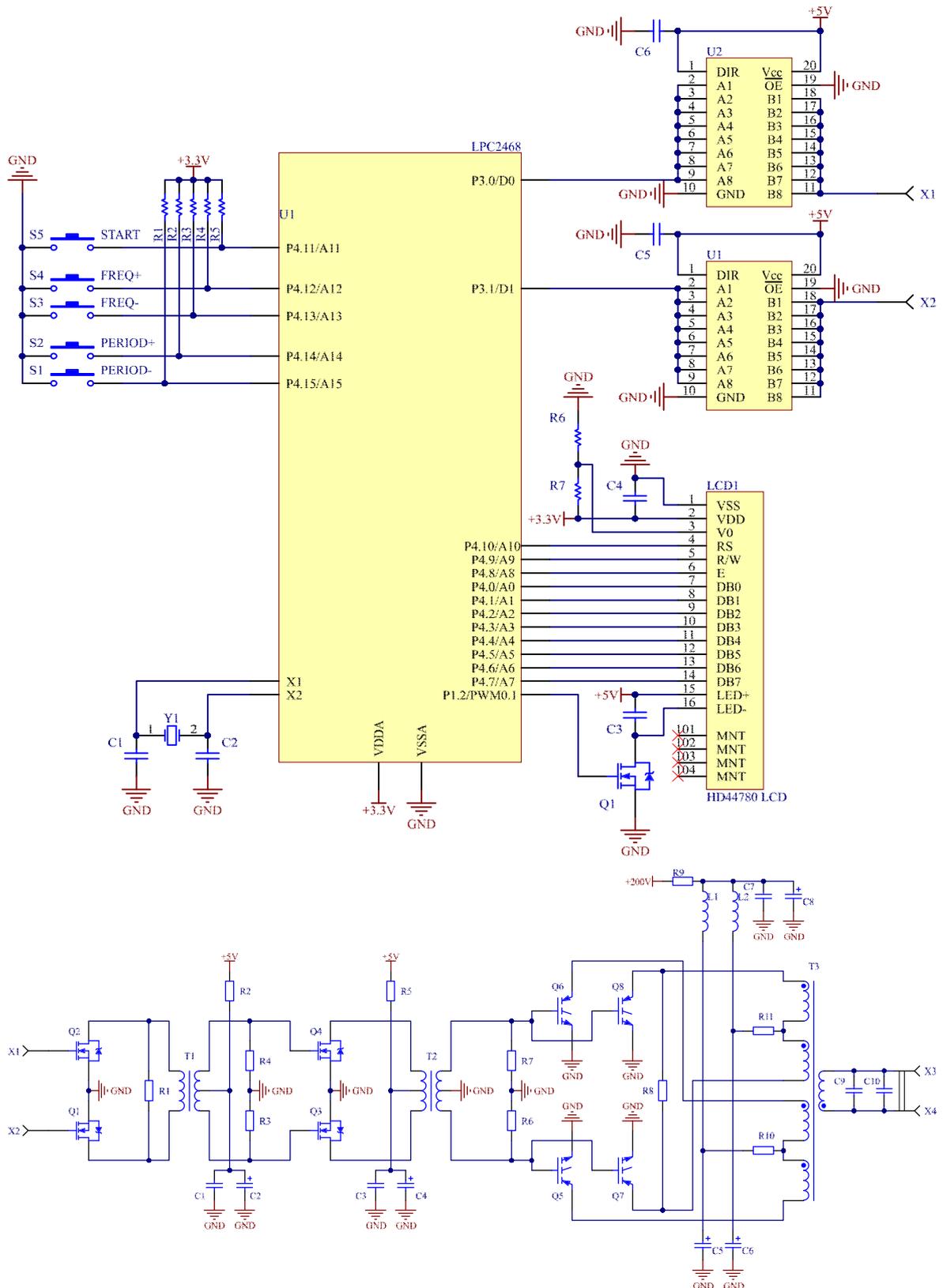


Рисунок 2 – Электрическая схема компактного ГЗИ для ЭМА дефектоскопа

Для формирования цифрового сигнала использован микроконтроллер LPC2468, который имеет возможность программной настройки собственной тактовой частоты в широких пределах с малой дискретностью, благодаря встроенной системе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Опорная частота для ФАПЧ определяется кварцевым резонатором Y1. Управление частотой генерации, скважностью и количеством периодов заполнения в пакете осуществляется посредством кнопок S1...S5. Для отображения информации о текущих настройках используется двухстрочный знаковосинтезирующий жидкокристаллический индикатор LCD1.

