

специальности «Полупроводники и диэлектрики». 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986.

3. Кусков Г. С., Ларионов Л. В. Измерение намагниченности насыщения СВЧ-материалов вибрационными магнитометрами // Обзор по электронной технике. Сер. Ферритовая техника. 1970. Вып. 4.

4. Вибрационный магнитометр / Е. Г. Бишард, Г. С. Кусков, А. М. Полонский, А. А. Преображенский; под ред. А. М. Фремке // Информационно-измерительная техника. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1973.

5. Бишард Е. Г. Устройство для определения зависимости намагниченности ферритовых образцов малых размеров от напряженности поля // Измерительная техника / ЛЭТИ. Л., 1973.

6. Вибрационные магнитометры LakeShoreCryotronicshttp. URL: //www.cryotrade.ru/lakeshore_vibro_magnet.html (дата обращения 03.05.2017).

7. Преображенский А. А., Шарыгин Н. В., Васильев Б. В. Расчет зависимости изменения напряженности магнитного поля при варьировании рабочего зазора системы в заданных пределах // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 19, № 2. Л.: Изд-во Ленингр. ин-та точной механики и оптики, 1976.

8. Бедов Ю. С., Лукин Е. В., Романцов М. П. Анализ методов уменьшения порога чувствительности широкополосных средств измерения первой производной по времени от магнитной индукции. М.: Приборостроение, 2013. № 8.

9. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1998.

E. G. Bishard, M. P. Cepich
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

DEVICE FOR MEASURING THE MAGNETIZATION OF MAGNETIC MATERIALS WITH SPECIALIZED PROPERTIES ON SAMPLES OF SMALL VOLUME IN THE FACTORY

Given the peculiarities of testing of magnetic materials on samples of small dimensions with low values of the magnetization by using vibration method in the factory. It is shown that modern foreign units are very expensive and require for its operation highly qualified support. Noted that the industrially significant role, issues of jamming protection. The block diagram of the magnetometer to determine the magnetization of saturation and the magnetization curve of the ferrite microwave. The proposed method improve the noise immunity of circuit design. Recommendations for use to magnetize a ferrite microwave special sources of magnetic fields made of permanent magnets. Describes the design of a rotary device that hosts two permanent magnet rotating relative to the fixed pole pieces in the gap which placed the sample under test, and creates a constant magnetic field of ± 0.6 T.

Vibrating magnetometer, a vibrating method, a microwave ferrites, permanent magnets

УДК 620.179.16

Б. Ч. И, Р. С. Коновалов, С. И. Коновалов,
А. Г. Кузьменко, И. Ю. Ошурков, В. М. Цаплев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Экспериментальное исследование возможности снижения длительности переходного процесса в системе излучения-приема

Рассмотрен импульсный режим работы системы излучения-приема, состоящей из двух идентичных пьезокерамических пластин. В качестве иммерсионной среды использован глицерин. Возбуждение излучателя осуществлялось электрическими сигналами сложной формы. Экспериментально установлено, что применение сложного сигнала позволяет существенно снизить длительность электрического импульса на выходе приемника по сравнению со случаем, когда излучатель возбуждался одним полупериодом синусоиды на частоте антирезонанса. Показано удовлетворительное соответствие экспериментальных данных результатам теоретических исследований.

Система излучения-приема, пьезопреобразователь, метод Даламбера, акустический импульс, электрический импульс, компенсирующий импульс

Исследованию импульсного режима работы пьезопреобразователей традиционно уделяется серьезное внимание в нашей стране и за рубежом.

Обеспечение возможности излучения и приема акустических сигналов, имеющих малую длительность (всего лишь несколько полупериодов

высокой частоты), позволяет улучшать важные технические характеристики средств измерения и контроля. Это особенно актуально при решении задач локационного характера, встречающихся при проведении неразрушающего акустического контроля, в медико-биологических исследованиях и гидроакустике. В этом случае переход к импульсному режиму работы пьезопреобразователей способствует снижению мертвой зоны и повышению разрешающей способности контрольно-измерительной аппаратуры, а также точности определения координат исследуемых объектов. Обширный перечень литературных источников, посвященных изучению работы пьезопреобразователей, работающих в режиме излучения-приема коротких сигналов, представлен в [1], [2].

