

УДК 53.083.2

Расчет требуемого натяга образцов для измерения пьезоэлектрических коэффициентов методом «пьезоэлектрического трансформатора»

Кан Николай Вячеславович

kannv@student.bmstu.ru

Еманов Данила Петрович

emanov2001@yandex.ru

Осипков Алексей Сергеевич

osipkov@bmstu.ru

SPIN-код: 8640-6252

Моисеев Константин Михайлович

k.moiseev@bmstu.ru

SPIN-код: 3060-9880

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен теоретический расчет минимального натяга, требуемого для проведения корректных измерений пьезоэлектрических коэффициентов d_{31} и d_{32} методом трансформатора. Приведены описание метода и формулы, описывающие физические процессы, применяемые в нем, а также выводы основных расчетных формул. Описаны результаты расчета минимального натяга пленки ПВДФ для поддержания натяженного состояния образца и других параметров, таких как механическое напряжение и деформация пленки. На основе полученных теоретических данных сделано сравнение минимального натяга пленки, требуемого для правильной работы стенда измерения d_{31} и d_{32} с точностью позиционирования, обеспечиваемой шаговыми двигателями.

Ключевые слова: поливинилиденфторид, ПВДФ, сегнетоэлектрик, пьезоэлектрический трансформатор, пьезоэлектрический коэффициент, d_{31} , d_{32}

Calculation of the required tension in samples for use in "piezoelectric transformer" method

Kan Nikolay Vyacheslavovich

kannv@student.bmstu.ru

Emanov Danila Petrovich

emanov2001@yandex.ru

Osipkov Alexey Sergeevich

osipkov@bmstu.ru

SPIN-code: 8640-6252

Moiseev Konstantin Mikhailovich

k.moiseev@bmstu.ru

SPIN-code: 3060-9880

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This article discusses the theoretical calculation of the minimum sample tension required to perform correct measurements of the piezoelectric coefficients d_{31} and d_{32} using the "piezoelectric transformer" method. The article provides a description of the "piezoelectric transformer" method and formulas expressing the physical processes used in it, as well as derivations of the main calculation formulas. The calculations of the minimum tension of the PVDF film required to maintain the tensioned state of the sample and other parameters such as mechanical stress and deformation are described. Based on the obtained

theoretical data, a comparison was made between the minimum film tension required for the correct operation of the d_{31} and d_{32} measurement stand using the “piezoelectric transformer” method and the positioning accuracy provided by the stepper motor.

Keywords: polyvinylidene fluoride, PVDF, ferroelectric, piezoelectric transformer, piezoelectric coefficient, d_{31} , d_{32}

Введение. Пьезоэлектрические материалы — это вещества, способные преобразовывать электрическую энергию в механическую и обратно. Они являются ключевыми компонентами в большом количестве приборов, начиная с различных сенсоров, датчиков давления, гидрофонов, и заканчивая генераторами электричества или прецизионными актуаторами.

Однако, в зависимости от геометрии, пьезоэлектрики могут работать в различных режимах, которые характеризуются пьезоэлектрическими константами. Так, для описания связи механического воздействия перпендикулярно оси поляризации 3 применяются коэффициенты d_{31} или d_{32} [1, 2].

Одним из вариантов измерения пьезоэлектрических коэффициентов d_{31} и d_{32} является метод «Пьезоэлектрического трансформатора» [3]. Данная методика основывается на распространении продольных волн по длине образца, закрепленного на концах, для переноса энергии от зоны возбуждения к приемной зоне. Однако, при недостаточном натяжении пленки возможны потери механической энергии продольных волн, что искажает результаты измерения. Данная проблема усложнена присутствием обратного пьезоэлектрического эффекта, вызывающего изменение длины исследуемого образца. Характеристику натяжения целесообразно получить теоретическим методом, так как система описывается небольшим количеством известных уравнений. Таким образом, можно получить универсальную формулу, которую можно применить для различных размеров образцов и параметров системы.

Целью данной работы является теоретическое определение минимально требуемого натяжения пленки ПВДФ для измерения пьезоэлектрических констант d_{31} и d_{32} на измерительном стенде методом «Пьезоэлектрического трансформатора». Для достижения поставленной цели требуется вывести требуемые формулы, провести вычисления, и по результатам проведенного анализа назначить требуемый натяг.

