

С. К. Цветаев

Москва, Россия, e-mail: [stsvetaev@mail.ru](mailto:stsvetaev@mail.ru)

## Моделирование датчиков акустической эмиссии и калибровка электрострикцией

Получена 15.02.2021, опубликована 10.04.2021

Для математического моделирования распространения и приёма ультразвуковых импульсов применяется программа EMTLab, позволяющая составить эквивалентную схему датчика акустической эмиссии и получить его отклик на импульсный сигнал. Для этого практически и математически наряду с эталонными методами применяются ударная труба низкого давления - функция Хевисайда, искровой разряд или взрывное кипение – функция Дирака, силы Кулона - отрезок гармонической функции с постоянным смещением. Показано, что калибровочные и реальные акустические сигналы разрядных процессов совпадают с полученными программой. Поэтому для акустически простых объектов энергетики можно моделировать переходную функцию среды, восстанавливая исходный импульс. Рассмотрено применение пондеромоторных сил для генерации ультразвука на второй гармонике приложенного напряжения, что повышает помехоустойчивость измерений. Показано, что электризация плёнки диэлектрика может быть помехой при измерениях.

Ключевые слова: электромеханические аналогии, импульсная переходная функция датчика, переходная функция среды, акустика разрядных процессов, электрострикция.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что специалисты по радиосвязи, зная передаточную функцию среды распространения радиоволны и корректируя с её помощью радиоприём, добиваются достоверности принимаемого сигнала. Моделирование характеристик акустического приёмника — первый шаг для восстановления исходного акустического импульса. Второй шаг — это установление пути распространения звуковой волны и акустических свойств среды на этом пути. Например, применение датчиков акустической эмиссии для диагностики изоляции мощного высоковольтного оборудования рекомендовано международным стандартом [1], но этот метод не является сопоставимым с другими методами из-за незнания условий распространения звука. В настоящее время по звуку можно отличить единичный разряд в изоляции, искровой разряд в подгорающем контакте, многочисленные разряды и посторонние виброударные звуки [2, 3]. Однако, классификация звуков многочисленных разрядов (ползущих, скользящих и др.) затруднена [4].

Датчики акустической эмиссии представляют собой электрически экранированный пьезоэлектрический приёмник, который для повышения чувствительности соизмерим с половиной длины волны. Датчики акустической эмиссии бывают узкополосными, состоящими из одного акустического резонатора, и широкополосными, имеющими несколько резонансных частот в рабочем диапазоне [5], что достигается наличием нескольких демпфированных акустических резонаторов. Определение чувствительности по акустическому давлению и амплитудно-частотных характеристик АЧХ датчиков проводится различными способами.

- Гармоническими сигналами в безэховой камере на воздухе или в режиме бегущей волны в воде [6, 7].

- С помощью ступеньки давления ударной трубы низкого давления в воздухе [8].

- Искровым разрядом в воздухе [9] или взрывным кипением в воде или в масле [10].

- С помощью шумовых сигналов, например, от песочных часов.

Практическая проверка чувствительности датчика достаточна на частоте какого-либо резонанса, она требуется постоянно и поэтому должна быть удобной и помехоустойчивой. Поэтому предлагается использовать излучение на второй гармонике приложенного напряжения. При эффектах электрострикции [6] сила Кулона обратно пропорциональна квадрату расстояния и пропорциональна произведению взаимодействующих зарядов. Поэтому она проявляется в тонких плёнках диэлектриков в электрическом поле. Если поле изменяется с ультразвуковой частотой, диэлектрическая плёнка будет излучателем ультразвука. Этот ультразвук можно применить для проверки чувствительности датчиков акустической эмиссии.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Датчик АЭ типа РЧРш, рис. 1 (3) состоит из герметичного корпуса, на доньшке которого установлен пьезоэлектрический диск (7) с частотно понижающей накладкой (8). Корпус в районе диска и накладки заполнен звукопоглощающим материалом. Сверху в корпусе расположен электронный усилитель (9), подсоединённый к коаксиальному разъёму. Усилитель имеет полосу пропускания 60-150 кГц со спадом вне полосы более 20 дБ/октаву. Механические резонансы датчика в полосе 70-140 кГц.