В настоящее время теоретические подходы к исследованию формы импульсного сигнала на выходе пьезопреобразователя изучены достаточно полно. На основе анализа литературных данных [1], [2] можно отметить, что наибольшее распространение получили: группа методов, основанных на применении спектральных преобразований Фурье или Лапласа; методы, подразумевающие использование некоторых специализированных программ, предназначенных для расчета электронных схем; метод последовательных отражений (метод Даламбера). Стоит отметить, что метод Даламбера иногда оказывается весьма эффективным при расчете переходных процессов, возникающих в пьезопреобразователях, возбуждаемых короткими электрическими сигналами [3]–[10]. Основным его достоинством, по крайней мере, для преобразователей простых форм (пластинчатых и стержневых), является возможность наблюдения динамики развития переходного процесса во времени. Что касается спектральных методов, а также методов, в основе которых лежит применение специализированных математических пакетов, то заметим, что при всей их эффективности основным недостатком, присущим им, является формальность и невозможность наглядного получения физических представлений о процессе формирования сигнала на выходе преобразователя.

В некоторых предшествующих работах авторов, например [6]–[9], на основе применения метода Даламбера была теоретически исследована возможность получения короткого акустического сигнала на выходе пьезопластины, нагруженной на жидкость (воду). При этом подразумевалось, что электрическое возбуждение пластины осуществляется сигналом сложной формы. Такой сигнал можно представить себе, например, в виде электрического импульса, состоящего из двух полупериодов, первый из которых будем называть

возбуждающим, а второй – компенсирующим. Воздействие возбуждающего полупериода на пьезоэлемент влечет за собой длинный переходный процесс. Компенсирующий полупериод, поданный через некоторое время, вызывает в пластине новый переходный процесс. Если правильно определить амплитуду компенсирующего полупериода (с учетом знака), то можно добиться взаимной компенсации двух переходных процессов, т. е. становится возможным получение короткого акустического импульса на выходе преобразователя. В [6], [7], [9] представлен алгоритм определения амплитуды компенсирующего полупериода для требуемого момента времени.

В [10] представлены некоторые экспериментальные данные, полученные на основании теоретических положений, изложенных в предшествующих публикациях авторов. Целью данной статьи является более полное описание полученных результатов.

Результаты расчета. На рис. 1 представлены некоторые расчетные результаты, касающиеся возможности получения короткого акустического сигнала на выходе ПЭП при его возбуждении сигналами сложной формы. По оси абсцисс отложено безразмерное время, которое определяется как $T = t/(T_0/2)$, где t – физическое (истинное) время; T_0 – длительность периода колебаний на частоте антирезонанса пластины. По осям ординат отложены нормированные к амплитуде возбуждающего полупериода электрическое напряжение u/u_1 и колебательное смещение ξ/ξ_1 . Следует заметить, что данные, приведенные на рис. 1, относятся к случаю, при котором в качестве иммерсионной жидкости выбран глицерин, а не вода. Объяснение причин такого выбора будет дано далее. Расчетные программы, с помощью которых были получены результаты, сформулированные в [6], [7], [9], позволяют без труда учесть изменение свойств иммерсионной среды. На рис. 1, *a–e* представлены формы электрических сигналов, подаваемых на излучатель (верхние рисунки), и акустические сигналы, излучаемые в жидкость (нижние рисунки). На рис. 1, *a* представлен поступающий на излучатель электрический импульс, состоящий только из возбуждающего полупериода, компенсирующий – отсутствует. На рис. 1, *b–e* электрический импульс содержит как возбуждающий, так и компенсирующий полупериоды, причем амплитуда возбуждающего полупериода вследствие принятой нормировки всегда равна 1, а амплитуды компенсирующих полупериодов составляют: *b* – 0.926; *b* – (–0.852); *c* – 0.789; *d* – (–0.726); *e* – 0.672.

