

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЬЕЗОАКТЮАТОРНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.Ю. Шелковников, А.И. Кириллов, К.С. Ермолин, С.Р. Кизнерцев
Институт механики УрО РАН

В работе рассмотрена электромеханическая модель силовой установки информационно-измерительной системы. С применением метода аналогий исследованы особенности применения пьезоактюатора и влияние жесткости клея с тензодатчиком на развиваемое усилие. Даны рекомендации для изготовления силовой установки.

Ключевые слова: жесткость пьезоактюатора, электромеханическая модель, модуль упругости, деформация.

Моделирование различных процессов с помощью математических пакетов является неотъемлемой частью построения реальных электрических схем. В частности, их моделирование в среде Micro-Cap экономит время и ресурсы на отладку. При этом параметры модели можно задавать превышающими реальные значения, что позволяет оценить работу схемы в экстремальных условиях. Необходимо также отметить, что для электрических схем разработаны методы аналогий, позволяющие использовать математический аппарат электрических схем для различных моделей – тепловых, механических и др. [1].

На рисунке 1 приведена структурная схема пьезоактюаторной информационно-

измерительной системы (ИИС) [2]. Для измерения деформаций образца и приложенной силы от пьезоактюатора (ПА) используются приклеенные тензодатчики (ТД), в результате передача деформации от образца к ТД осуществляется через пленку клея. При этом клей и ТД имеют конкретные упругие характеристики, которые, в свою очередь, могут влиять на результат измерения, так как максимальный ход ПА достаточно мал (до 50 мкм) [3]. Поэтому исследование влияния упругих параметров клея и тензодатчика на результат измерения деформации с применением электромеханической модели – является актуальной задачей.

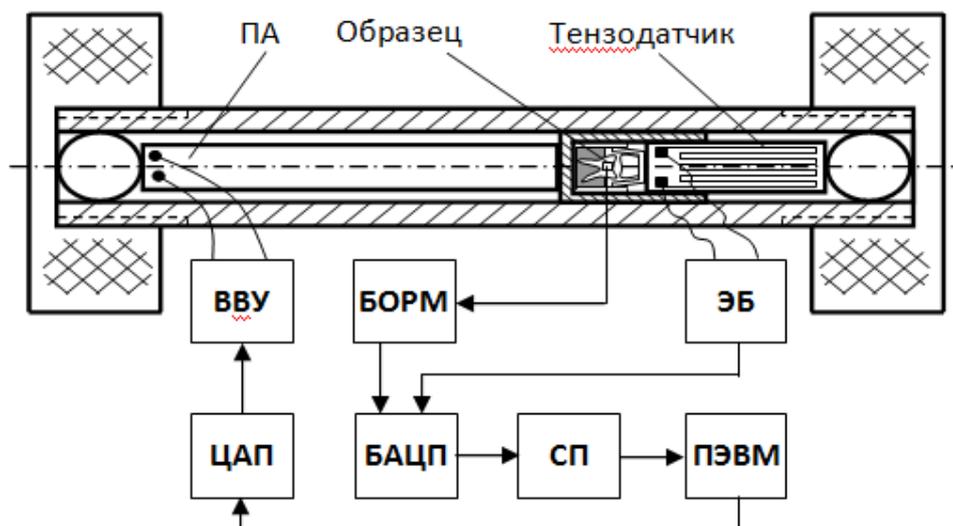


Рисунок 1 – Структурная схема пьезоактюаторной информационно-измерительной системы для изучения композитных материалов (где ЭБ – электронный блок; БОРМ – блок обнаружения начала разрушения пломбы; ВВУ – высоковольтный усилитель; БАП – блок АЦП; СП – сигнальный процессор)

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЬЕЗОАКТЮАТОРНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрим электромеханическую модель силовой части ИИС на основе двух ПА [3-6]. Механическая модель силовой установки ИИС состоит из упругих пружин и источника силы [1,7]. При этом каждая пружина связана со своей массой. Это позволяет ввести в модель инерционность (т.е. сила распространяется в модели не мгновенно). Также возможно ввести в модель трение. Но поскольку максимальный ход ПА достаточно мал, то в данном случае трением можно пренебречь. Таким образом, предполагаем, что в механической модели все элементы идеализированы и обеспечена их соосность.