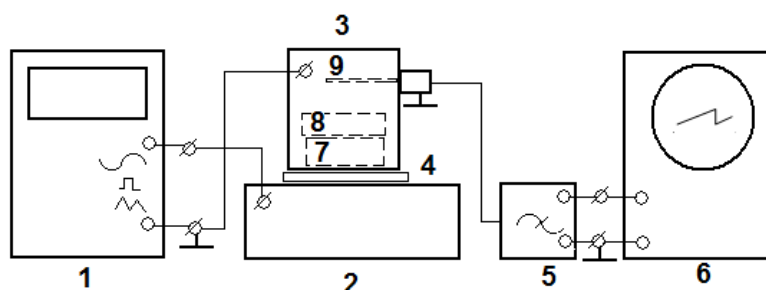


Рис. 1. Блок-схема калибровочной установки 1 - генератор, 2 - плита, 3 - датчик, 4 - диэлектрическая плёнка, 5 - фильтр высоких частот и питание датчика, 6 - осциллограф, 7 - пьезоэлектрический диск, 8 - частотно понижающая накладка, 9 - электронный усилитель

Эти характеристики можно подтверждать эталонными методами [6, 7] с помощью гармонических сигналов, а можно и другими способами. В работе [9] установлено, что АЧХ датчика является спектром импульсного сигнала искрового разряда в воздухе. Одиночный искровой разряд образуется при разряде конденсатора ёмкостью 40 пФ, заряженного до 10 кВ, через разрядный промежуток 4 мм. Амплитуда давления на расстоянии 1 м составляет 7 Па. Этот сигнал — импульс давления длительностью несколько микросекунд для рабочей полосы частот является функцией Дирака с равномерным частотным спектром. Импульс взрывного кипения в воде или трансформаторном масле [10] имеет длительность около 5 мкс и тоже имеет равномерный спектр. Амплитуда импульса 30000 Па на расстоянии 1 мм от раскалённой проволоочки диаметром 50 мкм. Ступенька давления в воздухе от ударной трубы низкого давления [8] в виде функции Хевисайда имеет передний фронт 1 мкс и длительность 1 мс. Амплитуда давления ударной волны более 50000 Па, и поэтому датчик испытывается без усилителя. Спектр ступеньки обратно пропорционален частоте и тоже может использоваться для калибровки датчиков и определения его АЧХ. Все перечисленные способы существуют в программе EMTLab и могут проверяться на моделях датчика.

В соответствие с электромеханическими аналогиями механический колебательный элемент с одной степенью свободы эквивалентен электрическому контуру LCR. При этом  $L$  определяется массой,  $C$  — упругой податливостью,  $R$  — потерями энергии, электрическое напряжение эквивалентно силе, а электрический ток — колебательной скорости [11].

Анализируя АЧХ датчика типа РЧРШ при калибровке и при многочисленных применениях можно определить ряд его резонансных частот. Это резонанс доньшка на частоте 70 кГц, радиальный резонанс пьезоэлектрического диска на частоте 110 кГц и толщинный резонанс диска с накладкой на частоте 140 кГц. Добротность этих резонансов можно оценить по ширине максимумов АЧХ. На рис. 2 приведён сигнал датчика от искрового разряда и его АЧХ, полученная преобразованием Фурье (под осциллограммой слева).

Поэтому в первом приближении была принята эквивалентная схема из трёх RLC контуров рис. 3. На этой схеме  $C1$  — ёмкость пьезоэлектрического диска,  $R2$  — входное сопротивление усилителя,  $R1$  — элемент в котором электрическое напряжение (сила или давление) совпадает по фазе с током (колебательной скоростью), что соответствует плоской волне. Чтобы ёмкость  $C1$  не влияла на механические резонансы, ёмкости  $C$  в контурах имеют меньшую величину. Такая модель не является теоретически обоснованной [11], и её достоверность подтверждается идентичностью реальных и смоделированных сигналов. На схеме рис. 3 к датчику подключён генератор импульса длительностью 3 мкс. Переходный процесс наблюдается осциллографом по каналам  $V1$  и  $V2$ . Вместо генератора импульса можно установить генератор гармонического сигнала с развёрткой по частоте и снять АЧХ модели датчика рис. 2 (под осциллограммой справа). Как видно из рисунков и сигналы и АЧХ модели и датчика совпадают.

