

УДК 534.231

## Исследование амплитудно-частотных характеристик пьезокерамического элемента на основе соединения цирконий-титанат-свинец

С. А. ХАХОМОВ, И. Н. ЯКОВЦОВ, С. Д. БАКСУКОВ

Возможность гигантского усиления ультразвука в кристаллах и керамиках во вращающемся электрическом поле была теоретически рассмотрена в монографии [1]. Этот эффект является следствием подавления поглощения акустических волн и результатом интерференции собственных мод акустического поля. Способ и устройство для преобразования (усиления) ультразвуковой волны были предложены в [2]. Практическая реализация устройства поставила ряд задач, решение которых частично отражено в данной работе.

Амплитудно-частотные характеристики пьезокерамических резонаторов имеют несомненную научно-практическую важность. Их изучение позволяет судить не только о качестве изготовления пьезокерамического резонатора, но и в общем случае определяет степень применимости конкретного образца в данной научно-технической задаче.

В практических исследованиях зачастую приходится применять различные образцы пьезокерамики [3-5], параметры которой не всегда можно найти в справочнике. Наиболее сложно решается вопрос о поиске резонанса в самостоятельно изготовленных образцах и исследовании их частотных характеристик. В первую очередь, это связано с зависимостью частотных свойств пьезоматериалов не только от строения кристаллической решетки и химической формулы, но и от геометрических параметров самого образца. Наличие побочных резонансов и их интенсивность связана с несовершенством конструкций резонаторов, способов их возбуждения. Контроль АЧХ резонаторов в процессе разработки и эксплуатации позволяет избежать серьезных технических трудностей, определить качество вновь изготовленных образцов [6].

Для возбуждения в кристалле продольной акустической волны с применением обратного пьезоэффекта необходимо поместить кристалл в изменяющееся электрическое поле так, чтобы направление линий напряженности электрического поля совпадало с направлением электрических осей кристалла, в этом случае преобразование электрического сигнала в механические колебания будет происходить с наибольшей эффективностью. На практике это реализуется нанесением на срез пьезокерамической заготовки двух и более проводящих электродов, к которым подводится переменное напряжение. Количество и форма наносимых электродов определяется конкретными задачами, которые будет выполнять пьезоэлектрический резонатор, а также видом возбуждаемых в нём колебаний.

С электрической точки зрения пьезокерамический резонатор может быть представлен в виде колебательного контура третьего порядка вблизи резонансных частот и как конденсатор емкостью  $C_0$  вдали от резонансных частот.

Эквивалентная электрическая схема резонатора представлена на рисунке 1.

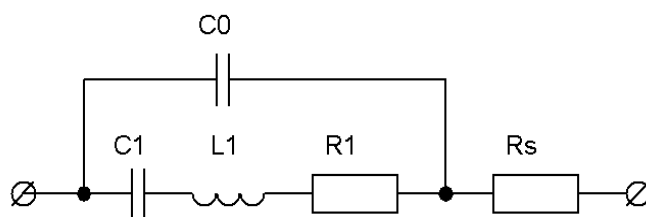


Рисунок 1 – Электрическая схема замещения пьезокерамического резонатора

Из рисунка видно, что пьезорезонатор имеет частоты последовательного резонанса, обусловленного динамическими составляющими  $C_1$  и  $L_1$ , а также параллельный резонанс, который обеспечивает статическая параллельная емкость резонатора вместе с динамической индуктивностью. Для пьезорезонаторов характерны высокие значения эквивалентной индуктивности  $L_1$  – от тысячи генри до миллигенри, и соответственно, очень малые значения эквивалентной емкости  $C_1$  – порядка долей пикофарад. Активная составляющая сопротивления пьезорезонатора  $R_s$  характеризует потери, возникающие в образце в условиях возбуждения.

Частота резонатора является основным параметром, который указывается в технической документации и представляет интерес при выборе пьезокерамических образцов. Однако номинальная частота резонатора не дает полного представления о рабочих частотах выбранного образца. Поэтому несомненный интерес имеет спектральная характеристика резонатора. Спектральная или амплитудно-частотная характеристика дает представление о частотах основного резонанса, а также частотах побочных резонансов, которые могут иметь интенсивность колебаний, сравнимую с интенсивностью основного резонанса. Интенсивность побочных резонансов обычно выражают в относительных единицах (отношения сопротивлений на частоте побочного и основного резонансов). В ряде случаев спектр частот резонатора характеризуется регулярными побочными резонансами, частоты которых достаточно точно определяются относительно частоты основного резонанса.

Работа резонатора в условиях побочного резонанса, а также вблизи его не является нормальной, так как здесь не выполняются заданные производителем параметры, а главное – отсутствует стабильность частоты и имеет место температурная нестабильность частоты.