Согласно [4,5] в замкнутой упругой системе ПА работает как источник силы $p(t)$, значение которого зависит от жесткости силовой установки (конструкции), образца и ПА:

$$p(t) = \Delta F_{ПА} + p_{нач.} = k(t) \cdot K_E \cdot \left[1 - \frac{K_E}{K_E + K_L}\right] + p_{нач.}, \quad (1)$$

где K_E – жесткость ПА; K_L – жесткость образца и установки; $p_{нач.}$ – начальная постоянная нагрузка для выборки люфтов и зазоров установки; $\Delta F_{ПА}$ – сила, развиваемая ПА; $k(t)$ – функция холостого перемещения ПА от приложенного напряжения.

Согласно [6] формулу (1) можно записать в виде:

$$p(t) = k(t) \cdot \frac{B \cdot F_{блок}}{B \cdot F_{блок} \cdot C_L + A \cdot \Delta L_{макс}} + p_{нач.}, \quad (2)$$

где $F_{блок}$ – блокирующая сила ПА; A, B – коэффициенты; $\Delta L_{макс}$ – максимальное удлинение одного ПА; C_L – гибкость образца и установки, которая определяется по формуле (3). Необходимо отметить, что гибкость C – это обратная величина жесткости K .

$$C_L = C_{образца} + C_{установки} = \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_g} + \frac{1}{C_t}} + \sum_{i=3}^5 C_i, \quad (3)$$

где $C_{образца}$ – общая гибкость образца; $C_{установки}$ – общая гибкость установки; C_s – гибкость образца; C_g – гибкость клея; C_t – гибкость ТД; C_3 - C_5 – гибкости элементов установки.

Поскольку ПА является источником силы, то в электрической схеме для удобства в качестве эквивалента используется источник напряжения. В этом случае эквивалентом массы будет индуктивность, а гибкости – емкость [8]. Для построения электрической схе-

мы для механической модели (рисунок 2) необходимо выполнить ряд этапов.

1. Каждый узел механической модели замещается электрическим контуром. Каждой механической величине соответствует электрическая величина (таблица 1). При этом действует правило: аналогом последовательного соединения механических элементов является параллельное соединение электрических элементов и наоборот.

2. Совмещение всех электрических контуров в единую схему. Количество этих контуров равно количеству узлов механической модели.

Таблица 1 – Соотношение электрических и механических величин

Механическая величина	Электрическая величина
Смещение, м	Заряд, Кл
Сила, Н	Напряжение, В
Масса, кг	Индуктивность, Гн
Гибкость, м/Н	Емкость, Ф
Колебательная скорость, м/с	Ток, А

На рисунке 2 приведена электрическая схема механической модели. В качестве источника силы $p(t)$ в электрической схеме использован идеальный источник напряжения E . Необходимо отметить, что общая гибкость двух ПА представлена в виде конденсатора с емкостью C_p . Поскольку гибкости двух ПА одинаковые, то емкость (гибкость) C_p определяется по формуле (4). При этом массы ПА складываются в обоих случаях:

$$C_p = \frac{A \cdot \Delta L_{макс}}{B \cdot F_{блок}}. \quad (4)$$

Эти элементы представлены в виде конденсаторов с емкостью (гибкостью) C_i (рисунок 2). Также необходимо учесть все массы m_i механической модели, которые замещаются катушками индуктивности (m_1, m_2 – массы каждого ПА; m_3 - m_5 – массы элементов установки; m_s – масса образца). Поскольку массы клея и ТД достаточно малы по сравнению с массой образца, то их значениями можно пренебречь.

Третий и четвертый элементы (C_3, C_4, m_3, m_4) обеспечивают соосность с образцом и передачу силы от ПА в реальной модели. Пятый элемент (C_5, m_5) является замыкающим, т.е. механически соединяет конец установки с началом.

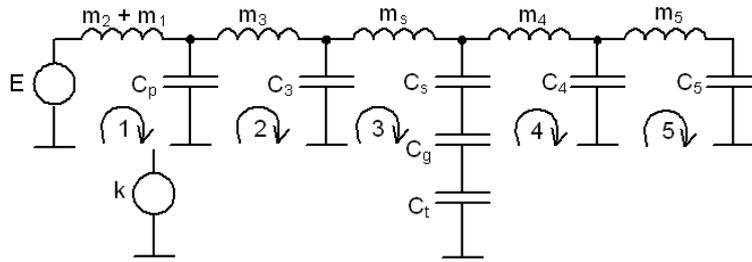


Рисунок 2 – Электрическая схема механической модели

Источник напряжения k является источником сигнала для зависимого источника E по формуле (2). Для последовательного включения ПА коэффициенты A и B равны 2 и 1, а для параллельного включения ПА – 1 и 2, соответственно. В связи с особенностью работы ПА только от положительного электрического напряжения [4], удлинение одного ПА осуществляется от 0 до $\Delta L_{\text{макс}}$, т.е. источник k должен генерировать только положительный сигнал согласно формулы (2). При этом для последовательного включения ПА амплитуда источника k должна быть $2\Delta L_{\text{макс}}$.