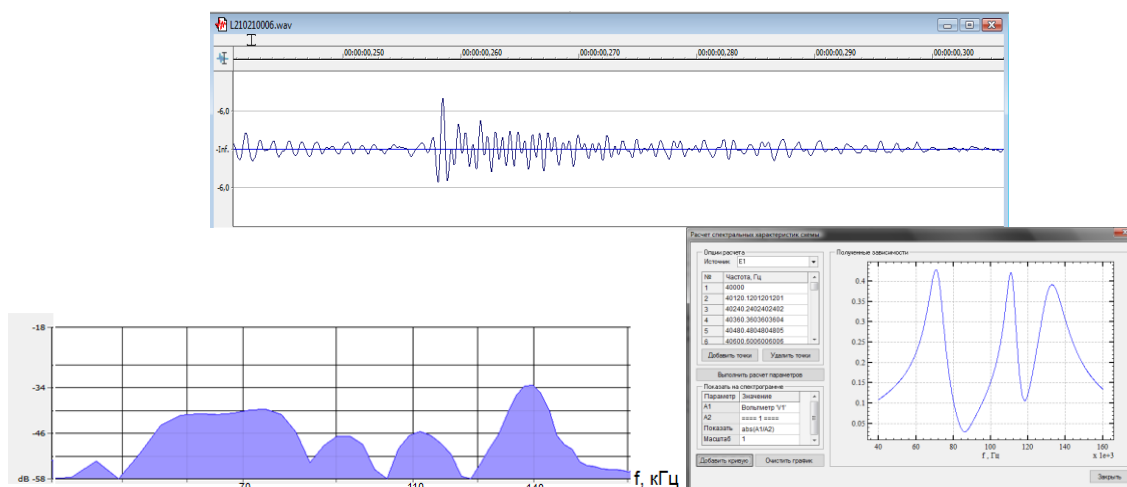


Рис. 2. Осциллограмма сигнала от искрового разряда и его спектр (внизу слева) и спектр модели (справа)

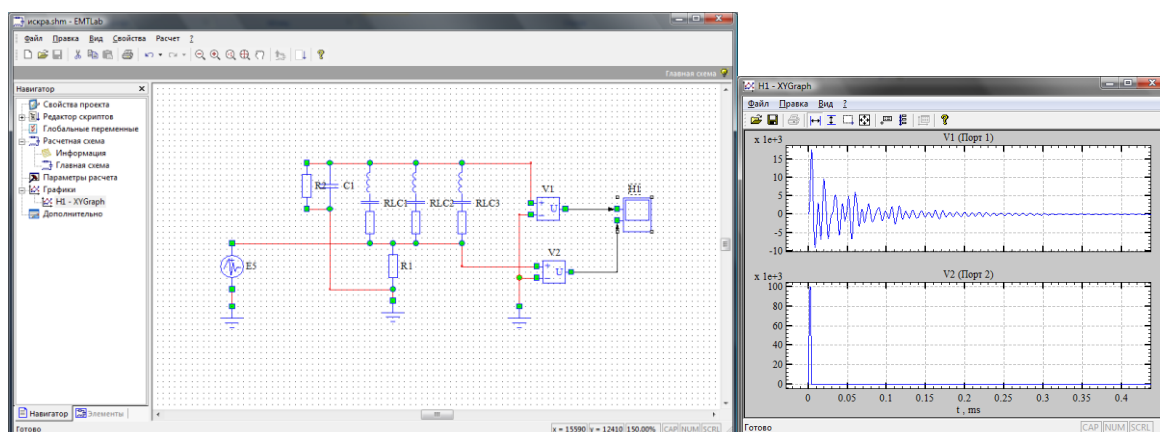
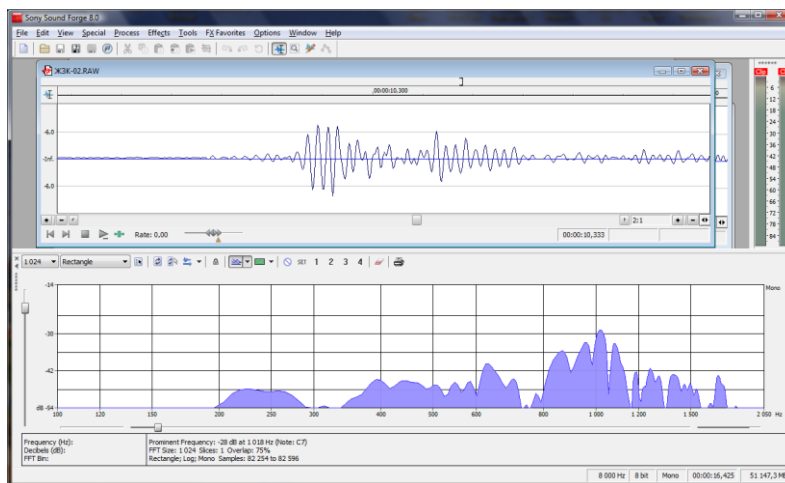
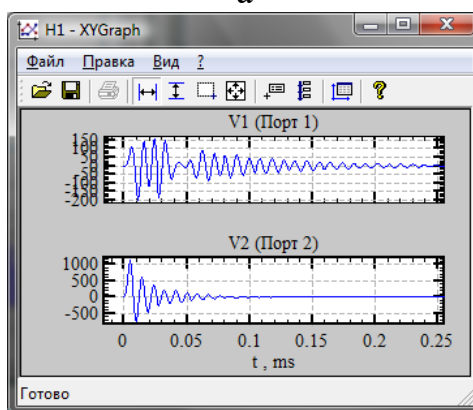