С целью изучения спектральной характеристики пьезокерамических резонаторов, а также проведения экспериментов с применением пьезорезонаторов нами был разработан специальный широкополосный усилитель амплитуды электрического сигнала, предназначенный для управления пьезокерамикой любых типов (рисунок 2).



Рисунок 2 – Вид спереди усилителя для управления пьезорезонаторами

Усилитель позволяет работать как в условиях резонанса, когда полное сопротивление резонатора стремится к нулю, так и в условиях, когда возбуждение резонатора осуществляется на частотах выше резонансных. В этом случае резонатор ведет себя как электрический конденсатор и его реактивное сопротивление монотонно убывает с увеличением частоты.

Основные технические характеристики усилителя следующие: максимальная амплитуда выходного напряжения – до 120 В; диапазон усиливаемых частот – от 10 кГц до 10 МГц; максимальный ток в нагрузке – 0,15 А; амплитуда входного сигнала – 1 В.

С применением разработанного усилителя нами были проведены исследования пьезокерамического резонатора марки ЦТС-19. Образец изготовлен в виде цилиндра диаметром 26 мм и высотой 8 мм, на верхнее и нижнее основания цилиндра были нанесены проводящие электроды – обкладки.

Измерения проводились по схеме, приведенной на рисунке 3.

Пьезорезонатор в данной схеме возбуждается пассивным методом [7]. Сигнал синусоидальной формы с функционального генератора подается на широкополосный усилитель для управления пьезоэлементами. С выхода усилителя снимается усиленный эталонный сигнал,

который подается на вход (2) осциллографа. По этому входу осциллографа производится контроль постоянства амплитуды возбуждающего переменного напряжения. Через ограничительный резистор (R) управляющий сигнал подается на изучаемый пьезокерамический образец. Ограничительный резистор служит для предотвращения выхода из строя усилителя в момент резонанса, так как в оговоренных условиях полное сопротивление резонатора лежит в пределах от 10 до 50 Ом в зависимости от исполнения. Значение сопротивления R должно превышать минимальное сопротивление нагрузки усилителя. В нашем случае сопротивление R было выбрано равным 1 кОм.

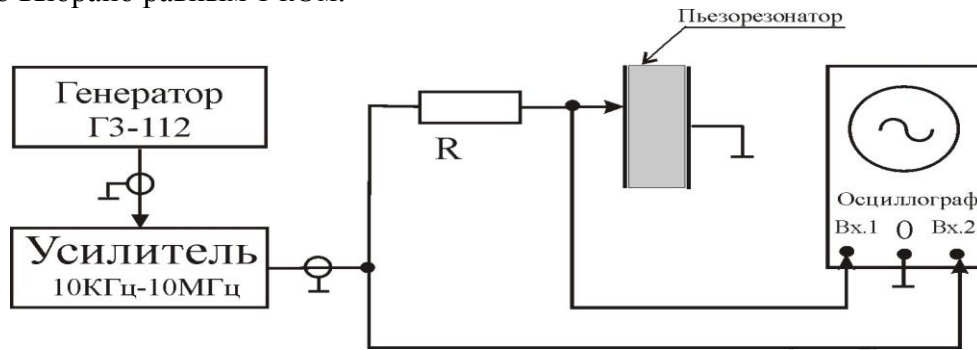


Рисунок 3 – Структурная схема измерительной установки

По входу (1) осциллографа производится снятие амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) исследуемого пьезоэлемента – зависимость падения напряжения на резонаторе от частоты. Частоты, на которых имеются ярко выраженные пики падения напряжения, соответствуют частотам, на которых сопротивление резонатора резко уменьшалось, а значит резонансным частотам.

Экспериментально была получена АЧХ пьезоэлемента при напряжении возбуждения  $U_{\text{возб.}}=30$  В (рисунок 4). Измерения проводились в диапазоне частот от 10 кГц до 2 МГц, при этом амплитуда возбуждающего напряжения оставалась постоянной.

