

УДК 621.3.082.73

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-93-101

## Разработка методики автоматизированного выбора пьезоэлементов

*Ф. М. Аль-Руфай*, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности  
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

*Б. А. Якимович*, доктор технических наук, профессор, Институт ядерной энергии и промышленности  
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

*В. В. Кувшинов*, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности  
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

*Пьезоэлементы являются одним из наиболее популярных в использовании электронных компонентов, которые применяются в составе многих электронных устройств. Эти устройства весьма эффективно используются в медицине, образовании, строительстве, нефтегазовой отрасли, военной технике, метрологии и многих других. Они входят в состав приборов, обеспечивающих диагностику различных органов человека, замер расхода перекачиваемых жидкостей и газов, утилизирующих механическую энергию человека и транспортных средств с целью последующего ее преобразования в электрическую энергию.*

*В настоящее время на российском рынке производители пьезоэлементов представляют большое количество разнообразных моделей, способных удовлетворить любые запросы заказчиков.*

*Ориентация разработчиков электронных устройств, в составе которых используются пьезоэлементы, достаточно затруднена в подобных условиях. Кроме того, большие трудности возникают при подборе пьезоэлементов в настоящее время, когда многие модели стали не доступны для закупа внутри страны.*

*Выполнить оценку нескольких моделей пьезоэлементов в кратчайшие сроки с учетом анализа большого количества данных весьма затруднительно и требует больших ресурсов времени, а также привлечения для анализа большого коллектива профильных специалистов.*

*Для оптимизации выбора наиболее приемлемой модели, экономии времени и человеческих ресурсов реализована система автоматизированного управления выбором пьезоэлементов. Предлагаемая система учитывает набор наиболее значимых свойств пьезоэлементов, а также возможность их закупа (доступность) на внутреннем рынке, что значительно снижает временные затраты компаний по подбору необходимых устройств. Система является одним из элементов разработанной методики выбора пьезоэлементов.*

**Ключевые слова:** пьезоактюатор, алгоритм, пьезоэлемент, емкость, статус доступности, автоматизация.

### Введение

В последние десятилетия беспроводные технологии и микроэлектроника привели к развитию носимых устройств, таких как предметы одежды и аксессуары, в которых питание подается либо от батарей, либо от устройств сбора энергии [1, 2]. В сочетании с этими подходами существует концепция интернета вещей, где широко используются сети беспроводных датчиков. Несмотря на прогресс, достигнутый в технологии маломощных интегральных схем, необходимо повысить удельную энергию химических батарей, поскольку трудно удовлетворить требования к мощности для практических приложений [3, 4]. Следовательно, необходимо разрабатывать новые методы сбора энергии, чтобы поддерживать такие автономные системы [5].

Пьезоэлектрические источники могут производить мощность от микроватт до милливатт в зависимости от условий окружающей среды. Многие исследователи сконцентрировались на сборе энергии на микроуровне, чтобы обеспе-

чить питанием микроустройства в отдаленных районах. Концепция приводит к резкому снижению стоимости. Как только система будет создана, она сможет вырабатывать электроэнергию с минимальными затратами или усилиями, как из возобновляемых источников [6]. В этой статье рассматриваются ключевые области пьезоэлектрической системы сбора энергии. Из проведенного обзора становится понятно, что существующие технологии более или менее могут обеспечить сбор энергии за счет использования пьезоэлектрических элементов, однако согласованность и стабильность систем еще не на должном уровне [7–9].

Целью исследования разработанной методики является автоматизация выбора пьезоэлементов на основе выделенного набора свойств, необходимого для выполнения поставленной задачи, которую должен решить пьезоэлемент в заданных условиях эксплуатации.

Выделение набора свойств производится исходя из тех условий, в которых будет эксплуа-

тироваться пьезоэлемент, а также прибор, в состав которого входит это устройство.

Научная новизна работы заключается в разработке специализированной методики по выбору пьезоэлементов с заданными свойствами. Методика учитывает многообразие рынка пьезоэлементов и их основные особенности.

### Методы и материалы

Разработанная методика подбора пьезоэлементов предусматривает выделение какого-либо наиболее важного параметра, который необходим для функционирования пьезоэлемента в составе проектируемого электронного устройства. В приведенном ниже примере за такой параметр принята емкость пьезоэлемента.

