

**Макаров К.Н., Юрченко Е.А., Юрченко Е.Е.**

## **ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОУПРУГОСТИ КОНСОЛЬНОГО ОБРАЗЦА ИЗ ПЛАСТИКА ABS, НАПЕЧАТАННОГО НА 3-D ПРИНТЕРЕ**

*Сочинский государственный университет*

### **Введение**

Одним из наиболее достоверных методов оценки устойчивости проектируемых зданий и сооружений против различных силовых воздействий (ветровая или волновая нагрузка, сейсмические воздействия, нагрузка от промышленного оборудования и другие) является физическое моделирование указанных воздействий на модель сооружения в уменьшенном масштабе.

При этом строительство моделей сооружений сложной формы представляет собой отдельную, весьма не простую задачу. Поэтому применение 3-D принтеров для изготовления таких моделей по заранее заданной программе представляется весьма перспективным направлением решения задачи проектирования и изготовления моделей сооружений.

Однако для того, чтобы результаты исследований реакций моделей сооружений на различные виды механических воздействий можно было подвергнуть компьютерной обработке, они должны автоматически считываться с помощью электронных датчиков. Это, в свою очередь, предъявляет соответствующие требования к материалам, из которых изготавливаются модели сооружений.

Таким образом, возникают противоречивые требования – с одной стороны материал модели должен быть из набора, доступного для его применения на 3-D принтере, а с другой – он должен иметь электропроводящие свойства, необходимые для автоматизации обработки результатов моделирования.

В данной работе показано, что указанными свойствами в достаточной степени обладает пластик ABS и, следовательно, из него могут изготавливаться на 3-D принтерах модели строительных конструкций и целиком зданий и

сооружений.

## **1. Теоретические основы исследования**

Природа электроупругости состоит в следующем. Под действием внешних механических сил происходит перераспределение электрических зарядов (полярных удлинённых молекул) внутри образца материала. При этом на поверхности образца появляется некоторая (иногда весьма значительная) разность потенциалов, а в окружающем пространстве изменяется электрическое поле. Примеры электроупругих материалов — ПММА (полиметилметакрилат или органическое стекло), ПВХ (поливинилхлорид) и как мы экспериментально доказали — ABS (акрилонитрилбутадиенстирол). При гармонических механических колебаниях образца электрическое поле вокруг него так же меняется по гармоническому закону.

Зондирование электрического поля вблизи образца происходит следующим способом. Электроды помещают на близком расстоянии от исследуемого образца, не касаясь его поверхности. В результате внешнего механического воздействия на испытуемый образец на поверхности последнего появляются электрические заряды. При помощи электростатической индукции заряды противоположного знака появляются на электродах.

Для обнаружения микротоков нужен высокочувствительный осциллограф. При отсутствии осциллографа можно воспользоваться персональным компьютером со звуковой картой. Поскольку получаемый в опытах электрический сигнал имеет низкую частоту (максимум 20-400 Гц), а звуковая карта обрабатывает электрические колебания до 20 000 Гц, то вполне возможно применить звуковую карту, для обнаружения и последующей обработки интересующего нас сигнала.

Чувствительность линейного и микрофонного входов звуковой карты явно недостаточна для проведения исследований, кроме того, микрофонный вход звуковой карты работает в режиме "моно", т. е. предусматривает подключение одного канала источника звука (микрофона), а нам необходима двухканальная обработка сигнала. Поэтому, в виде приставки к персональному компьютеру

выполнен внешний двухканальный малошумящий микрофонный усилитель. Сигнал, снимаемый с исследуемого образца (2 канала) подаётся в микрофонный усилитель, усиливается в нём до необходимого уровня (приблизительно 0,2-0,5 вольт), и выводится на линейный вход звуковой карты компьютера для дальнейшей обработки.

Технические параметры микрофонного усилителя должны быть, по крайней мере, не хуже чем у звуковой карты, а чувствительность - должна на 15-20 дБ выше уровня исследуемого сигнала.

Идея эксперимента была позаимствована из статьи [1], в которой обоснованы возможности применения электретов в качестве датчиков перемещений и деформаций. Рассматриваемый способ изучения динамики механических процессов, в отличие, от традиционных, является бесконтактным, т. е. не вносит дополнительных элементов в изучаемую механическую систему.