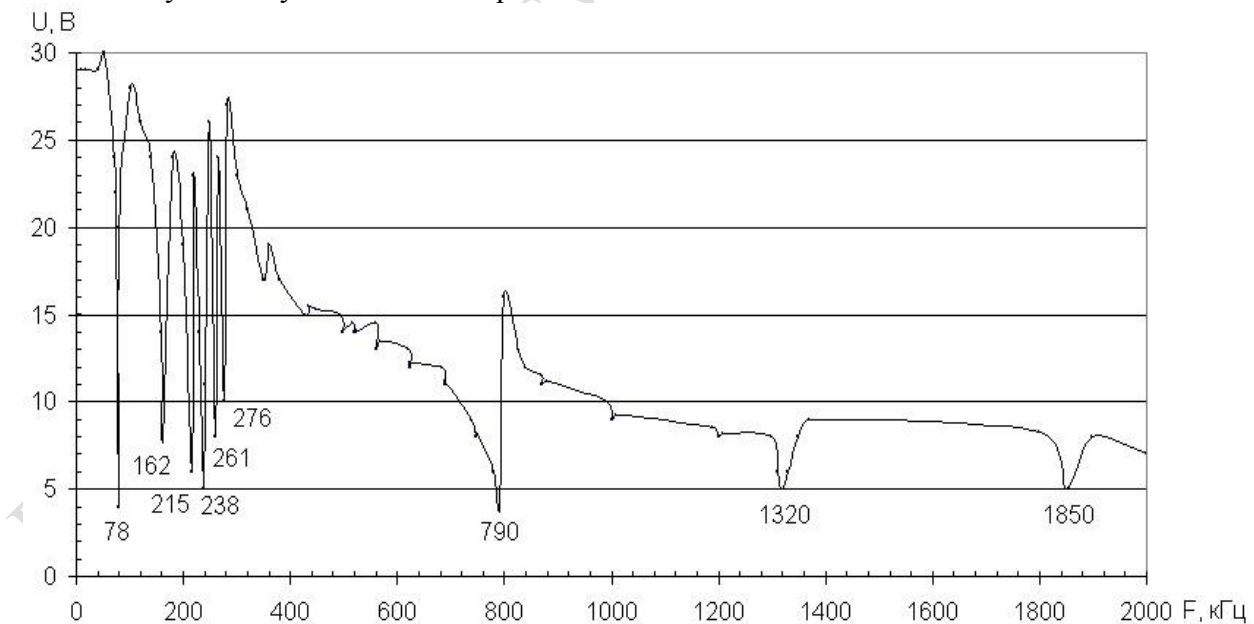


Рисунок 4 – Амплитудно-частотная характеристики пьезоэлемента марки ЦТС-19

Полученный график позволяет судить о наличии основного резонанса и кратных ему частот – обертонов, их частоты отмечены на графике. Помимо основного резонанса на рисунке можно видеть довольно большие пики побочных резонансов. Особенно ярко они выражены вблизи частот основного резонанса – (100-300) кГц. Из графика трудно определить,

на какой частоте имеет место основной резонанс, т.е. первая гармоника собственных резонансных колебаний изучаемого образца, так как в области основного резонанса интенсивность побочных резонансов сравнима с интенсивностью основного. Далее по графику за основным резонансом следуют обертоновые резонансы, частоты которых отмечены на графике. Каждый последующий резонанс в приближении отличается от предыдущего на постоянное целое число. Однако амплитуда обертоновых колебаний монотонно убывает с увеличением порядка обертонов. Помимо уменьшения интенсивности обертоновых колебаний из графика нетрудно заметить общий спад амплитуды возбуждающего переменного напряжения. Это связано с падением напряжения на собственной (параллельной) емкости резонатора. Увеличение частоты приводит к уменьшению реактивного емкостного сопротивления, а значит большему падению напряжения на нем.

Разработанный усилитель может быть включен в состав измерительных комплексов, установок и найти широкое применение в экспериментальных научных исследованиях по изучению свойств пьезокерамики, при изготовлении резонаторов, при изучении явления пьезоэффекта в различных средах, изучении акустических свойств материалов. В производстве – при контроле объемных дефектов в материалах. В учебном процессе вузов усилитель может применяться как структурное звено лабораторных установок для выполнения физического практикума.

Авторы выражают благодарность профессору И.В. Семченко за постановку задачи и помощь в решении.

**Abstract.** The ceramics of PZT system is investigated. The dependence of decrease of voltage of resonator on frequency is obtained. The wide range amplifier of amplitude of electric signal for control of piezoceramics of any types is elaborated.

### Литература

1. Семченко И.В., Хахомов С.А. Объемные акустические волны в кристаллах во вращающемся электрическом поле, "Беларуская навука", Минск, 1998.
2. Решение о выдаче патента РФ на изобретение. Семченко И.В., Хахомов С.А., Способ и устройство для преобразования ультразвуковой волны. № 2005104863/28 от 22.05.2005.
3. Исследование электрострикционных констант первого и второго порядка в веществах с большой диэлектрической проницаемостью / Пекар С. И., Демиденко А. А., Здебский А. П. и др. // Докл. АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 230, № 5. С. 1089-1091.
4. Жабитенко Н. К., Кучеров И. Я. Исследование влияния электрического поля на скорость распространения упругих волн в изотропных твердых телах // Укр. физ. журн. 1978. Т.23, № 2. С. 263-266.
5. Влияние постоянного электрического поля на распространение поверхностных акустических волн в пьезокерамике системы ЦТС / Рыбьянец А. Н., Турик А. В., Дорохова Н. В., Мирошниченко Е. С. // Журн. техн. физики. 1986. Т. 56, № 12. С. 2371-2375.
6. Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы // Справ. пособие. – М.: Радио и связь, 1984.
7. Кандыба П.Е., Поздняков П.Г. Пьезоэлектрические резонаторы //Справочник. – М.: Радио и связь, 1992.