Рис. 3. Схема модели датчика в программе EMTLab и осциллограмма сигнала от импульса давления. Значения элементов схемы приведены в таблице:

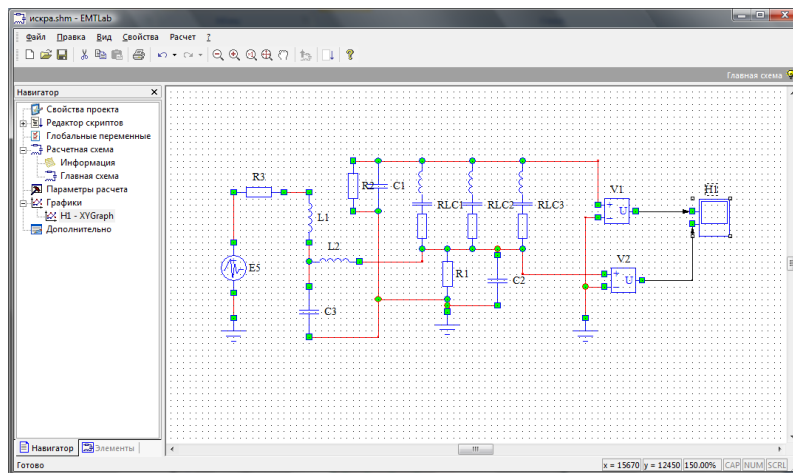
Частота/значение	70 кГц	110 кГц	140 кГц
R, КОМ	2	1,5	2
L, мГн	69	72	37
C, пФ	75	29	41
Добротность Q	15	35	15



а



б



в

Рис. 4. Аварийный сигнал от разрядов в изоляции переходной соединительной кабельной муфты типа МПМНП-110кВ и его моделирование

На рис. 4 приведён аварийный сигнал от одиночного частичного разряда в переходной соединительной кабельной муфте типа МПМНП- 110 кВ кабельной линии Елоховская-Андроньевская (Москва). Сигнал и его спектр (а) перед индикацией программой Sound Forge замедлен в 100 раз, поэтому значения по шкале времени

следует делить на 100, а по шкале частоты следует умножать на 100. Схема модели процесса (с) содержит источник импульсного давления E5 и фильтр низкой частоты перед схемой датчика. Осциллограммы сигнала датчика V1 и сигнала на входе датчика V2 приведены на экране (в).