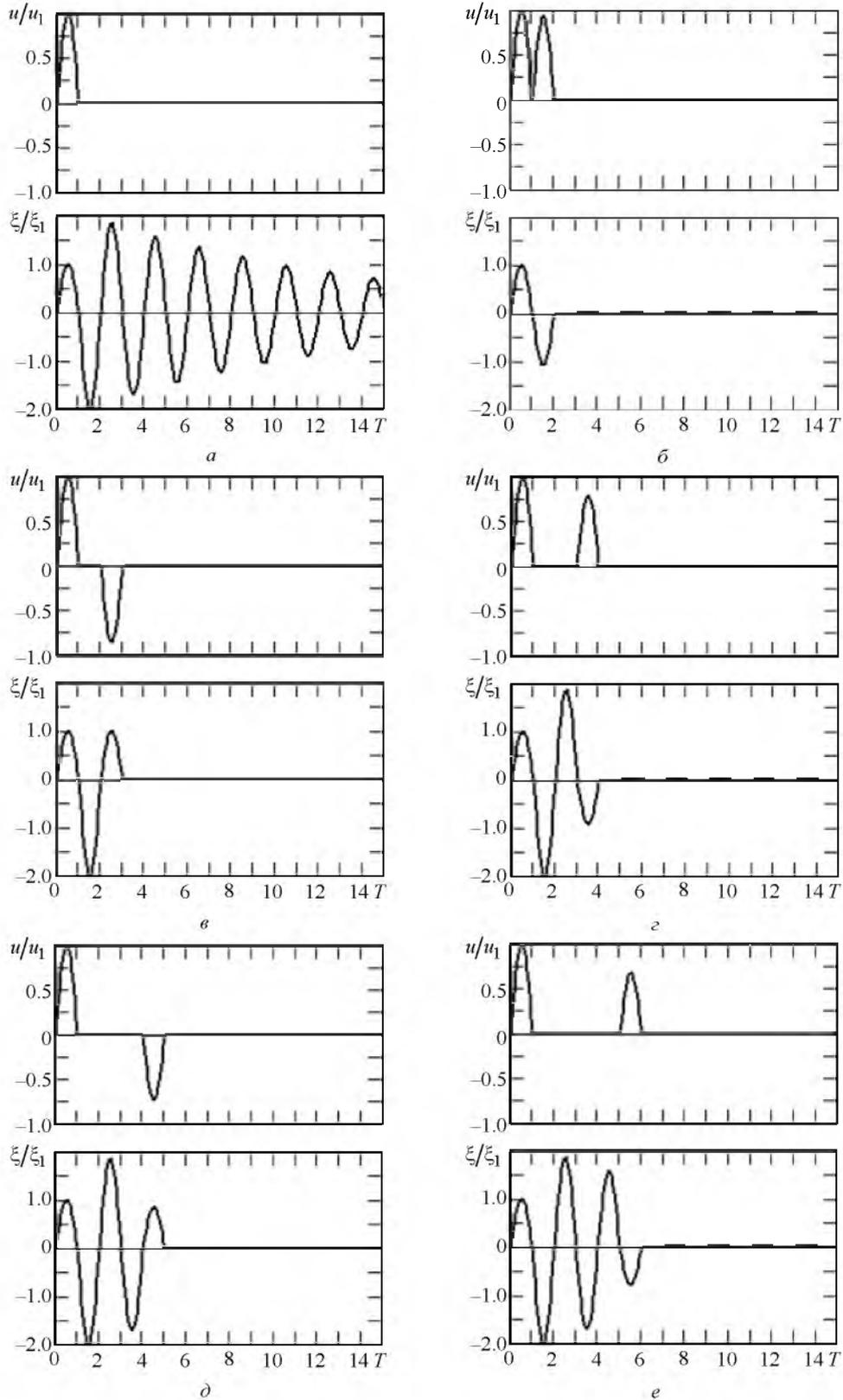


Рис. 1

Экспериментальные исследования. Для проведения исследований переходных процессов в рассматриваемой системе излучения-приема была разработана экспериментальная установка