В описанном примере используется метод линейного программирования (симплекс-метод) и экспертный метод оценки данных.

При выборе пьезоактюатора и выполнении условия максимальной емкости необходимо руководствоваться следующими основными принципами [10–12]:

- 1) оценить параметры, которые позволяют увеличить емкость пьезоэлемента;
- 2) выявить влияние этих параметров на работу прибора, устройства, в которых будет установлен пьезоактюатор;
- 3) произвести оптимизацию параметров пьезоактюатора, исходя из начальных условий.

При выборе устройства необходимо учитывать требуемую емкость, от которой, как было указано выше, зависит быстродействие системы, а также геометрические параметры пьезоактюатора.

В некоторых механических либо электронных устройствах, в которых производится использование пьезоактюаторов, возможны ограничения по размерам их сечения либо длине. Данные ограничения могут быть наложены за счет компактности устройства, необходимости обеспечения его небольших размеров, стесненных условий эксплуатации пьезоактюатора [13].

Кроме того, следует учитывать, что за величину емкости отвечает такой параметр, как диэлектрическая проницаемость материала, который мо-

жет иметь значительные пределы изменения. Этот параметр имеет прямую зависимость от свойств пьезокерамики, ее кристаллической структуры и метода получения пьезоэлемента [14].

При наложении условий и ограничений на размеры пьезоактюаторов необходимо до начала исследований определить наиболее оптимальную форму устройства [15].

В зависимости от этой формы производится:

- оптимизация параметров (длина, ширина, диаметр) устройства;
- выбор расчетной зависимости для определения емкости устройства.

После выбора оптимальных параметров пьезоактюатора осуществляется подбор материала пьезоактюатора для обеспечения максимально возможной либо заданной величины статической емкости [16, 17].

Выбор пьезоэлементов «вручную» предполагает исследование и анализ большого количества информации, содержащейся в различных каталогах заводов-изготовителей. Необходимо проводить поиск этих каталогов на электронных ресурсах, а затем выполнять анализ для большого количества моделей, при этом рассматривая значения всех технических характеристик пьезоэлементов. При занятости одного специалиста время поиска необходимого устройства составит порядка 2...3 дней. Следует учитывать, что выбор пьезоэлемента должен сопровождаться контактами с представителями поставщиков этого оборудования с целью уточнения фактического наличия устройства на рынке и возможности его поставки.

Предлагаемый новый метод выбора пьезоактюаторов основан, прежде всего, на заранее сформированной базе данных, в которой уже учтены все свойства устройств и такой параметр, как статус доступности, показывающий их наличие на российском рынке.

Подбор материала пьезоактюатора осуществляется на основании анализа матрицы свойств материалов. В данной работе матрица D составлена на основании данных таблицы.

### Исходные данные для составления матрицы свойств

#### Initial data for compiling a matrix of properties

Наименование образца (марки пьезокерамики)	Обозначение образца	$\epsilon_{33}$	Статус доступности
Pb(Zr <sub>0,52</sub> Ti <sub>0,48</sub> )O <sub>3</sub> (нк)	A <sub>1</sub>	1100	1
Pb(Zr <sub>0,52</sub> Ti <sub>0,48</sub> )O <sub>3</sub> (тм)	A <sub>2</sub>	760	1
Pb(Zr <sub>0,52</sub> Ti <sub>0,48</sub> )O <sub>3</sub> +0,7% мол. MnO <sub>2</sub> (нк)	A <sub>3</sub>	1250	0
ЦТССТ3 (тм)	A <sub>4</sub>	1400	1
ЦТС-19Б	A <sub>5</sub>	1770-1983	0
ЦТРС-19 (цт)	A <sub>6</sub>	2200	1

Окончание таблицы

Наименование образца (марки пьезокерамики)	Обозначение образца	$\epsilon_{33}$	Статус доступности
ТНВ-1	A <sub>7</sub>	80	0
ТНВ-1/10	A <sub>8</sub>	129	0
НЦТС-2	A <sub>9</sub>	5700	0
ТНаВ-1	A <sub>10</sub>	140	1

В последнем столбце добавлена такая характеристика материала пьезоэлемента, как статус доступности. Эта величина показывает возможность закупа материала на российском рынке. Цифра 0 обозначает доступность материала, цифра 1 указывает на недоступность его как на российском рынке, так и для закупа за рубежом.