Гибкости образца, клея, ТД и установки зависят от свойств материала и размеров, и определяются по формуле (5):

$$C_i = \frac{1}{E_i} \cdot \left[\sum_{j=1}^N \frac{L_j}{S_j} \right]_i, \quad (5)$$

где C_i – гибкость i -ого элемента; E_i – модуль Юнга i -ого элемента; L_j – длина j -ой части i -ого элемента; S_j – площадь поперечного сечения j -ой части i -ого элемента; N – количество частей i -ого элемента.

Необходимо отметить, что сумма максимальных значений зарядов (Кл, смещение) на конденсаторах $C_p, C_3-C_5, C_{\text{образца}}$ (рисунок 2) равна амплитуде источника напряжения k ($A \cdot \Delta L_{\text{макс}}$) (что следует из подстановки в (6) формулы (2) при условии, что $p_{\text{нач}} = 0$):

$$\begin{aligned} q_{\text{общ}} &= q_{\text{макс}}(C_p) + \\ &+ q_{\text{макс}}(C_{\text{обр}}) + \sum_{i=3}^5 q_{\text{макс}}(C_i) = \\ &= \left(C_p + C_{\text{обр}} + \sum_{i=3}^5 C_i \right) \cdot p_{\text{макс}}(t) = \\ &= k_{\text{макс}}(t) = A \cdot \Delta L_{\text{макс}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Так как конденсаторы C_s, C_g, C_t включены последовательно, то их максимальный заряд $q_{\text{макс}}(C_{\text{обр}})$ (смещение) всегда одинаков.

Согласно (6), ПА в модели (рисунок 2) работает как источник смещения на величину $A \cdot \Delta L_{\text{макс}}$. За счет разной жесткости (гибкости) установки, образца и ПА происходит перераспределение этих смещений (зарядов) между всеми пружинами (конденсаторами).

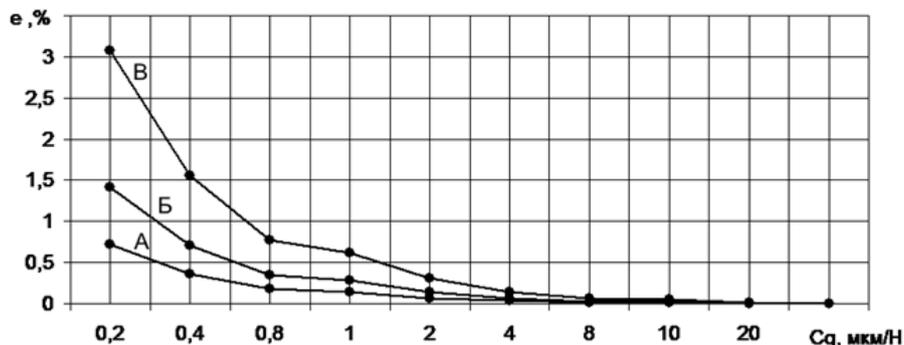


Рисунок 3 – Графики зависимости относительного изменения смещения e на образце от величины гибкости клея C_g для разных гибкостей образца (кривая А – $C_s=1,5$ нм/Н; Б – 3 нм/Н; В – 7 нм/Н)

На практике в качестве клея используют составы, дающие хорошую адгезию и высокую эластичность. Если образец имеет высокую жесткость, а клей – относительно низкую,

то влиянием клея в этом случае можно пренебречь. Но если жесткости образца и клея практически соизмеримы, то необходимо учи-

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЬЕЗОАКТЮАТОРНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

тывать влияние упругости клея. Аналогичные требования предъявляются и к ТД [9].

Оценим влияние гибкости клея C_g на гибкость образца C_s . Для моделирования в среде Micro-Cap схемы с последовательным включением ПА (рисунок 2) установим следующие параметры: $F_{\text{блок}} = 1500$ Н; $\Delta L_{\text{макс}} = 40$ мкм; $A = 2$; $B = 1$; $m_1 + m_2 = 20$ мГн; $m_3 = 40$ мГн; $m_4 = 150$ мГн; $m_5 = 1850$ мГн; $m_s = 2$ мГн; $C_3 = 3$ нм/Н; $C_4 = 12,5$ нм/Н; $C_5 = 4$ нм/Н. На рисунке 3 приведены графики относительного изменения смещения e на образце от величины гибкости клея C_g при разной гибкости образца C_s по формуле (7) (при этом жесткость ТД весьма мала ($C_t \gg C_g, C_s$), а частота источника напряжения k равна 1 Гц):

$$e = \frac{q_{\text{макс}}(C_s) - q_{\text{макс}}(C_{s1})}{q_{\text{макс}}(C_{s1})} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где C_{s1} – гибкость образца при $C_g = 40$ мкм/Н.