(рис. 2). Установка представляет собой акустическую линию задержки, состоящую из излучающего и приемного пьезопреобразователей, на входе и выходе которых находятся генератор и

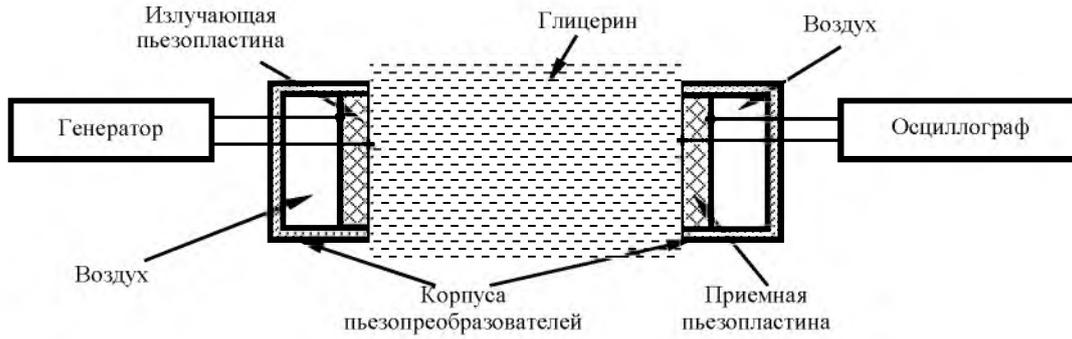


Рис. 2

осциллограф соответственно. В качестве излучателя и приемника использованы пьезопластины из ЦТС-19 (рабочая частота – 1 МГц, диаметр – 20 мм, толщина – 1.25 мм), излучающая и приемная стороны которых нагружены на глицерин д-98, а противоположные – на воздух, т. е. механическое демпфирование отсутствует. Глицерин выбран с целью уменьшения вероятности электрического «закорачивания» сторон каждой из пьезопластин через жидкость, поскольку он не обладает электропроводностью. Формирование излучаемых

сигналов в установке осуществлялось с помощью генератора сигналов специальной формы Tabor Electronics WW2572A, прием – осциллографом LECROY WaveAce 101. Достоинством генератора является возможность формирования электрического сигнала произвольной формы. Электрические сигналы осциллографа и генератора обрабатывались в цифровой форме на ЭВМ.

Система излучения-приема (рис. 2) предполагала возможность изменения базы между преобразователями. При проведении измерений она