Исследования образцов, для которых статус доступности равен 1, необходимы, так как в некоторых случаях возможно использование только этого образца, поскольку отечественных аналогов может и не быть. В таком случае требуется специальная проработка вопроса с целью обеспечения закупа устройства, которого нет на российском рынке [11, 12].

Получаемая матрица D состоит из двух основных столбцов. В первом столбце представлены значения величины диэлектрической проницаемости материала, во втором столбце его доступность для использования. Массив D представляет собой набор данных только из одного столбца.

Результатом работы предлагаемой методики является выбор наиболее оптимального материала (либо марки) пьезоэлемента, который удовлетворяет заданным условиям технологического процесса [18, 19].

Ниже приведен пример подбора параметров пьезоактюатора:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 = \frac{\epsilon_T^{33} (a - 2a) \cdot (b - 2b)}{11,3 \cdot h} \cdot N \geq 0,053 \text{ пФ}, \\ a \cdot b \leq 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \\ h \leq 0,1 \text{ м}, \\ \epsilon_T^{33} \in D, \\ a > 0; b > 0; h > 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Решение производится одним из методов линейного программирования. При этом принимается условие, что величина  $\epsilon_T^{33} = m$ . Затем, после определения оптимальных значений  $a, b, h$ , производится повторное определение [20]:

$$C_0 = f(m) \rightarrow \max. \quad (2)$$

После определения величины  $m$  осуществляется исследование на принадлежность  $m$  массиву D.

Расчет величины  $m$  также осуществляется с использованием методов линейного программирования.

Так, например, при  $m=1100$  найдем наиболее подходящее значение с учетом статуса материала. Для этого делим значения в таблице, указанные в столбце 3, на 1100, а значения, приведенные в столбце 4, на 1. Затем в столбце 3 находим значения, близкие к 1, а в столбце 4 – значения, близкие к 0.

Для элемента A1 значение в столбце близко к 1, однако в столбце 4 также соответствующее значение равно 1. Следовательно, данный материал недоступен для закупа на российском рынке.

Наиболее подходящим решением является элемент A3, который на 13 % превышает требуемое значение диэлектрической проницаемости материала, а также доступен для приобретения на внутреннем рынке. Большее значение диэлектрической проницаемости материала позволяет увеличить значение статической емкости элемента, то есть повысить его эффективность.

Таким образом, из составленного массива D можно выделить элемент, обеспечивающий условие (2). Большие отклонения от 1 в столбце 3 и нулевые значения в столбце 4, которые отмечены для элементов A5 и A9, также могут быть использованы. Однако в этом случае возрастает стоимость пьезоактюатора, что не всегда может быть оправдано его быстродействием.

На основании описанных выше мероприятий по повышению емкости пьезоэлементов (пьезоактюаторов) разработаны следующие положения методики.

Этап № 1. Задание необходимой емкости пьезоэлемента, исходя из технологических параметров устройства, в котором он будет использован.

Этап № 2. Определение ограничений по размерам пьезоэлемента, исходя из местоположения его в составе устройства.

Этап № 3. Составление уравнений оптимизации. На данном этапе специалисты составляют уравнения, в которых искомой (максимизируемой) величиной является статическая емкость пьезоактюатора, а ограничениями – размеры или длина пьезоэлемента.

Этап № 4. На основании анализа рынка, каталогов сайтов заводов-изготовителей составляется матрица (массив) данных о пьезоэлементах, в который вносится статус доступности материала.

Этап № 5. Осуществляется решение системы уравнений, в основе которых находится целевая функция максимизации статическая емкость пьезоактюатора.

Этап № 6. По результатам расчета области максимизации целевой функции, определяются необходимые значения диэлектрической проницаемости материала.

Этап № 7. Рассчитанное значение диэлектрической проницаемости материала проверяется на принадлежность к массиву данных  $D$ . Если оно принадлежит ему, то производится выбор марки материала пьезоэлемента. Если рассчитанное значение диэлектрической проницаемости материала выходит за пределы этого массива, то необходимо переформировать массив, расширив его до необходимых значений диэлектрической проницаемости материала.

Основные положения описанной выше методики иллюстрирует алгоритм, приведенный на рис. 1.