Используется самогенерация механическим процессом регистрируемого электрического сигнала. В экспериментах Ю.К. Бивина [1] для регистрации электрического поля использовался четырехканальный осциллограф LeCroy типа WaveSurfer 24Xs с полосой пропускания 200 МГц. В качестве датчиков измерения напряженности поля использовались штыревые и кольцевые антенны. Эксперименты проводились на консольных балках, а показания снимались со штыревых и кольцевой антенны осциллографом.

## **2. Экспериментальная установка**

Выбранный и изготовленный нами образец усилителя (рис. 1), обладает следующими характеристиками:

- уровень входного сигнала 0,18-0,3 мВ;
- входное сопротивление – 51-75 кОм;
- уровень выходного сигнала (регулируемый) 0.1-2,0 В;
- выходное сопротивление – 47 кОм;
- диапазон усиливаемых частот 5 - 22000 Гц;
- коэффициент гармоник на частоте 1000 Гц - 0,0015%.

Для удобства эксплуатации микрофонный усилитель имеет автономное питание, независимое от компьютера. Микрофонный усилитель состоит из двух идентичных каналов - левого и правого, и общего для них, блока сетевого и батарейного питания.

Рассмотрим электрическую схему левого канала (рис. 1). Усилитель двухкаскадный, выполнен на одном биполярном транзисторе и двух микросхемах (операционные усилители с дифференциальным входом на полевых транзисторах, быстродействие 8 В/мкс, тип — К544УД1 (импортный аналог  $\mu A 740C$ )).

Входной каскад. На входе установлен биполярный маломощный транзистор КТ3107Л структуры р-п-р, с коэффициентом усиления ( $h_{21Э}=300$  – типовое значение при  $r_{б}=200 \text{ Ом}$ )