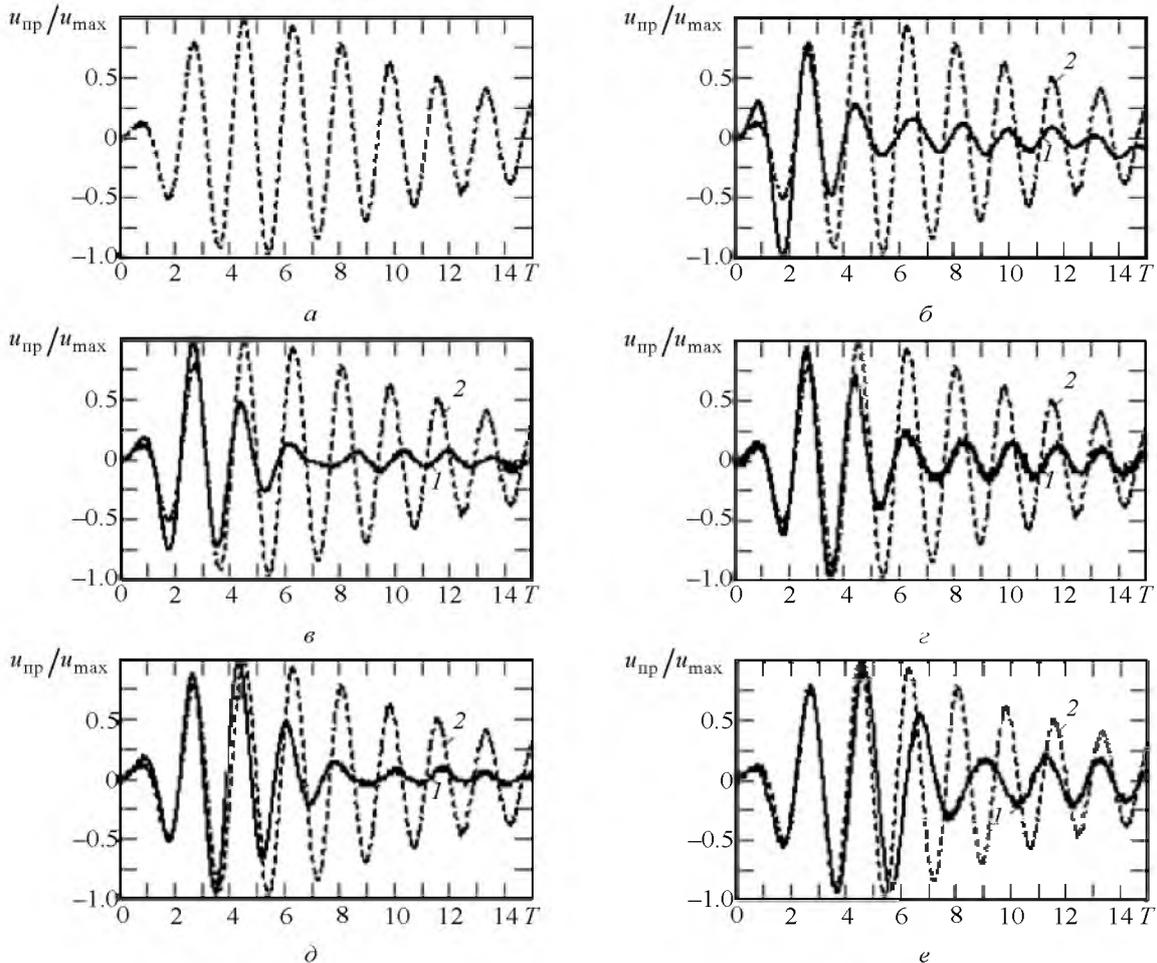


Рис. 3

составила 108 мм. Соосность акустических осей приемной и излучающей пьезопластин обеспечена с помощью подвижных систем закрепления пьезопреобразователей. В качестве критерия достижения соосности использовалось получение максимального сигнала на выходе приемника в непрерывном режиме.

Предварительная калибровка и настройка экспериментальной установки заключалась в достижении соосности излучателя и приемника по максимуму принимаемого акустического сигнала. База датчиков была выбрана из соображений нахождения приемного преобразователя в дальней зоне излучателя.

На вход излучающей пластины подавались сформированные генератором электрические сигналы шести различных форм (см. рис. 1). Осциллограф фиксировал электрические сигналы, принятые приемником в определенном временном диапазоне. Так, при подаче на излучающую пластину сигнала, аналогичного по форме изображенному на рис. 1, *a*, в приеме был получен импульс длительностью 13.5 мкс (по критерию – 20 дБ от максимума). На рис. 3, *a* приведена форма сигнала на выходе приемника. Длительность сигнала, поступающего на излучатель (рис. 1, *a*), определялась его рабочей частотой и составила 0.5 мкс. Максимум входного напряжения на входе во всех экспериментальных измерениях составил 5 В. При этом здесь и далее проведена нормировка всех импульсов к амплитуде максимума сигнала (u_{\max}), а по оси абсцисс отложено безразмерное время $T = t/(T_0/2)$, где $T_0 = 1$ мкс – длительность периода излучения. Тем самым отсчеты по координатным осям рисунков, отражающих теоретические и экспериментальные результаты, приведены в единой системе, что является удобным для последующего использования.