Корпус этой муфты — металлический цилиндр (труба) диаметром 0,4 м, длиной 1 м с почти акустически однородной средой кабельного масла. Разряд происходит внутри примерно в 20 см от датчика, установленного на корпусе, и так как это частичный разряд, импульс давления вблизи разряда составляет несколько микросекунд. Видно, что сигнал датчика и модели практически совпадают, если путь распространения смоделирован LCL фильтром низких частот. При этом на осциллограмме V2 приведена переходная функция среды на импульс, а на осциллограмме V1 реакция датчика на эту функцию. Другими словами, операция свёртки сигнала среды V2 с импульсной переходной функцией датчика даёт сигнал датчика.

Многочисленные разряды в изоляции состоят из отдельных одиночных разрядов в различные моменты времени и при индикации электрическим методом сигналы от них разделены по времени [4], а при индикации акустическим методом сигналы на осциллограмме неразличимы. По-видимому, если применить свёртку электрического сигнала, сформированного из электрических импульсов разрядов в виде дельта функций, с переходной функцией среды и с переходной функцией датчика, можно смоделировать акустические сигналы многочисленных разрядов. Формирование коротких положительных импульсов меньше 10 мкс из электрических импульсов разрядов производится детектором, например, в схеме электрического зонда частичных разрядов Robotron (зонд Лемке). Подавая этот сигнал на вход схемы Рис. 4с, можно получить реальный акустический сигнал, и тем самым добиться соответствия электрических и акустических импульсов. Это соответствие необходимо для акустической локации места возникновения дефекта с разрядами, так как акустический сигнал запаздывает на определённое время, и величина этого времени указывает расстояние от дефекта до датчика. На практике акустического обследования процесс локации является самым сложным и не всегда удаётся. Возможно, с помощью моделирования можно облегчить локацию дефектов. Учитывая, что в таких высоковольтных объектах энергетики, как высоковольтные вводы трансформаторов, концевые и соединительные муфты, вводы в элегазовые распределительные устройства, токопроводы, измерительные трансформаторы тока и напряжения условия распространения звука сравнительно простые [12], можно применять предложенное моделирование при акустическом обследовании этих объектов. Выбор схемы замещения среды распространения можно проводить программно перебором вариантов.

## 2. ПРОВЕРКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СИЛ КУЛОНА

Если установить датчик на металлическую пластину через плёнку диэлектрика и приложить между датчиком и пластиной электрическое напряжение  $U$ , то давление, возникающее в диэлектрике, равно:

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2x^2},$$

где  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  [Ф/м] — диэлектрическая постоянная;  $x$  — расстояние между пластинами;  $E$  — электрическое поле.

При подключении переменного напряжения  $U = U_m \sin(\omega t)$  возникает звуковое давление с удвоенной частотой

$$P = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2x^2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (U_m \sin(\omega t))^2}{2x^2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U_m^2 (1 - \cos(2\omega t))}{4x^2}.$$

На рис. 1 показана блок-схема калибровочной установки. С функционального генератора (1), подаются пакеты импульсов синусоидальной формы заданной частоты на испытуемый датчик (3). В данном исследовании подавался один период синусоиды через промежуток в одну секунду. Делалось это для того, чтобы исключить наложение падающей и отраженной от дна металлической пластины волн.

Под действием приложенного напряжения между плитой и датчиком возникают описанные выше пондеромоторные силы и затухающая акустическая волна, которая пьезоэлементом преобразуется в электрический сигнал. Этот сигнал усиливается внутренним усилителем и по коаксиальному кабелю поступает через электрический фильтр (5) в осциллограф (6).

Пример калибровочного сигнала показан на рис. 5. Параметры выдаваемого пакета импульсов с функционального генератора: напряжение питания (амплитуда) — 10 В; частота питающего напряжения — 50 кГц; количество импульсов в пачке — 1; промежуток между импульсами — 1 с.