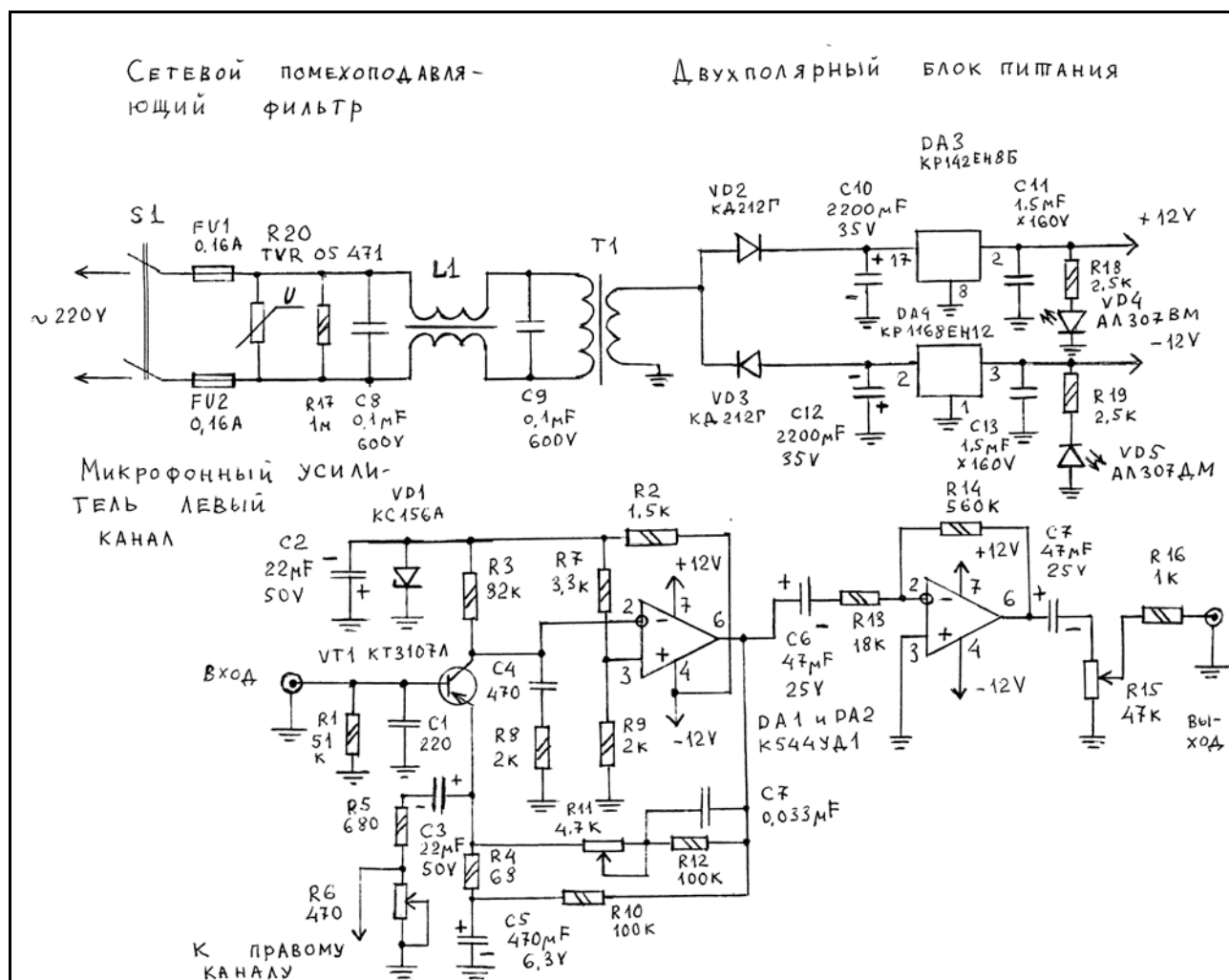


Рис. 1. Устройство микрофонного усилителя

Входной каскад выполнен составным и сконструирован на VT1 KT3107Л и ОУ DA1 с гальванической связью между ними. Связь между входом и базой транзистора гальваническая, что обеспечивает усиление низкочастотных составляющих сигнала. Входное сопротивление усилителя определяется резистором R1 и составляет 51 кОм (может быть увеличено до 75кОм). Напряжение на коллекторе транзистора VT1 стабилизируется при помощи стабилитрона VD1 КС156А. Первый каскад охвачен 100% отрицательной обратной связью (ООС) по постоянному току.

Напряжение ООС поступает с выхода ОУ через резисторы R10 и R4 в цепь эмиттера VT1. Входной каскад охвачен частотно-зависимой отрицательной обратной связью (ООС) через цепочку C7R12R11R4. Цепочка C4R8 ограничивает усиление в области высоких частот. Без этой цепочки усилитель пропускает сигналы до 75 кГц. На выходе ОУ DA1 имеется разделительный конденсатор C6 для исключения влияния параметров входного каскада на следующий каскад. Второй каскад выполнен на ОУ DA2. Усиленный предыдущим каскадом сигнал поступает через резистор R13 на инвертирующий вход ОУ DA2. Неиспользуемый неинвертирующий вход ОУ заземлён. ООС по постоянному току включена через резистор R14, соединяющий выход ОУ с инвертирующим входом.

На выходе ОУ имеется конденсатор C7 для предотвращения попадания постоянного тока на выход микрофонного усилителя. Для управления уровнем выходного сигнала имеется регулятор громкости - переменный резистор R15. Подстроечными резисторами R6 и R11 настраивают входной каскад усилителя по минимуму собственных шумов в отсутствии сигнала, т. е. при закороченном на землю входном разъёме. Ёмкости переходных конденсаторов C6 и C7 выбраны достаточно большими, чтобы обеспечить прохождение низкочастотной составляющей усиливаемого сигнала.

Оба ОУ задействованы в инвертирующем включении. При этом полезный сигнал попадает на инвертирующий вход ОУ, а не инвертирующий вход заземлён либо непосредственно, либо через резистивный делитель. Такое

включение уменьшает вероятность самовозбуждения при большом коэффициенте усиления микросхемы.

Типовая схема включения ОУ предусматривает симметричное двухполярное питание со средней точкой (землёй). При таком включении внешняя коррекция ОУ с помощью резистора через выводы 1 и 8 не требуется.