Материалы и методы. Метод «Пьезоэлектрического трансформатора» заключается в применении обратного пьезоэлектрического эффекта для создания внешнего механического воздействия, и определения пьезоэлектрической константы при помощи прямого пьезоэлектрического эффекта. Схема метода «Пьезоэлектрического трансформатора» показана на рисунке, а, где на электрод возбуждения 1 подается переменный электрический ток, под воздействием которого пленка ПВДФ деформируется. Так как она жестко закреплена по всем направлениям кроме длины, то продольные механические колебания распространяются только по длине образца. На другом конце образца, рис. 1, б, при помощи приемного электрода считывается сигнал, генерируемый в результате деформации пленки [4].

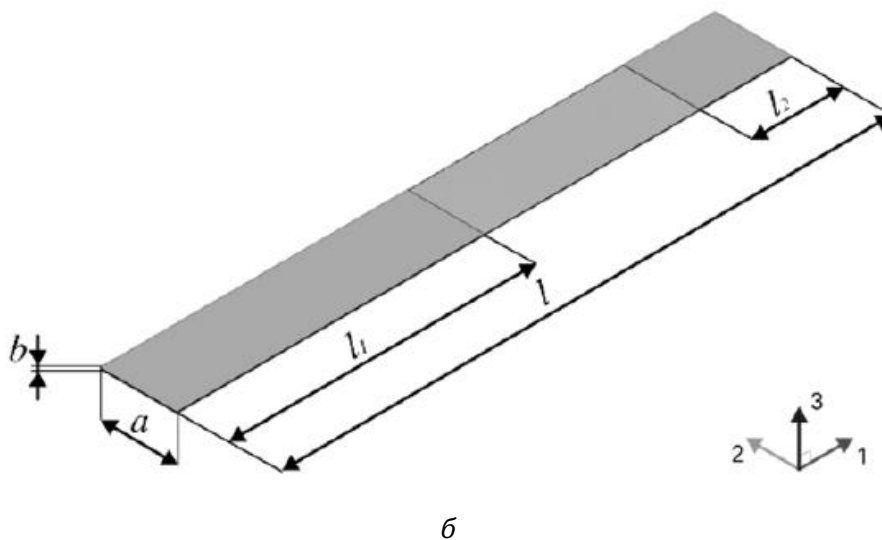
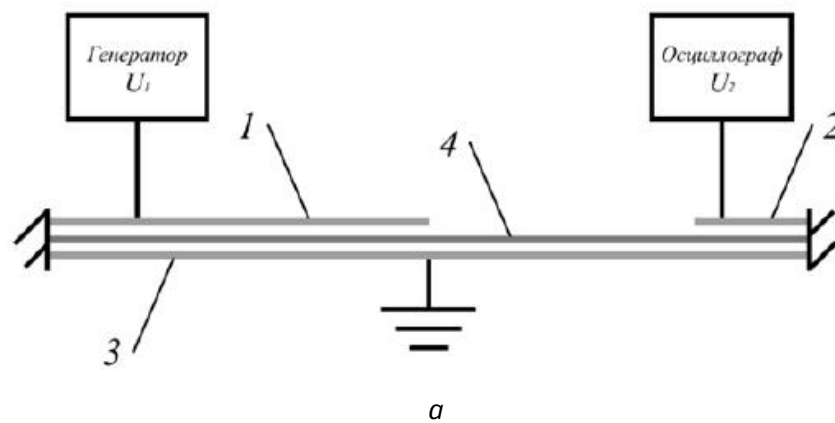


Схема стенда метода «Пьезоэлектрического Трансформатора» (а), схема образцов для измерения на установке (б):

1 — электрод возбуждения, 2 — приемный электрод, 3 — электрод заземления, 4 — пленка ПВДФ, l_1 — длина электрода возбуждения, мм, l_2 — длина приемного электрода, мм, l — длина образца, мм, a — ширина образца, мм, b — толщина образца, мкм

Для расчета системы необходимо использовать формулы обратного и прямого пьезоэлектрического эффекта в случае механического напряжения в направлении вдоль пленки (1), (2) [5].

