

УДК 681.586.773

Разработка макета датчика контроля вибрации на основе сегнетоэлектрической пленки ПВДФ

Кан Николай Вячеславович^()*nikolaykanbe@gmail.com
SPIN-код: 9045-2747*Рахматуллин Амир Романович*

rakhmatullinas@student.bmstu.ru

Семенihin Даниил Артурович

dankir58@gmail.com

*Зиннатуллин Артур Расимович*zinnatullin@bmstu.ru
SPIN-код: 5142-5968*Баранова Маргарита Андреевна*

baranovama@bmstu.ru

*Моисеев Константин Михайлович*k.moiseev@bmstu.ru
SPIN-код: 3060-9880

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена разработка и исследование макета датчика контроля вибраций на основе отечественно-произведенной сегнетоэлектрической пленки поливинилиденфторида (ПВДФ). Обоснована актуальность применения ПВДФ для измерения вибраций конструкций, для которых применение традиционных пьезокерамических датчиков приводит к искажению динамических характеристик. Описаны конструкция датчика, принцип его работы и технология изготовления, включая поляризацию пленки с использованием плазмы тлеющего разряда. Приведены результаты измерения АЧХ изготовленного датчика. Показано, что датчик обладает высокой равномерностью отклика в диапазоне частот от 250 до 6500 Гц с неравномерностью менее 3 дБ от среднего значения. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения датчиков на основе ПВДФ для задач вибрационного контроля, в том числе при диагностике легких и гибких конструкций.

Ключевые слова: поливинилиденфторид, ПВДФ, пьезоэлектрический эффект, датчик вибраций, вибрации, мониторинг вибрации

Development of a vibration control sensor prototype based on ferroelectric PVDF film

Kan Nikolay Vyacheslavovich^()*nikolaykanbe@gmail.com
SPIN-code: 9045-2747*Rakhmatullin Amir Romanovich*

rakhmatullinas@student.bmstu.ru

Semenihin Daniil Arturovich

dankir58@gmail.com

*Zinnatullin Artur Rasimovich*zinnatullin@bmstu.ru
SPIN-code: 5142-5968*Baranova Margarita Andreevna*

osipkov@bmstu.ru

*Moiseev Konstantin Mikhailovich*k.moiseev@bmstu.ru
SPIN-code: 3060-9880

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This paper presents the development and investigation of a vibration sensor prototype based on locally produced ferroelectric polyvinylidene fluoride (PVDF). The rele-

vance of using PVDF for vibration measurement of lightweight and flexible structures is substantiated, as conventional piezoceramic sensors might distort the dynamic characteristics of such objects. The sensor design, operating principles, and fabrication technology are described, including PVDF film poling using glow discharge plasma. Experimental results are presented in terms of the frequency response function of the produced sample. It is shown that the sensor demonstrates high response uniformity in the frequency range from 250 to 6500 Hz, with a deviation of 3 dB. The obtained results indicate the potential applicability of PVDF-based sensors for vibration monitoring tasks, particularly for lightweight and flexible structures.

Keywords: polyvinylidene fluoride, PVDF, piezoelectric effect, vibration sensor, vibrations, vibration monitoring

Введение. В задачах вибрационного контроля и диагностики технических систем наибольшее распространение получили датчики на основе пьезоэлектрической керамики. Благодаря высокой чувствительности, широкому рабочему частотному диапазону и возможности непосредственного преобразования механических колебаний в электрический сигнал такие датчики занимают доминирующее положение в системах мониторинга вибраций [1–3].

Однако применение пьезокерамических датчиков, как правило выполненных в виде жестких корпусных конструкций, связано с рядом существенных ограничений. Значительная масса и высокая жесткость таких датчиков приводят к возникновению эффекта дополнительной массовой нагрузки при их установке на объект. В случае легких и гибких конструкций (тонкостенные балки, пластины, оболочки, а также элементы типа струн) это вызывает искажение динамических характеристик, включая смещение собственных частот, изменение форм колебаний и амплитуд вибрации. Кроме того, пьезокерамические материалы характеризуются высоким модулем упругости (порядка 60 ГПа), нелинейностью характеристик в области высоких частот [4] и высоким акустическим импедансом ($31,5 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^3$) [5], а также хрупкостью, что ограничивает их применение в условиях динамических и ударных нагрузок.