В качестве исходных данных в методике применяется заданное значение необходимой емкости пьезоэлемента. Для достижения оптимального результата при выборе марки устройства необходимо выполнить ограничение его линейных размеров либо других параметров при иных начальных условиях.

Таким образом, получаем использование системы уравнений (1) с учетом заданных граничных условий, меняя которые можно подбирать пьезоэлемент под конкретный прибор, устройство или электрическую схему.

Составление системы уравнений для расчета максимума целевой функции и подбор значений в матрице  $D$ , позволяющий при проектировании устройств выполнить политику импортозамещения, исключают перерасход средств на закупку пьезоактюаторов, снижают затраты времени на поиск необходимых материалов для их производства, позволяют подобрать рациональные размеры для размещения внутри электронных устройств.

Подобная методика может быть использована и при подборе других технических параметров пьезоэлементов, исходя из задаваемых начальных условий.

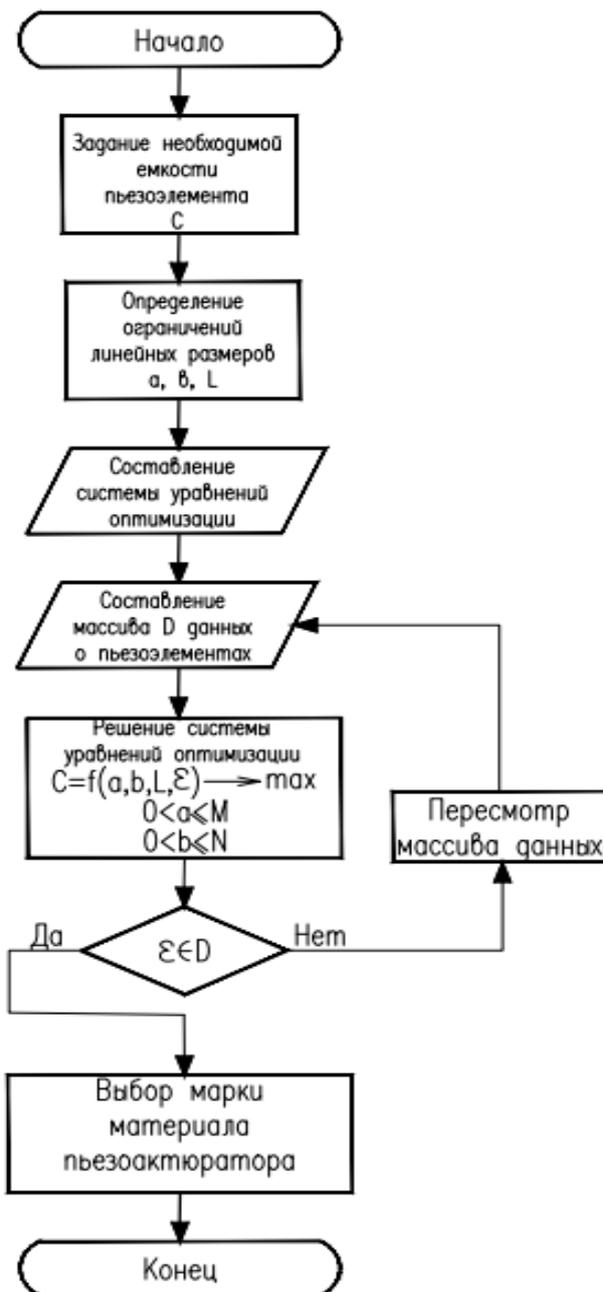


Рис. 1. Алгоритм расчета емкости пьезоактюатора

Fig. 1. Algorithm for calculating the capacitance of a piezoactuator

При производстве пьезоэлементов рекомендуется воспользоваться следующей структурой автоматизированного процесса выбора оптимальной модели и ее дальнейшего производства (рис. 2).