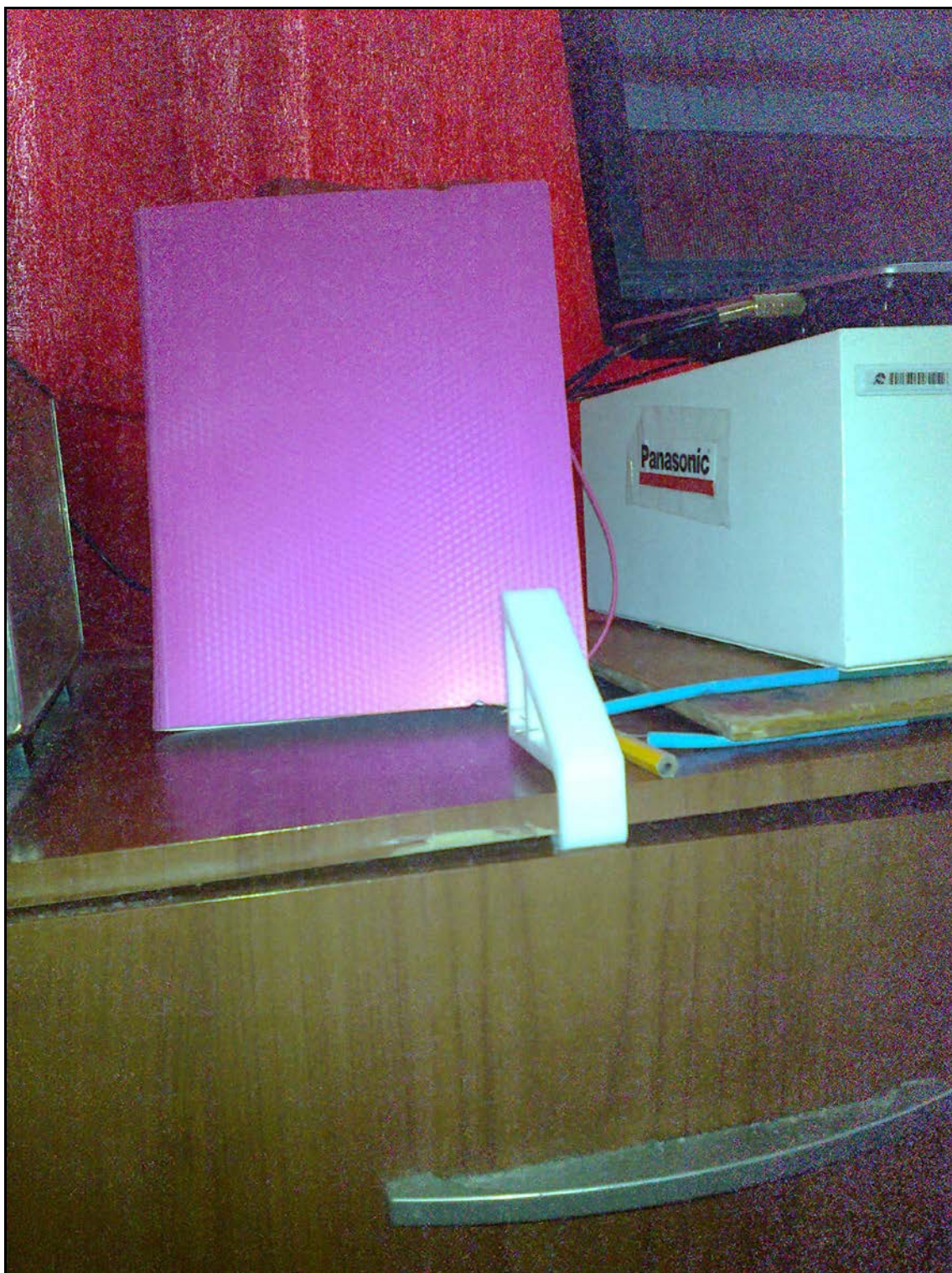
Для минимизации помех от питающей электросети усилитель имеет отсек для батарей. Используются 16 батареек напряжением 1,5 вольта каждая.

Исследуемый образец (рис. 2) жёстко закрепляется одним концом в массивной подставке в горизонтальном положении. Получается конструкция в виде консольной балки.

Вблизи поверхности, на заранее обозначенном расстоянии от места заземления, устанавливаются приёмные антенны. Антенны подключаются к соответствующим входам микрофонного усилителя при помощи коаксиальных экранированных кабелей с соответствующими разъёмами. Выходы микрофонного усилителя подключаются к двухканальному линейному входу звуковой карты персонального компьютера IBM PC-AT-Intel 80686 так же при помощи коаксиальных экранированных кабелей с разъёмами.