Выходным каскадом ГЗИ являются два параллельных двухтактных каскада на транзисторах типа IGBT. Межкаскадные трансформаторы выполнены в виде «биноклей» из сдвоенных ферритовых колец. Выходной повышающий трансформатор аналогичной конструкции обеспечивает согласование ГЗИ с ЭМАП.

Программа управления разработана таким образом, что процессор генератора может сам генерировать стартовые сигналы (режим «Мастер»), или работать по внешнему прерыванию (режим «Ведомый»). Программа включает в себя загрузку начальных установок, таймера, чтения внешних установок и запуск тестовой последовательности сигналов. Внешние установки задают режим работы, количество импульсов в последовательности, длительность импульса, выражаемое в тактах процессора, частоту следования сигналов. В соответствии с заданными режимами работы по прерыванию от таймера или внешнего источника сигнала генерируется тестовая последовательность с сопутствующими синхросигналами.

Для проверки частотных возможностей изготовленного ГЗИ к его выходу была подключена пассивная нагрузка 50 Ом. Его амплитудно-частотная характеристика приведена на рис. 3.

Очевидно, что в исследованном диапазоне к ГЗИ можно подключать ЭМАП, настроенные на различную рабочую частоту в исследованном диапазоне.

Следующим этапом были исследования ГЗИ при подключении к его выходу нагрузки в виде ЭМАП, возбуждающая шестивитковая катушка которого состояла из включенных параллельно 10 проводников толщиной 0,1 мм каждый. ЭМА преобразователь размещался над металлом с зазором 0,5 мм. Частота заполнения

зондирующего пакета составляла 2,2 МГц. Количество периодов заполнения – 7. Форма напряжения, формируемого ЭМАП, приведена на рис. 4 (развертка по горизонтали – 2 мкс/дел; по вертикали – 500 В/дел).

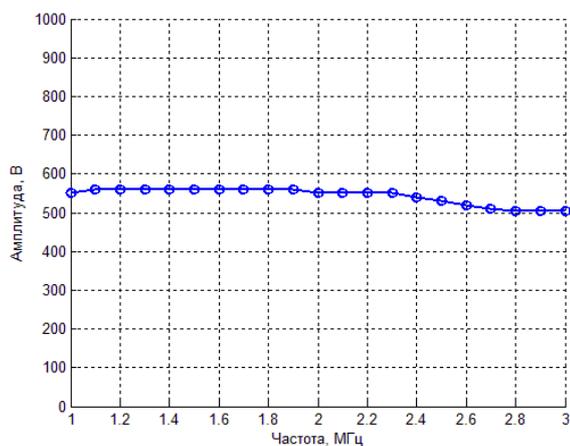


Рисунок 3 – Амплитудно – частотная характеристика ГЗИ

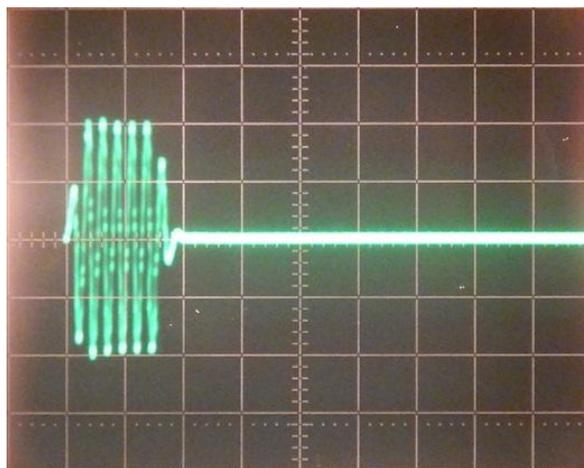


Рисунок 4 – Напряжение на ЭМАП, развиваемое ГЗИ

Возможности ГЗИ по его использованию в составе макета дефектоскопа были испытаны на том же ЭМАП, но при подключении проводников его катушки последовательно, форма напряжения представлена на рис. 5 (развертка по горизонтали – 50 мкс/дел; по вертикали – 1 В/дел). Из рисунка следует, что принятые ЭМАП донные сигналы из образца, без подготовки его поверхности, являются достаточными по величине для работы дефектоскопов, толщиномеров и других устройств с ЭМАП.