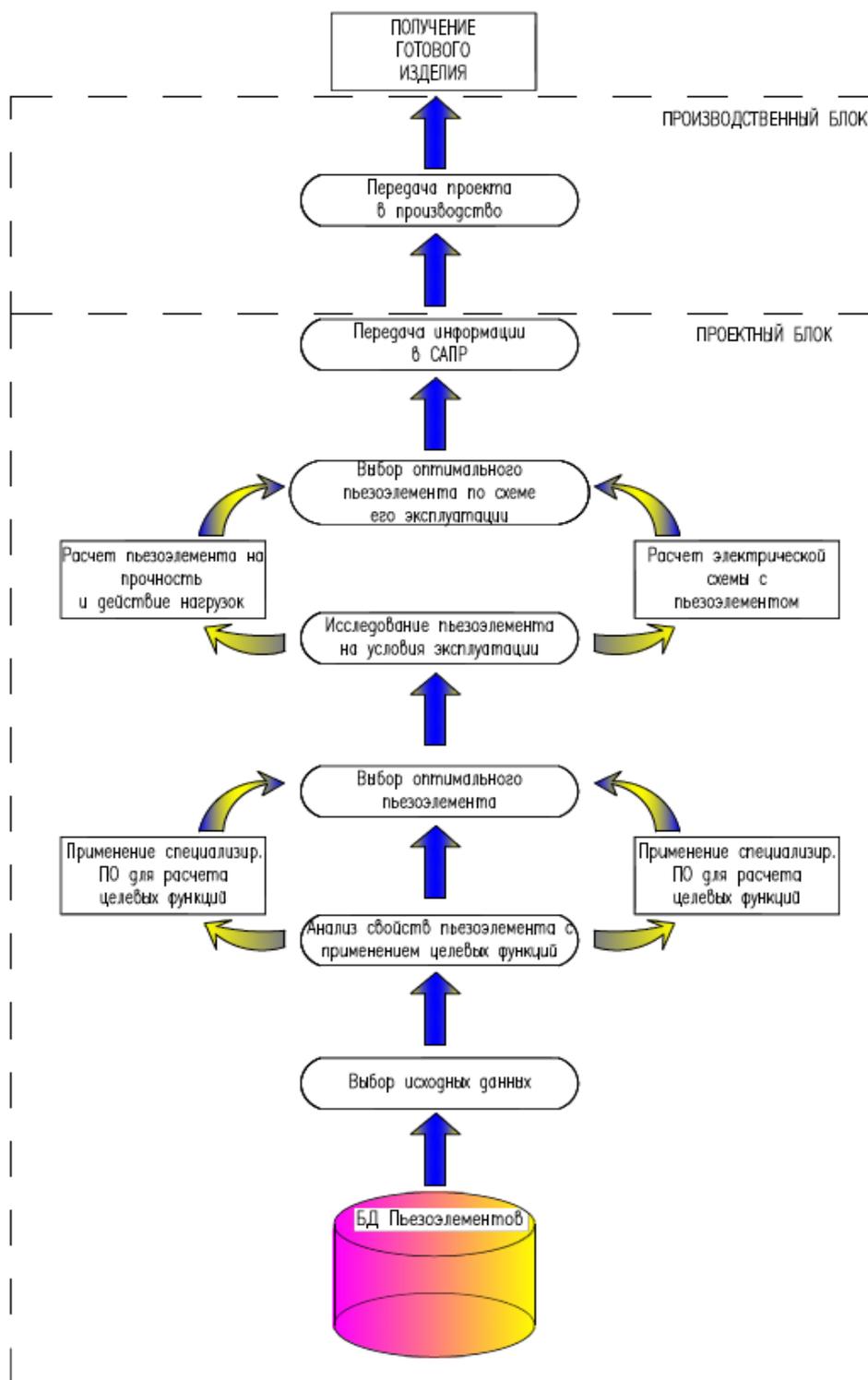


Рис. 2. Структура функциональных областей системы автоматизированного управления процессом выбора и производства пьезоэлементов

Fig. 2. The structure of the functional areas of the automated control system for the selection and production of piezoelectric elements

Начало работы осуществляется от базы данных пьезоэлементов, которая формируется на предприятии до начала работы по подбору пьезоэлемента. В базе данных собираются все предложения отечественных и, по возможности, зарубеж-

ных поставщиков, которые могут предложить продукцию с закупом ее на российском рынке.

После формирования базы данных производится составление системы целевых функций с граничными условиями, которые устанавли-

ваются в зависимости от конкретной задачи. Этими условиями могут быть, например, размеры пьезоэлемента либо его толщина, которые влияют на размер прибора или размещение внутри него пьезоэлемента.