В процессе проведения экспериментов длительность принятых сигналов сравнивалась с длительностью сигнала, изображенного на рис. 3, *a*. На рис. 3, *b–e* представлены формы электрических сигналов (кривые 1) на выходе приемного преобразователя, нормированные к максимальному значению $u_{\text{пр}}/u_{\max}$, для случаев возбуждения излучателя сигналами, приведенными на рис. 1, *b–e* соответственно. Кривые 2 на рис. 3, *b–e* соответствуют кривой на рис. 3, *a*. Видно, что длительность принятого сигнала на рис. 3, *b–e* сильно изменяется, по сравнению с рис. 3, *a*. Так, например, для

случая, представленного на рис. 3, *b*, она сокращается с 27 до 11 полупериодов. Представленные зависимости получены для случая, при котором возбуждение излучателя соответствует расчетным вариантам, показанным на рис. 1. Далее было обнаружено, что изменением амплитуды компенсирующего полупериода можно добиться большего сокращения длительности принимаемого сигнала, чем в случаях, представленных на рис. 3. Так, например, для случая, изображенного на рис. 3, *b*, амплитуда компенсирующего полупериода составила 0.926 от возбуждающего ($u_{\text{комп}} = 0.926u_{\max}$), а длительность сигнала равна 11 полупериодам (по уровню –20 дБ от максимума). При значении же $u_{\text{комп}} = 0.806u_{\max}$ удалось добиться минимальной длительности сигнала, составившей 6.5 полупериода (рис. 4, кривая 1).

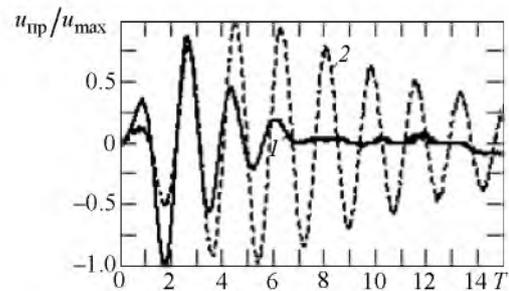


Рис. 4

Сравним формы сигналов на выходе приемника с расчетными. Для этого воспользуемся алгоритмами, предложенными авторами в [10] для случая нагрузки системы излучения-приема на воду. Аналогичным образом – проведением расчетов для случая использования глицерина в качестве иммерсионной среды – были определены формы принимаемых приемником электрических сигналов, нормированных к их максимумам. На рис. 5 приведены данные, позволяющие сравнить теоретические и экспериментальные результаты для двух видов сигналов, формируемых излучателем. Это сигналы, изображенные на рис. 1, *b* и *v*. Кривым 1 (штриховые линии) соответствуют результаты расчета, кривым 2 – экспериментальные данные. Можно отметить сходство форм экспериментальных сигналов и сигналов, определенных теоретическим путем.

Таким образом, в работе был экспериментально изучен импульсный режим работы системы излучения-приема, состоящей из двух идентичных пьезокерамических пластин. В качестве иммерсионной