$$S_1 = s_{11}^E \cdot T_1 + d_{31} \cdot E_{3в}; \quad (1)$$

$$D_{3п} = d_{31} \cdot T_1 + \varepsilon_{33}^T \cdot E_{3п}, \quad (2)$$

где 1 — направление по длине образца, 3 — направление по толщине образца, S_1 — деформация в направлении 1, мм/мм, s_{11}^E — податливость, Па⁻¹, T_1 — механическое напряжение в направлении 1, Па, d_{31} — пьезоэлектрический коэффициент, пКл/Н, $E_{3в}$ — напряжение электрического поля электрода возбуждения, В/м, $D_{3п}$ — диэлектрическое смещение приемного электрода, Кл/м², ε_{33}^T — диэлектрическая проницаемость ПВДФ, Ф/м, $E_{3п}$ — напряжение электрического поля приемного электрода, В/м.

Так как растянутый образец жестко закреплен по длине, то суммарное удлинение должно равняться перемещению опоры электрода возбуждения, управляемой шаговым двигателем с обратной связью $\Delta l_{1\Sigma}$. Суммарное удлинение можно выразить, сложив удлинение, вызванное пьезоэлектрическим эффектом, действующим на электрод возбуждения длиной l_1 и удлинение, описываемое внутренним силовыми фактором T , действующим по всей длине l (3):

$$\Delta l_{1E} + \Delta l_{1T} = \Delta l_{1\Sigma}, \quad (3)$$

где Δl_{1E} и Δl_{1T} — удлинения, связанные с обратным пьезоэлектрическим эффектом и с внутренними силовыми факторами, мм

$$\Delta l = S \cdot l. \quad (4)$$

Формулы, описывающие деформации, связанные с обратным пьезоэлектрическим эффектом (5) и внутренними силовыми факторами (6), приведены ниже:

$$S_{1E} = d_{31} \cdot E_{3B}, \quad (5)$$

$$S_{1T} = s_{11}^E \cdot T_1, \quad (6)$$

где S_{1E} и S_{1T} — деформации, связанные с обратным пьезоэлектрическим эффектом и с внутренними силовыми факторами, мм/мм.

С учетом формул (4), (5) и (6), уравнение (3) можно записать в следующем виде:

$$d_{31} \cdot E_{3B} \cdot l_1 + s_{11}^E \cdot T_1 \cdot l = \Delta l_{1\Sigma}. \quad (7)$$

Для того, чтобы обеспечить постоянное натяжение, внутренний силовой фактор T_1 должен быть больше нуля, что соответствует натяжению пленки. Тогда уравнение (7) преобразовывается в неравенство (8), из которого выражается минимальный натяг $\Delta l_{1\Sigma\min}$ (9).

$$0 \leq s_{11}^E \cdot T_1 \cdot l = \Delta l_{1\Sigma} - d_{31} \cdot E_{3B} \cdot l_1, \quad (8)$$

$$\Delta l_{1\Sigma\min} = d_{31} \cdot E_{3B} \cdot l_1. \quad (9)$$

Также нужно учесть ошибки в значении натяга, связанные с точностью позиционирования на установке $\pm \delta l_{уст}$ (10).

$$\Delta l_{1\Sigma\min} = d_{31} \cdot E_{3B} \cdot l_1 + \delta l_{уст}. \quad (10)$$

В последнюю очередь можно выразить напряженность электрического поля электрода возбуждения E_{3B} через задаваемое генератором входное напряжение на электроде возбуждения U_1 при помощи зависимости данных параметров в конденсаторе через его толщину. Так как точное значение пьезоэлектрического коэффициента d_{31} образца не известно, примем коэффициент запаса по пьезокоэффициенту $k_d = 2$.

$$\Delta l_{1\Sigma\min} = \frac{k_d \cdot d_{31} \cdot U_1 \cdot 0.5l}{b} + \delta l_{уст} = \frac{d_{31} \cdot U_1 \cdot l}{b} + \delta l_{уст}. \quad (11)$$

Для удобства, все размерности в формуле (11) переведены для более легкого подставления единиц.

$$\Delta l_{\Sigma \min} = \frac{d_{31} \cdot U_1 \cdot l}{10^3 \cdot b} + \delta l_{\text{уст}}, \quad (12)$$

где $\Delta l_{\Sigma \min}$ — минимальный требуемый натяг, мкм, d_{31} — пьезоэлектрический коэффициент, пКл/Н, U_1 — напряжение электрического поля, В, l — длина образца, мм, b — толщина образца, мкм, $\delta l_{\text{уст}}$ — погрешность позиционирования, мкм.