По окончании выбора пьезоэлемента производится исследование условий его эксплуатации, то есть оценка нагрузок, которые будут действовать на него, либо оценка электрических величин, которые будут воздействовать на него для получения перемещений.

Если выбранный пьезоэлемент отвечает условиям эксплуатации, то он передается в один из программных продуктов (в зависимости от того, для каких целей будет использован пьезоэлемент), после чего заканчивается проектирование устройства, в котором он будет использован.

Затем устройство передается в производство.

Из рис. 2 видно, что предлагаемая к реализации структура состоит из двух основных блоков: проектного и производственного.

В проектном блоке закладываются основные характеристики пьезоэлементов и происходит их рациональный подбор для всех необходимых направлений реализации. Проектный блок позволяет не только выбрать марку пьезоэлемента, но и проверить его характеристики для использования в заданном устройстве, а также оценить возможность его работы путем моделирования рабочих условий в специализированном ПО.

Модель автоматизированной системы управления процессом выбора пьезоэлемента, представленная на рис. 2, является адаптивной, то есть способной к изменениям в зависимости от внешних условий. Так, например, при появлении нового поставщика оборудования данные о его продукции сразу заносятся в базу данных.

Результаты выбора пьезоэлемента по предложенной выше методике с использованием метода линейного программирования с учетом заданных линейных размеров  $a = 20$  мм,  $b = 10$  мм и толщиной  $h = 0,5$  мм показаны на рис. 3.

Обозначение	Единица измерения	ЦТС-19	ЦТС-26	ЦТС-26м	ЦТС-36	НЦТС-1	НЦТС-1	NEW НЦТС-2	ЦТС-46	NEW ЦТС-50	NEW ЦТС-51
$T_k$	°C	290	350	350	350	175	140	130	260	260	250
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	-	1750	1700	1700	670	4000	5700	5100	2100	2200	2180
$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	-	1450	-	-	1130	-	-	-	-	-	-
tg $\delta$ , не более	%	2,5	2,0	2,0	2,5	2,0	2,8	3,0	2,0	265	2
$Q_m$	-	80	70	80	80	50	40	60	70	80	75
$V_1^E$	$10^3$ м/с	3,0	2,9	2,9	3,0	2,87	3,0	2,95	2,9	2,9	2,85
$\sigma_p$	-	0,37	0,36	0,38	0,30	-	0,38	0,30	0,33	0,33	0,32
$k_p$	-	0,55	0,60	0,60	0,57	0,60	0,62	0,63	0,61	0,64	0,67
$k_{15}$	-	0,60	-	-	0,73	-	-	-	-	-	-
$k_{33}$	-	0,67	0,68	0,68	0,70	-	-	0,74	0,72	0,73	0,74
$d_{31}$	$10^{-12}$ Кл/Н	-170	-170	-160	-90	-260	-310	-310	-190	-200	-216
$d_{33}$	$10^{-12}$ Кл/Н	350	350	340	220	550	650	800	450	470	560
$d_{15}$	$10^{-12}$ Кл/Н	400	400	-	440	-	-	-	-	-	-
$g_{31}$	$10^{-3}$ В•м/Н	-11,0	-11,3	-10,6	-15,2	-7,3	-6,2	6,9	-10,2	-10,3	-11,1
$g_{33}$	$10^{-3}$ В•м/Н	22,6	23,3	22,6	37,1	-15,5	12,9	17,7	23,1	24,1	29,0
(ООЧ) <sub>p</sub>	%	0,8	-	-	3,0	-	-	-	-	-	-
(ООЧ) <sub>сд</sub>	%	0,9	-	-	1,1	-	-	-	-	-	-
(ООЧ) <sub>ск</sub>	%	1,0	-	-	2,0	-	-	-	-	-	-
$T_{раб}$	°C	200	250	250	200	100	85	80	180	180	175
$\rho_v$ , не менее	При 100°С, $10^8$ , Ом•м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\rho$	$10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,5	7,6	7,6	7,7	7,4	7,6	7,8	7,5	7,6	7,5

Рис. 3. Результаты выбора пьезоэлементов по предлагаемой методике

Fig. 3. The results of the selection of piezoelectric elements according to the proposed method

Наибольшую эффективность описанная выше система показывает при корректно заданных требованиях к пьезоэлементам и условиям их эксплуатации.