В качестве альтернативного подхода могут использоваться тензорезистивные датчики, выполненные в виде тонкопленочных чувствительных элементов. Их малые масса и толщина обеспечивают минимальное влияние на динамику исследуемой конструкции, что делает их удобными для измерений на гибких и маломассивных объектах. Однако тензодатчики регистрируют преимущественно локальные деформации и обладают более низкой чувствительностью и ограниченным частотным диапазоном по сравнению с пьезоэлектрическими датчиками [6, 7], что снижает их эффективность при измерении вибраций.

В связи с этим актуальной является разработка датчиков, сочетающих высокую чувствительность пьезоэлектрических преобразователей с минимальным влиянием на объект измерения, характерным для тонкопленочных структур.

Перспективным направлением решения данной задачи является использование пьезоэлектрических полимеров, в частности поливинилиденфторида (ПВДФ) — сегнетоэлектрического материала, приобретающего пьезоэлектрические свойства после поляризации [8]. В отличие от пьезокерамики, ПВДФ обладает низким модулем упругости, малым акустическим импедансом, высокой гибкостью, малой толщиной и устойчивостью к ударным нагрузкам, что обеспечивает эффективное согласование с исследуемыми объектами и минимизацию искажений их динамических характеристик. Кроме того, ПВДФ обеспечивает линейную амплитудно-частотную характеристику в широком диапазоне частот и допускает изготовление чувствительных элементов сложной формы [9, 10].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных применению ПВДФ, большинство существующих работ ориентировано на области носимой электроники и энергетических устройств. В то же время применение ПВДФ в вибрационных датчиках для задач машиностроения и промышленной диагностики остается недостаточно изученным, что ограничивает оценку их потенциала и области практического применения. Таким образом, разработка вибрационных датчиков на основе ПВДФ, обеспечивающих высокую чувствительность при минимальном влиянии на динамику объекта, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

В данной работе рассматривается разработка макета вибрационного датчика на основе пленки ПВДФ, поляризованной с использованием плазмы тлеющего разряда, а также исследование его характеристик применительно к задачам вибрационного контроля легких и гибких конструкций.

Материалы и методы. Датчики вибрации на основе ПВДФ представляют из себя много слойную структуру состоящую из чувствительного элемента (рис. 1) и защитных слоев из ПЭТФ. Сам чувствительный элемент состоит из пленки ПВДФ толщиной 28 мкм и двух электродов из пасты с топологией, приведенной.

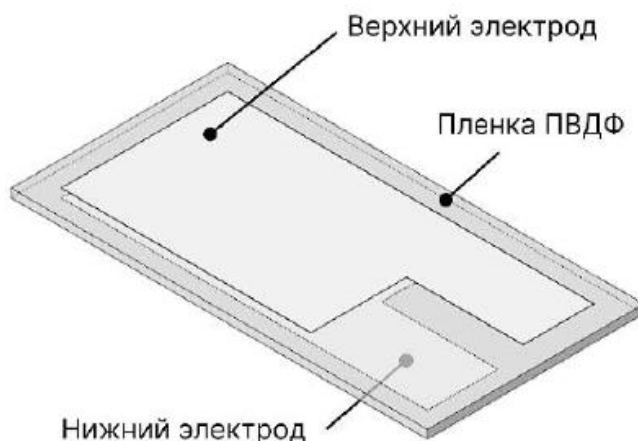


Рис. 1. 3D-модель чувствительного элемента датчика

Несмотря на простоту конструкции датчика, его отклик данных датчиков сильно зависит от процесса обработки ПВДФ, представленного на рис. 2. Основными операциями определяющими чувствительность датчика являются ориентационная униаксиальная вытяжка пленки, увеличивающая количество пьезоэлектрически-активной β -фазы ПВДФ, и поляризация, ориентирующая цепочки β -фазы вдоль одной оси.