Результаты. Примеры расчетов приведены на основе проектируемого лабораторного стенда, в котором перемещение опор осуществляется с помощью шагового двигателя. Использованные исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры стенда метода «Пьезоэлектрического трансформатора»

Величина	Входное напряжение	Пьезокоэффициент	Длина образца	Толщина образца	Погрешность шагового двигателя
Обозначение	U_1	d_{31}	l	b	$\delta l_{\text{уст}}$
Размерность	В	пКл/Н	мм	мкм	мкм
Значения	5...20	28	40...80	28	1

С учетом возможности работы с разными напряжениями и длинами образцов, рассчитаем требуемый натяг для комбинаций входных параметров при помощи выведенной формулы (13). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Требуемый натяг для различных входных напряжений и длин образцов, мкм

Длина образца l , мм	5 В	10 В	15 В	20 В
40	1,2	1,4	1,6	1,8
60	1,3	1,6	1,9	2,2
80	1,4	1,8	2,2	2,6

Обсуждение. Из табл. 2 видно, что все значения натяга пренебрежимо малы по сравнению с минимальным шагом шагового двигателя в 20 мкм. Следовательно, для любого режима работы одного шага будет достаточно для достижения требуемого натяга. Однако, данные вычисления предполагают, что образцы были установлены без ошибок. Можно предположить, что человек не способен предоставить требуемую точность установки образца, в результате чего ошибка установки образца будет значительно больше рассчитанных натягов.

Для большинства пьезоэлектриков, коэффициенты d_{31} и d_{32} имеют схожие значения, однако для ПВДФ данные коэффициенты различаются на порядок. Данный феномен объясняется анизотропной структурой ПВДФ после ориентационной вытяжки в направлении 1. Так как d_{32} на порядок меньше d_{31} , то и деформации, вызванные одинаковым электрическим полем, будут на порядок меньше. Следовательно, проводить дополнительные расчеты не требуется, так как натяжение, требуемое для определения коэффициента d_{31} , достаточно для определения коэффициента d_{32} .

Заключение. По итогам работы проведен анализ физических процессов, происходящих в пленке поливинилиденфторда при измерении пьезоэлектрического коэффициента d_{31} и d_{32} методом «Пьезоэлектрического трансформатора». В результате расчета требуемого натяга получено, что для достижения нужной величины, равной 2,6 мкм, достаточен 1 шаг шагового двигателя с делением в $1,8^\circ$, равный 20 мкм. Так как установка образца производится вручную, человеческая ошибка при закреплении образца будет значительно больше рассчитанного натяга, и требуемый натяг будет зависеть в большей степени от него. В будущем планируется совершенствование конструкции установки для минимизирования выявленных значимых отклонений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2025-0004).

Список источников

- [1] Takashima K., Horie S., Takenaka M., Mukai T., Ishida K., Ueda Y. Measurement of the Piezoelectric Properties of Vinylidene Fluoride Oligomer Using Pneumatic Pressure for Tactile Sensors. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2012, vol. 6. <https://doi.org/10.1299/jmmp.6.975>
- [2] Huang Y., Rui G., Allahyarov E., Li R., Fukuto M., Zhong G.-J., Xu J., Li Z., Zhu L. *Enhanced Piezoelectricity from Highly Polarizable Oriented Amorphous Fractions in Biaxially Oriented Poly(vinylidene fluoride) with Pure β Crystals*. 2020. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-40978/v1>
- [3] Rezvani B., Linvill J.G. Measurement of piezoelectric parameters versus bias field strength in polyvinylidenefluoride (PVF2). *Applied Physics Letters*, 1979, vol. 34.12, pp. 828–830.
- [4] Журина А.Е., Емельянов Н.С., Печерская Е.А., Фимин А.В. Метод «резонанс – антирезонанс» для определения электрофизических параметров пьезоэлектриков. *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2022. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2022-3-9>
- [5] Nabil C., Habiba E., Abdelwahed H., Adil E., Mmounir M., Yahia B. Theoretical modeling of piezoelectric energy harvesting in the system using technical textile as a support. *Polymers for Advanced Technologies*, 2017, vol. 28. <https://doi.org/10.1002/pat.4010>