На компьютере устанавливается операционная система Windows и программа Spectralab (или операционная система Linux и программа Oscilloscope). Персональный компьютер вместе с подключённым к нему микрофонным усилителем работает как двухканальный осциллограф с верхней граничной рабочей частотой 20 кГц и чувствительностью с микрофонных входов 0,18-0,3 милливольт при входном сопротивлении 51 кОм, что удовлетворяет требованиям поставленной задачи.

При необходимости, результаты опытов в виде осциллограмм могут быть распечатаны на принтере, или сохранены на жёстком диске или сменных носителях в виде файлов.



**Рис. 2. Вид экспериментальной установки**

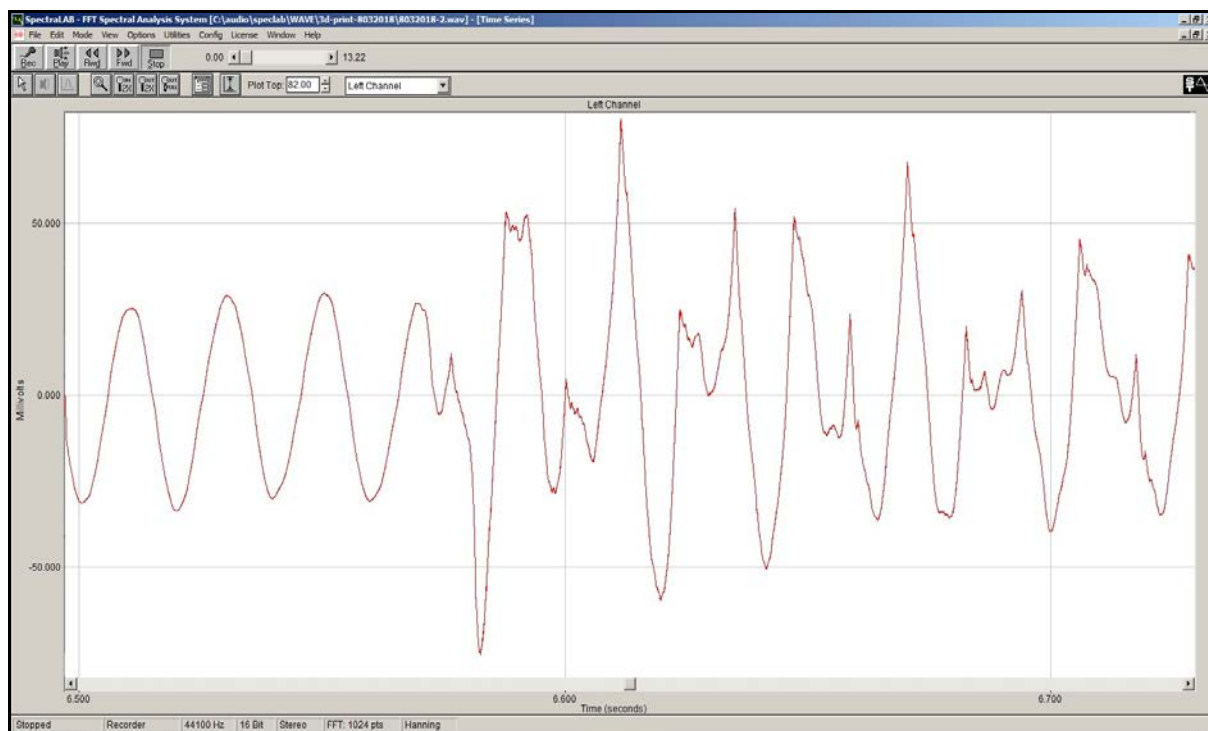
### **3. Результаты исследований**

В работе исследованы электроупругие свойства образцов из пластика ABS. Используются приборы и устройства: ноутбук, к линейному входу звуковой карты которого подключался выход двухканального микрофонного усилителя с

автономным питанием. К входам микрофонного усилителя подключались гибкие экранированные коаксиальные кабели с неизолированными медными электродами. Использована программа для исследования амплитудных и временных параметров аналоговых электрических сигналов Spectralab.