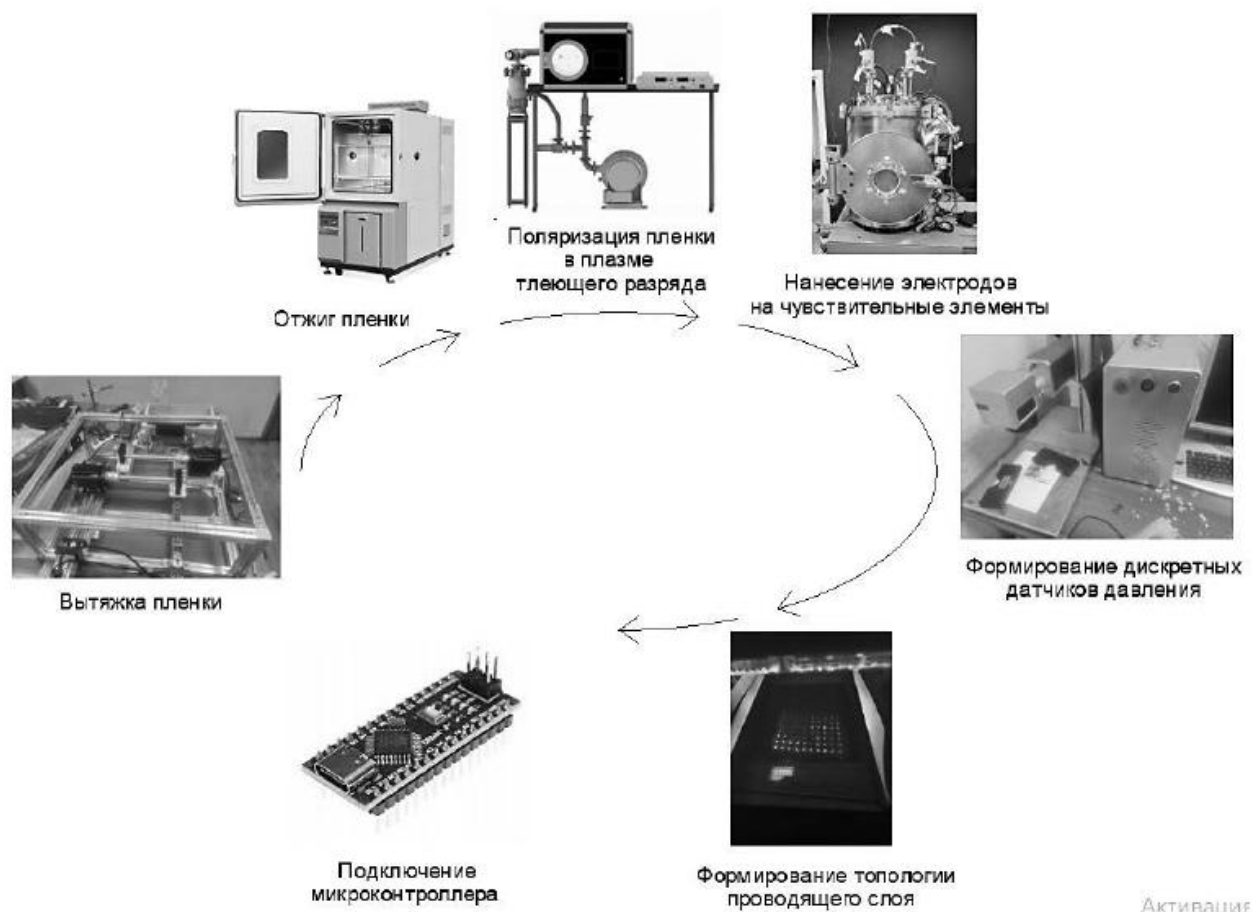


Рис. 2. Технологический процесс изготовления датчика вибраций

В исходном состоянии ПВДФ, как правило, находится в неполярной α -фазе, которая не обладает пьезоэлектрическими свойствами. Для перевода материала в активное состояние необходима структурная модификация. Первым этапом является механическое растяжение (вытяжка) пленки, которое приводит к переориентации полимерных цепей и фазовому переходу из неполярной α -фазы в полярную β -фазу, необходимую для проявления пьезоэлектрического эффекта. Механическая вытяжка проводится на лабораторном стенде, позволяющем вытягивать пленки шириной до 200 мм. Данный стенд реализует кинематическую модель растяжения полимерных пленок, при которой деформация задается разностью скоростей между валами или другими транспортными элементами. В этом случае напряжение в материале возникает как следствие вынужденного удлинения, определяе-

мого жестко заданной кинематикой линии, обеспечивая высокую устойчивость процесса на всех стадиях вытяжки и предотвращая локализацию деформации и формирование шейки, характерные для силового растяжения. После механической вытяжки проводится термический отжиг, способствующий снятию внутренних напряжений, увеличению степени кристалличности материала.