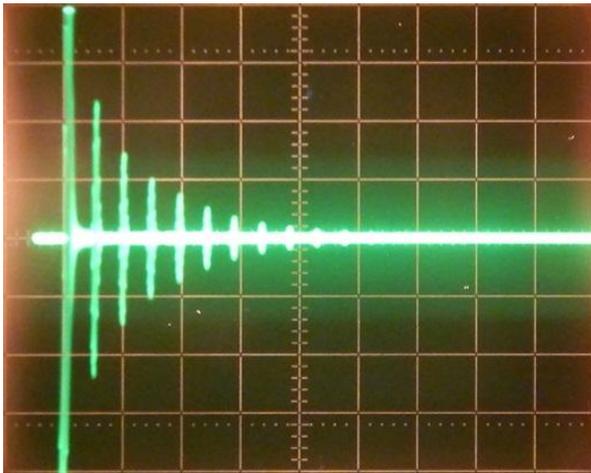


Рисунок 5 – Последовательность донных сигналов на выходе предварительного усилителя макета ЭМА дефектоскопа

ВЫВОДЫ

Экспериментальными исследованиями и разработками подтверждена возможность применения в выходных каскадах компактных ГЗИ полевых и биполярных с изолированным затвором транзисторов для генерирования в портативных ЭМАП импульсов тока с частотой до 8 МГц.

Разработаны основные требования к характеристикам ГЗИ.

Экспериментально установлена применимость портативных ГЗИ для возбуждения в катушках индуктивности ЭМАП импульсов с пиковой мощностью в десятки киловатт.

Показано, что мощностные и частотные характеристики портативных ГЗИ достаточны для обеспечения эффективной работы ЭМА дефектоскопов, толщиномеров и других приборов с ЭМАП.

1. *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. – 864 с.*
2. *Ермолов И. Н. Незарушающий контроль: практ. пособие: в 5 кн. кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов ; под ред. В.В. Сухорукова. – М. : Высшая школа, 1991. – 283 с.*
3. *Сучков Г.М. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 3. Методы и средства повышения чувствительности ультразвукового контроля ЭМА способом: монография / Г. М. Сучков, О. Н. Петрищев, Ю. В. Хомяк. – Харьков: Изд-во «Щедра садиба плюс», 2015. – 124 с.*
4. *Сучков Г. М. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 4. Экспериментальные исследования возможностей ультразвукового контроля ЭМА способом: монография / Г. М. Сучков, О. Н. Петрищев, С. Н. Глоба. – Харьков: Изд-во «Щедра садиба плюс», 2015. – 104 с.*
5. *Suchkov G.M. Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors. / G.M. Suchkov, O.N. Petrishchev, I.V. Cherednichenko, V.V. Fedorov, A.V. Desyatnichenko, S.V. Khashchina, M.S. Maslova // Russian Journal of Nondestructive Testing. – New York, 2012. – Vol. 48, No. 9. – Pp. 537 – 540.*
6. *Сучков Г.М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии /Г. М. Сучков // Дефектоскопия. 2005. – № 12. – С. 24-39.*
7. *Пачковский Л.С. Мощный широкополосный генератор радиоимпульсов для возбуждения ультразвуковых колебаний бесконтактным электромагнитно – акустическим способом / Л. С. Пачковский, О. В. Неволин // Дефектоскопия, 1977. – №6. – С. 117-120.*

Поступила в редакцію 03.12.2015р.

Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Середюк О.Є., докт. техн. наук, с. н. с. Джала Р. М.