К консольно закрепленному пластиковому образцу на малое расстояние приближали электроды микрофонного усилителя, согласно методике [2]. Механические колебания в образце возбуждали внешним воздействием в виде отклонения от положения равновесия на фиксированную величину. Полученный при деформации образца электрический сигнал усиливался микрофонным усилителем, поступал на линейный вход звуковой карты компьютера, оцифровывается в виде wav-файла. Этот файл может быть воспроизведен или распечатан в виде осциллограммы полностью или фрагментарно, в том числе, с масштабированием.

Интерпретация осциллограммы (рис.3) состоит в отделении полезного сигнала от электромагнитных помех, определении амплитуды, частоты и сдвига фаз.



**Рис 3. Осциллограмма колебаний образца из пластика ABS**



Проводится сопоставление амплитуды механических колебаний соответствующему параметру осциллограммы электрических колебаний. Для минимизации посторонних электромагнитных помех на время проведения опыта необходимым условием является отключение электроснабжения, приборы работают от автономных источников постоянного тока.

Свободные колебания балки возбуждались начальным статическим отклонением ее конца от положения равновесия с последующим внезапным снятием приложенного усилия. Проводя эксперимент, Бивин Ю.К. обнаружил - когда антенны установлены с разных сторон образца, и он, при колебаниях, приближается то к одной, то к другой штыревой антенне, осциллограммы показывают, что антенны фиксируют напряженность поля в противофазе. В такой конфигурации эксперимента определяется частота колебаний консоли по первой собственной форме и ее демпфирование при колебаниях в воздушной среде. Осциллограммы не вполне симметричны относительно нулевой линии. Это в совокупности может свидетельствовать о том, что при изгибе балки со стороны растяжения и сжатия возникают заряды различной полярности. Поэтому осциллограммы имеют форму, напоминающую синусоиду с убыванием амплитуды: антенны фиксируют напряженность поля от всех зарядов, возникающих при колебании консоли. Сам колебательный процесс является затухающим.

В эксперименте на осциллограмме видно наложение двух синусоидальных колебаний. Более высокая частота в точности соответствует колебаниям по второй собственной форме свободных колебаний и, по мнению Бивина Ю.К. [1], здесь колебания по второй собственной форме дают существенный вклад в суммарную напряженность электрического поля. Причиной колебаний не по одной собственной форме является как достаточная гибкость колебательной системы, так и способ их возбуждения, так как форма изгиба консольной балки под действием сосредоточенной силы, приложенной на ее конце, не соответствуют изгибу по первой собственной форме свободных колебаний. А начинаются колебания с реализации потенциальной энергии изгиба именно

сосредоточенной силой, приложенной на свободном конце балки.

## **Выводы**

В работе выполнена идентификация образца полимера, который по внешним признакам соответствует акрилонитрилбутадиенстиролу (ABS), он же сополимер (продукт совместной полимеризации акрилонитрила с бутадиеном и стиролом). В числе его химических свойств можно назвать растворимость в ацетоне (он растворяется и склеивается ацетоном с древесиной). В технике такой пластик применяется для изготовления деталей автомобилей, корпусов бытовой техники и радиоаппаратуры.

В результате эксперимента установлено, что пластик ABS обладает электроупругими свойствами, следовательно, можно вычислять модуль Гука и допустимое механическое напряжение в пластике, конструировать из него силовые детали машин, масштабные модели зданий.

Модели могут быть напечатаны на 3-D принтере по заранее разработанным программам, что существенно повышает точность и снижает время изготовления образцов.

## **Литература**

1. Бивин Ю.К. Исследование электрических полей при динамическом деформировании полимеров // Журнал технической физики, 2010, т. 80, вып. 6. С. 58-63.
2. Юрченко Е.А. Кинематический метод расчёта зданий при поперечных колебаниях и их системный анализ Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. - Ростов-на-Дону, 2013 г.
3. Луцейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров. - М.: Химия, 1988, 160 с.
4. Килимник Л.Ш. Количественная оценка повреждений зданий с антисейсмическим усилением с учетом кинетики деформирования систем несущих конструкций при землетрясениях // Вопросы инженерной сейсмологии, 1995, Вып. 30, с. 137 – 139.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение

1. Теоретические основы исследования

2. Экспериментальная установка

3. Результаты исследований

Выводы