Поляризация пленки ПВДФ в плазме тлеющего разряда проводится на экспериментальном стенде плазменной поляризации, сконструированном на базе утановки MPC One. Предварительно, камера откачивается до рабочего давления 1,6 Па, после чего через высоковольтный вакуумный токоввод на верхний электрод (катод) подается потенциал 12 кВ отрицательной полярности постоянного тока, и иницируется тлеющий разряд. Генерируемые в плазме тлеющего разряда отрицательные ионы кислорода и электроны взаимодействуют с поверхностью пленки ПВДФ, образуя виртуальный электрод, порождающий сильное электрическое поле напряженностью более 400 МВ/м, вдоль линии напряженности которого ориентируются диполи. Образец 30×10 мм размещается на нижнем электроде (аноде) и поляризуется при напряжении разряда 12 кВ, плотности тока 0,1 А/м² и времени обработки 3 минуты [11].

Нанесение электродов на ПВДФ-подложку осуществлялось методом шаблонной (шелкотрафаретной) печати, обеспечивающим формирование проводящих слоев заданной топологии. Перед печатью поверхность подложки очищалась 70%-ным раствором изопропилового спирта в деионизированной воде. Далее по фотошаблону изготавливали печатную форму на основе полиэфирной сетки с фотоэмульсией. Проводящий слой формировали путем продавливания пасты на полимерной основе с серебряным наполнителем через открытые участки формы. После нанесения электродов на лицевую сторону проводилась сушка при 60 °С в течение 30 минут, затем аналогичным образом формировался слой на оборотной стороне. Такой процесс обеспечивает получение стабильных и проводящих электродов с требуемой геометрией.

Эксперимент проведен с использованием макета датчика вибрации из поляризованной пленки габаритами 30×10 мм, с серебряными электродами, сформированными методом шелкографии (рис. 3, а). Измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) проведено при помощи осциллографа UNIT UPO1102CS и вибродинамика (рис. 4, б). Макет закреплен одним концом к подвижному элементу вибродинамика, на который подается синусоидальный сигнал частотой от 100 до 22000 Гц. В результате вибрационного воздействия происходит изгиб датчика, который конвертируется в сигнал напряжения между верхним и нижним электродами чувствительного элемента. Данный сигнал имеет частоту равную частоте вибраций и амплитуду пропорциональную виброускорению.

Результаты. На рис. 4 представлена полученная АЧХ макета датчика вибрации. Видно, что средний отклик образца в исследуемом диапазоне частот составляет 300 мВ, максимальный отклик составляет более 800 мВ.

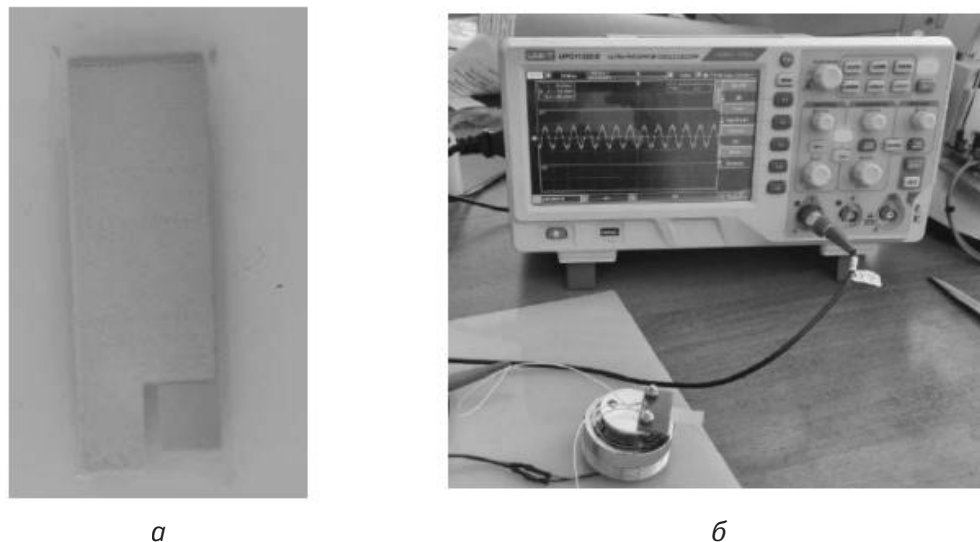


Рис. 3. Изготовленный макет датчика вибрации (а) и измерительный стенд (б)