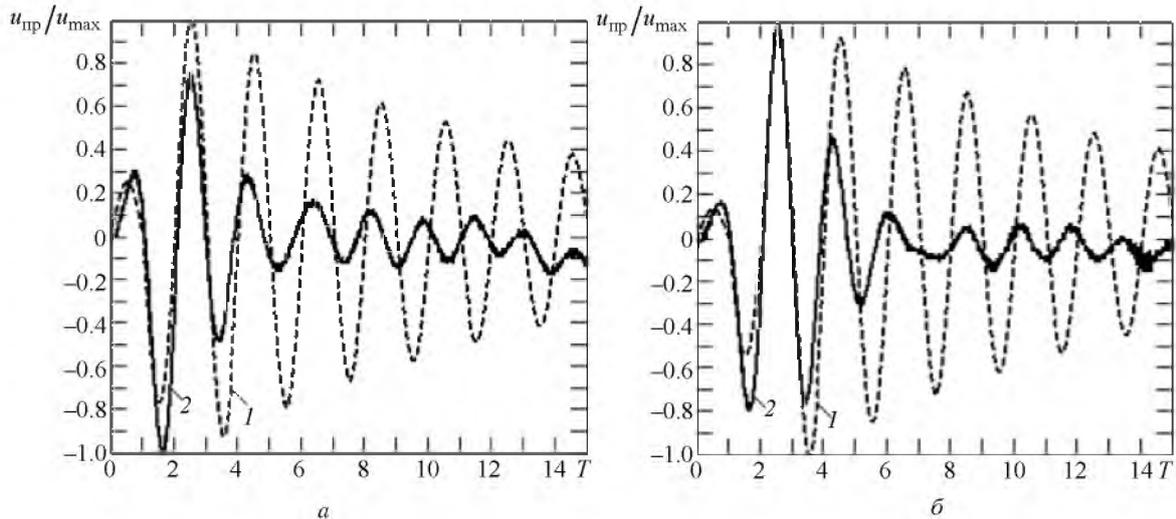


Рис. 5

жидкости выбран глицерин. Экспериментально подтверждено, что возбуждение излучателя сложным электрическим сигналом, форма которого определена расчетно-теоретическим путем, позволяет снизить сигнал на выходе приемника. Проведено сравнение длительностей выходных сигналов с приемника для случая возбуждения излучателя сигналом в виде одного полупериода синусоиды на собственной частоте излучающей пластины и пятью конкретными видами сигналов сложной фор-

мы. Отмечено сходство форм расчетных и экспериментальных сигналов на выходе системы.

Исследование выполнено в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» базовой части государственного задания Минобрнауки России. Код проекта: 8.6743.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
2. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Физические основы работы и проектирования импульсных пьезопреобразователей в задачах измерения и контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.
3. Дианов Д. Б. Прохождение нестационарных звуковых сигналов через слоистые среды // Изв. ЛЭТИ. Л., 1968. Вып. 63. С. 87–95.
4. Дианов Д. Б. О работе пьезопреобразователя в нестационарном режиме // Изв. ЛЭТИ. Л., 1968. Вып. 63. С. 114–126.
5. Газарян Ю. Л. О создании звукового импульса заданной формы при помощи пьезоэлектрической пластинки // Акуст. журн. 1958. Т. 4, № 1. С. 33–36.
6. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Об уменьшении длительности переходного процесса в электроакустическом пластинчатом пьезопреобразователе при использовании компенсирующего электрического импульса // Сб. тр. науч. конф. «XXVII сессия Российского Акустического общества и сессия Научного Совета РАН по акустике», СПб., 16–18 апр. 2014. С. 729–741.
7. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. О возможности сокращения длительности переходного процесса в акустическом преобразователе при помощи компенсирующего электрического импульса // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 12–19.
8. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Об оптимизации формы акустических импульсов малой длительности для решения задач зондирования при иммерсионном контроле // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 52–57.
9. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Получение коротких импульсов на выходе системы излучения-приема при возбуждении излучателя электрическими импульсами специальной формы // Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 16–25.
10. Снижение длительности акустического сигнала на приемнике за счет воздействия на излучатель сигналом сложной формы / Б. Ч. И, Р. С. Коновалов, С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко, И. Ю. Ошурков, В. М. Цаплев // World Science: Problems and Innovations: сб. статей X Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. Ч. 1. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2017. С. 111–118.

B. Ch. Ee, R. S. Konovalov, S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko, I. Yu. Oshurkov, V. M. Tsaplev
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

EXPERIMENTAL STUDY OF THE POSSIBILITY OF REDUCING THE DURATION OF THE TRANSIENT PROCESS IN THE RADIATION-RECEIVING SYSTEM

The pulse mode of the system of two similar piezoceramic disk transducers was studied. The immersion media was glycerin. The radiator was excited by the complex waveform signal. It was found experimentally that the complex signal excitation reduces essentially the duration of the electric pulse output of the receiver in comparison with the case of excitation by the single sine half-period at the antiresonance frequency. It was shown that the experimental results rather well correspond to the theoretical results.

**Radiation-receiving system, piezoelectric transducer, d'Alembert's method, acoustic pulse,
electric pulse, compensating pulse**