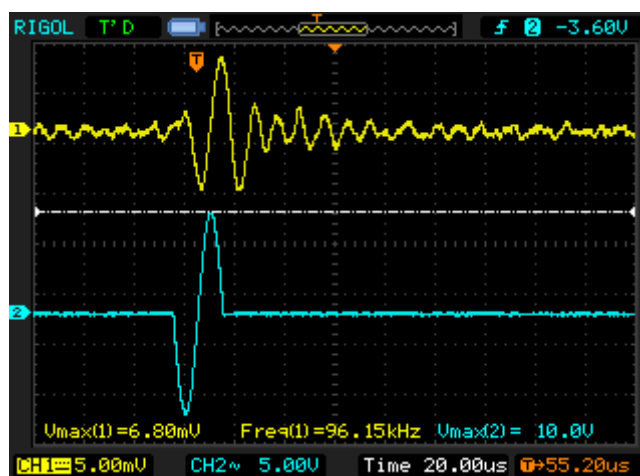


Рис. 5. Осциллограммы сигналов: CH1 — сигнал датчика; CH2 — сигнал питающего напряжения

Видно, что отклик датчика соответствует удвоенной частоте напряжения. Давление, воздействующее на датчик:

$$P = \frac{\epsilon\epsilon_0 U^2}{2x^2} = \frac{2,25 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 10^2}{2 \times (120 \times 10^{-6})^2} = 0,068 \text{ Па},$$

где  $\epsilon = 2,25$  – относительная диэлектрическая проницаемость полиэтилена;  
 $x = 120 \cdot 10^{-6}$  [м] – толщина плёнки.

Разделив максимальную амплитуду зарегистрированного сигнала на вычисленное значение давления, получаем чувствительность датчика на частоте 100 кГц – 100 мВ/Па. Данное значение чувствительности указано в паспорте на акустический датчик. Этот эксперимент можно моделировать с помощью программы.

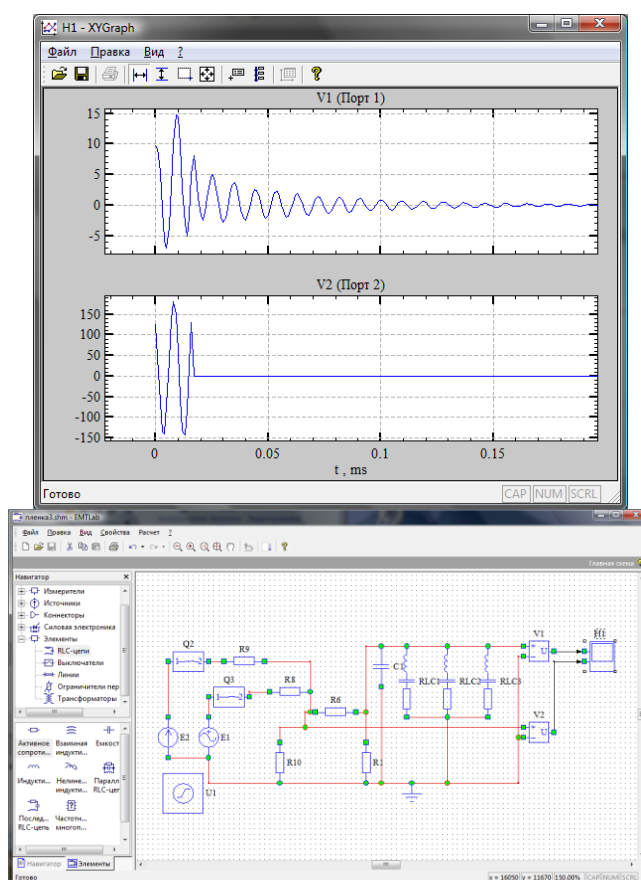


Рис. 6. Моделирование сигнала сил Кулона

Видно, что реальный сигнал и осциллограмма программы совпадают. На схеме импульс формируется суммированием функций Хевисайда и гармонической с удвоенной частотой и одновременным отключением генераторов ключами. Для практического применения необходимо отсутствие электризации плёнки.

Когда к плёнке приложено постоянное и переменное напряжение  $U = U_0 + U_1 \sin(\omega t)$ , возникает давление  $P$  пропорциональное  $U^2$ . При этом первая гармоника давления пропорциональна  $2U_0U_1 \sin(\omega t)$ , а вторая гармоника давления пропорциональна  $U_1^2 \cos(2\omega t)$ .