Из анализа рисунка 3 следует, что с увеличением гибкости образца C_s от 1,5 нм/Н до 7 нм/Н влияние гибкости клея также увеличивается. Во всех трех случаях с уменьшением гибкости клея C_g увеличивается относительное изменение смещения e , т.е. уменьшается деформация самого образца вследствие влияния упругости клея. Аналогично гибкость ТД будет оказывать влияние на деформацию образца.

Особенностью рассмотренной электро-механической модели (рисунок 2) является ее работа в динамическом режиме по сравнению с трехмерным моделированием напряженно-деформированного состояния [10], что служит источником дополнительной информации. Поскольку модель, в основном, состоит из катушек индуктивностей и конденсаторов, это дает возможность найти резонансную частоту установки в целом и принять меры на практике для предотвращения данного явления.

В целом, можно отметить следующее. Разбиение силового блока ИИС на элементы и учет влияния жесткости ТД с клеем на жесткость образца позволяет повысить точность результатов моделирования. При известных модуле упругости используемого клея и размерах ТД можно найти исходный модуль упругости образца с использованием разработанной электро-механической модели и устройства для прочностных испытаний композитных материалов. Если гибкость образца и установки C_L больше гибкости ПА, то рекомендуется использовать последовательное включение ПА, иначе – параллельное включение ПА. Снижение гибкости образца и ус-

тановки C_L позволяет увеличить амплитуду развиваемого усилия $p(t)$. Для этого рекомендуется использовать элементы установки из металла с высоким модулем упругости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожков М.А. Электроакустика. Учебник для вузов. М., «Связь», 1978. – 272с.
2. Кириллов А.И., Шелковников Е.Ю., Рединова Т.Л. и др. Обеспечение заданного закона изменения силовых нагрузок при прочностных испытаниях пломбировочных материалов // Ползуновский Альманах. – Барнаул: АлтГТУ, 2014, №1 – С. 87-91.
3. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Ефремов С.М. и др. Установка с силовым пьезоэлектрическим преобразователем для исследования прочностных характеристик пломбировочных материалов // Ползуновский вестник – 2013. – №2. – С.96-99.
4. Наймушин Ю.Н., Рединова Т.Л., Кириллов А.И. и др. Устройство для прочностных испытаний пломбировочных материалов и пломб дефектных зубов // Патент РФ на полезную модель №114843 МПК А61С19/04; опубл. 20.04.2012, бюл. №11.
5. Кириллов А.И., Шелковников Е.Ю., Кизнерцев С.Р. Пьезоактюаторная установка информационно-измерительной системы для прочностных испытаний пломбировочных материалов // Материалы НТК «Приборостроение в XXI веке». – Ижевск: ИжГТУ, 2014. – 5с.
6. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Кизнерцев С.Р. Расчет пьезоэлектрического формирователя нагрузки с учетом жесткости его конструкции для исследования композитных материалов // Материалы XVI международной НТК «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: Алт-ГТУ, 2015. – Том 2, С.142-145.
7. Панич А.Е. Пьезоэлектрические актюаторы. Учебное пособие. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. – 153 с.
8. Маркин Д.Н. Теоретические основы электроакустики. Конспект лекций. – Санкт-Петербург, СПбГУКиТ, 2010. – 91 с.
9. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
10. Шелковников Е.Ю., Кириллов А.И., Ефремов С.М. и др. Трехмерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния зуба и пломбы // Ползуновский вестник. – 2014. – №2. – С.54-58.

Шелковников Евгений Юрьевич – д.т.н., зав. лаб. ИМ УРО РАН, тел.: 8(3412)214583 доб. 210, e-mail: evshelk@mail.ru; **Кириллов Андрей Игоревич** – м.н.с. ИМ УРО РАН, e-mail: pattl7@mail.ru; **Ермолин Кирилл Сергеевич** – м.н.с. ИМ УРО РАН, e-mail: ermolin@udm.ru; **Кизнерцев Станислав Рафилович** – к.т.н., с.н.с., e-mail: iit@udman.ru.