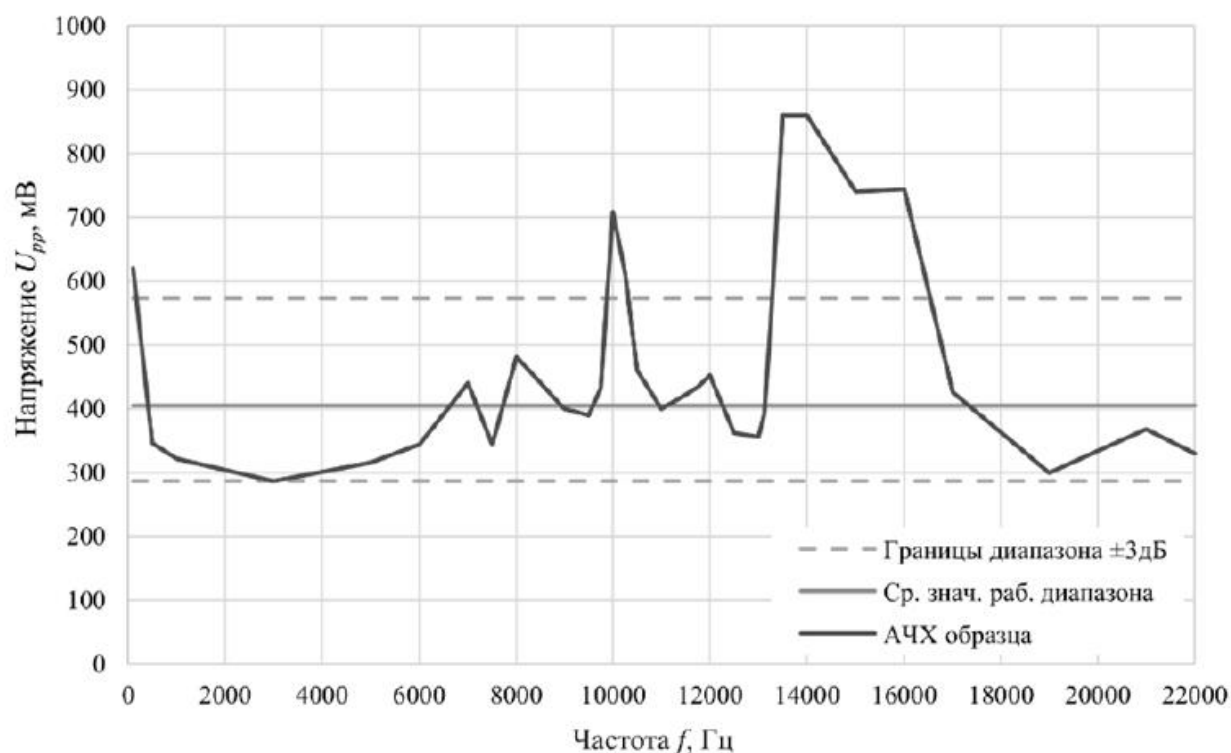


Рис. 4. АЧХ макета датчика вибрации на основе пленки ПВДФ

Обсуждение. По виду АЧХ датчика видны резонансные пики отклика на низких частотах вне диапазона измерения, на частоте 10 кГц и на частоте 14 кГц. Данные резонансные частоты определяют рабочий диапазон датчика, так как нас интересует участок с наименьшим отклонением.

Между первым и вторым резонансами наблюдается зона с выюкой однородностью с частотами от 250 до 6500 Гц. Данному диапазону соответствуют отклики в диапазоне от 287 до 574 мВ, с отклонением менее 3 дБ от среднего

значения в 405 мВ. Данный регион частот соответствует диапазону собственным резонансным частотам механизмов и конструкций, который является одним из наиболее важных для мониторинга, так как есть шанс возникновения разрушающих колебаний.