На фото приведен эксперимент с конденсатором 5700 пФ, закреплённым через смазку на датчике акустической эмиссии. Через второй конденсатор 1 мкФ к первому приложено  $U_1 = 5$  В частотой 55 кГц (верхний луч следующих фото). Нижний луч — сигнал датчика. Сигнал с частотой 110 кГц возникает, когда конденсатор предварительно разряжен замыканием через резистор. Сигнал с частотой 55 кГц возникает, когда конденсатор предварительно заряжен, например, постоянным напряжением  $U_0 = 24$  В.

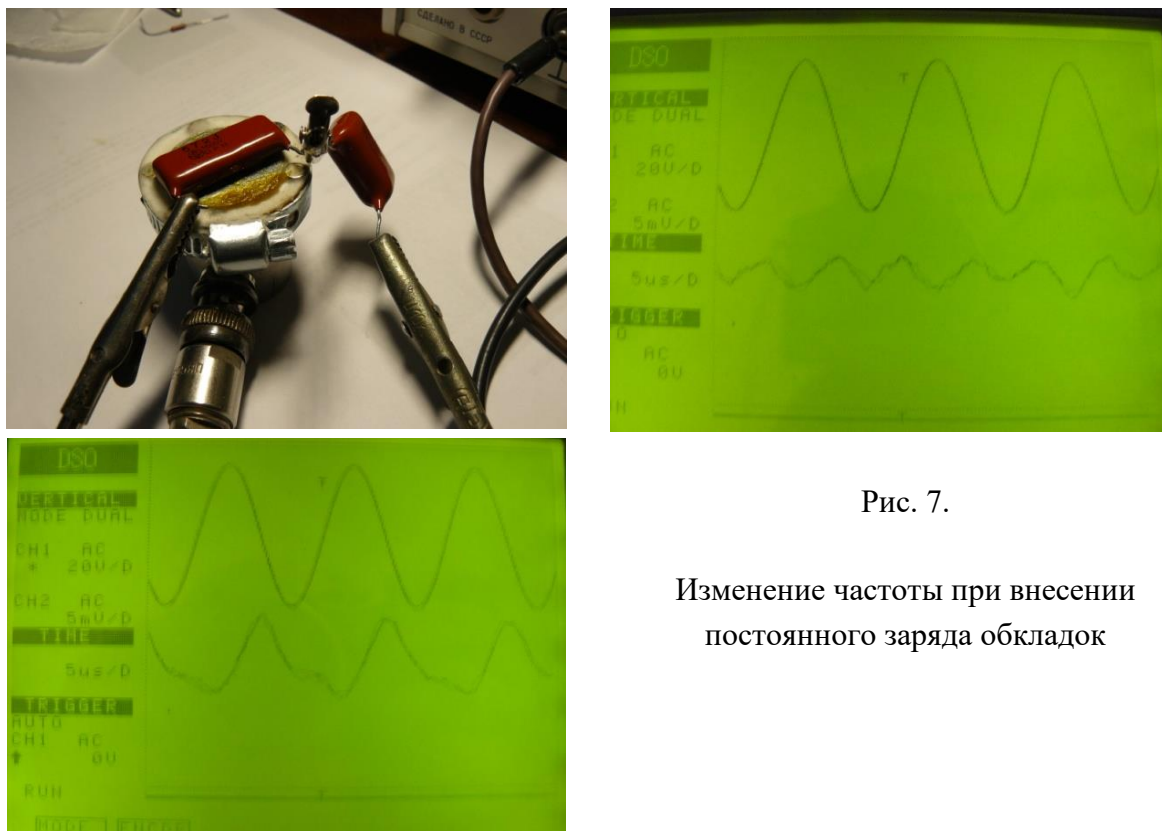


Рис. 7.

Изменение частоты при внесении постоянного заряда обкладок

Помещённый в изолятор связанный заряд, например, электронной или ионной бомбардировкой, влияет аналогично дополнительному заряду на электродах и приводит к появлению первой гармоники в акустическом сигнале.