Заключение. В результате работы предложен и реализован макет вибрационного датчика на основе пленки ПВДФ, ориентированный на применение в задачах контроля вибраций легких и гибких конструкций, для которых использование традиционных пьезокерамических датчиков приводит к искажению динамических характеристик объекта за счет эффекта дополнительной массы. Обоснована возможность применения ПВДФ в качестве чувствительного элемента вибрационного датчика, обеспечивающего сочетание высокой чувствительности пьезоэлектрических преобразователей с минимальным влиянием на объект измерения, характерным для тонкопленочных датчиков. Получены экспериментальные данные о характеристиках разработанного датчика (чувствительность, частотный диапазон, форма выходного сигнала) в условиях, приближенных к задачам вибрационного контроля, в диапазоне от 250 Гц до 6500 Гц, с средним откликом 405 мВ, и отклонением менее 3 дБ.

В сочетании с малыми геометрическими размерами, гибкостью, стойкостью к ударным нагрузкам и низкой себестоимостью полученные результаты позволяют говорить о перспективности разработки и применения таких датчиков для измерения вибрации в машиностроении.

Так, например, потенциальной областью применения таких датчиков является металлообрабатывающая отрасль. Маленькие размеры датчика позволяют использовать его для контроля динамических нагрузок и износа режущего инструмента по средством закрепления датчика на самом резце. По линейности АЧХ датчика можно контролировать режим резания при ультразвуковой обработке материалов. А стойкость к механическим нагрузкам позволяет размещать датчик на высоконагруженных элементах металлообрабатывающих станков для контроля вибрационной картины и определения поломок.

Дальнейшие исследования будут направлены на создание полноценного датчика вибрации, повышение его чувствительности и расширение частотного диапазона.

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

Список источников

- [1] Popovics S. A review of the concrete consolidation by vibration. *Matériaux et Constructions*, 1973, vol. 6, pp. 453–463. <https://doi.org/10.1007/BF02473784>
- [2] Peng L., Jiang H., Chen X. et al. A review on the advanced design techniques and methods of vibrating screen for coal preparation. *Powder Technology*, 2019, vol. 347, pp. 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.047>
- [3] Mohd Ghazali M.H., Rahiman W. Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. *Shock and Vibration*, 2021, art. no. 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>

- [4] Werner J.M., Engelmann M., Schmidt M. et al. Comparison of Structural Integrated Piezoceramics, Piezoelectric Patches and Strain Gauges for Condition Monitoring. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 22, art. no. 8847. <https://doi.org/10.3390/s22228847>
- [5] Kocherla A., Duddi M., Subramaniam K.V.L. Smart Embedded PZT sensor for in-situ Elastic Property and Vibration Measurements in Concrete. *Measurement*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108629>
- [6] Sirohi J., Chopra I. Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, vol. 11, no. 4, pp. 246–257. <https://doi.org/10.1106/8BFB-GC8P-XQ47-YCQ0>
- [7] Ágoston K. Vibration Detection of the Electrical Motors using Strain Gauges. *Procedia Technology*, 2016, vol. 22, pp. 767–772. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.037>
- [8] Xin Y., Sun H., Tian H. et al. The use of polyvinylidene fluoride (PVDF) films as sensors for vibration measurement: A brief review. *Ferroelectrics*, 2016, vol. 502, no. 1, pp. 28–42. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1232582>
- [9] Basov B.A., Makarova K.T., Moiseev K.M., Osipkov A.S. Investigation of The Plasma Polarization Parameters Effect on The Polyvinylidene Fluoride Film Piezoelectric Properties Used for Flexible Nanogenerators. 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, 2025, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10970901>
- [10] Rathod V.T., Mahapatra D.R., Jain A., Gayathri A. Characterization of a large-area PVDF thin film for electro-mechanical and ultrasonic sensing applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, vol. 163, no. 1, pp. 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.08.017>
- [11] Басов Б.А., Макарова К.Т., Моисеев К.М., Осипков А.С. Исследование свойств поливинилиденфторидной пленки, поляризованной в плазме тлеющего разряда. *Пластические массы*, 2024, № 6, с. 13–15. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-06-13-15>