Предположим, что в плёнку диэлектрика толщиной  $x$  внесён на глубине  $y$  тонкий слой связанного заряда с общим зарядом  $Q$ , и к плёнке приложена разность потенциалов  $U = U_0 + U_1 \sin(\omega t)$ . Вычислим давление сил Кулона  $P_1$  в области толщиной  $y$ , и  $P_2$  в области  $x - y$ .

$$P_1 = (Q_0 + Q_1 + Q(x - y)/x)^2 / 2\epsilon\epsilon_0 S^2 \text{ и } P_2 = (Q_0 + Q_1 - Qy/x)^2 / 2\epsilon\epsilon_0 S^2,$$

где  $Q_0 = U_0 \epsilon\epsilon_0 S / x$ ,  $Q_1 = U_1 \epsilon\epsilon_0 S \sin(\omega t) / x$ ,  $S$  – площадь обкладок.

Из формул видно, что с разных сторон плёнки действует разное давление. Поэтому, поместив плёнку между двумя датчиками и изменяя  $Q_0$ , можно добиться только удвоенной частоты то в одной, то в другой части плёнки. При этом на основной частоте будет излучать только один слой плёнки, и подавая постоянное напряжение  $U_0$  можно

перемещать источник звука, то есть его фаза на датчиках с разных сторон плёнки будет разной. Частота должна быть в мегагерцовом диапазоне. Центр звучащей области при таком эксперименте смещается на половину толщины плёнки, то есть при скорости звука 2000 м/с и частоте 1 МГц на  $1/30$  длины волны. А фаза сигнала датчика изменится на  $12^\circ$ .

Для  $P_1$  и  $P_2$  два уравнения с двумя неизвестными  $Q$  и  $y$ . По-видимому, таким способом можно измерить заряд плёнки и глубину его залегания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование датчика АЭ тремя резонаторами с помощью программы EMTLab. Показано, что калибровочные и реальные акустические сигналы разрядных процессов совпадают с получаемыми программой. Поэтому для сравнительно простых объектов можно моделировать переходную функцию среды, восстанавливая исходный импульс. Предложен способ проверки чувствительности датчиков АЭ с помощью сил Кулона. При этом следует опасаться электризации плёнки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 62478 High-voltage test techniques: Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods.
2. Чуличков А.И., Цыбульская Н.Д., Цветаев С.К., Сурконт О.С. Классификация акустических сигналов разрядных процессов в изоляции на основе формы их вейвлет-спектров. Вестник московского университета. Серия 3. Физика и астрономия. 2009. № 2, стр.103.
3. Жуков А., Корнев М., Цветаев С. Повреждение силового трансформатора. Способы предотвращения. Новости электротехники, 2015, № 1, стр. 36.
4. Рощупкин М.Д., Ермаков Е.Г., Хренов С.И. Акустические сигналы от частичных разрядов, Электричество, 2011, №11, с.12.
5. РД 03-300-99 Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов.
6. Маленькая энциклопедия УЛЬТРАЗВУК, под ред. И.П.Голяминой. - М.: 1979.
7. ВНИИФТРИ, НИО 5, ГЭТ 55-2017 Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде.
8. Dolzhenko A.A., Tsvetaev S.K., Shmatov J.V. Application of Acoustic Sensor for Registration of Partial Discharges in High Voltage Power Equipment, Conference ULTRASOUND86, November 3-6 1986, Bratislava.
9. М.Д.Рощупкин, М.А.Кошелев, С.И.Хренов, С.К.Цветаев Калибровка пьезоэлектрических датчиков давления в полевых условиях. Вестник МЭИ, 2011, №5, с.34.
10. Ильин Б.И., Куров В.Ю., Цветаев С.К. Полевой плёночный пьезоэлектрический преобразователь. Труды VIII Всесоюзной акустической конференции, М., 1973. С. 127-129.
11. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы, М., «Мир»,1971.
12. Цветаев С.К. Акустические сигналы и аварийность высоковольтного энергооборудования. Новое в российской электроэнергетике, 2011, № 4, с.41.