При работе с системой автоматизированного управления необходимо руководствоваться особенностями того информационного пространства, которое сформировано в рамках конкретного предприятия или компании, так как сформированная БД должна быть интегрирована в него для снижения трудозатрат пользователей.

#### Заключение

Предлагаемая методика выбора пьезоэлемента и разработка структуры автоматизированного управления позволяет компании сэкономить средства при проектировании и производстве продукции, учесть необходимые требования заказчиков к отдельным свойствам пьезоэлементов, а также повысить результативность процесса за счет использования накопленного опыта, реализованного в виде базы данных свойств пьезоэлементов.

Использование предлагаемой методики позволяет сократить затраты времени на выбор пьезоэлемента, которые составляют (без использования данного метода) порядка 2...3 дней. Без использования предлагаемого метода подбор пьезоэлемента предусматривает: просмотр большого количества каталогов заводоизготовителей несколькими специалистами; проведение сравнительного анализа их свойств с необходимыми свойствами аналога, который требуется применить в электронном устройстве; проведение оценки доступности устройств для закупки их на российском рынке либо заказа их из-за рубежа, если аналогов не существует.

Использование предлагаемой к реализации методики сокращает временные затраты на выбор пьезоэлемента до 1...2 часов.

#### Библиографические ссылки

1. Rafique S. Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments, Springer International Publishing, Berlin, 2018, 172 p.
2. Моделирование и анализ работы системы накопления пьезоэлектрической энергии при помощи программной среды Matlab/Simulink / Ф. М. М. Аль-Руфаи, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 3. С. 24–33. DOI 10.22213/2410-9304-2022-3-24-33.
3. Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения : сборник трудов III молодежной всероссийской научной конференции с международным участием (20–23 сентября 2021 г.). Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2021. 296 с.

4. Базалевская С. С. Влияние термомеханических воздействия на структуру и фазовый состав пьезоэлектрических кристаллов семейства лангасита : дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 169 с.

5. Stance J.L., Berchok C.L., and Keating J.L. (2017). Gunshot call production by the North Pacific right whale *Eubalaena japonica* in the south-eastern Bering Sea, *Endangered Species Research*, 34, 251–267.

6. Сабиров Ф. С. Датчики пространственных вибраций и диагностика процесса обработки на станках // Датчики и системы. 2017. № 3. С. 55–61.

7. Малыхин А. Ю., Нестеров А. А., Панич А. Е. Особенности механических характеристик сегнето-жесткого материала ПКП-35 при использовании в условиях силового ультразвука // Технологии и материалы для экстремальных условий : материалы XIV Всероссийской научной конференции. М., 2019.

8. Инновационные технологии для биомедицинского применения / А. Е. Панич, А. А. Панич, С. Н. Свирская, А. Ю. Малыхин, А. В. Скрылёв, Е. С. Алексюнин, Е. А. Панич // Генетика – фундаментальная основа инноваций в медицине и селекции : материалы VIII научно-практической конференции с международным участием. Ростов-на-Дону ; Таганрог, 2019. С. 175–179.

9. Оценка эффективности термической абляции высокоинтенсивным сфокусированным ультразвуком на модели мышечной ткани крысы / Ю. Г. Змитриченко, Г. В. Точильников, В. Г. Беспалов, Е. А. Бусько, К. В. Козубова, К. Ю. Сенчик, Е. Д. Ермакова, Н. Т. Жилинская, А. Е. Беркович // Белые ночи – 2020 : сборник тезисов VI Петербургского международного онкологического форума. 2020. С. 282.

10. Зацкерлянский О. В., Панич А. Е. Пьезоэлектрические материалы для датчиков вибрации и актюаторов в устройствах измерения плотности жидкостей и газов // Датчики и системы. 2020. № 4. С. 48–54.

11. Исследование возможности создания новых полифазных пьезоматериалов для гидроакустических преобразователей / М. А. Мараховский, В. А. Мараховский, Э. А. Мирющенко, Е. А. Панич // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики : труды XVI Международной конференции, 23–25 мая 2018 г. 2018. С. 616–619.

12. Raspopov V.Ya., Alaluev R.V., Ladonkin A.V., Likhoshester V.V., Shepilov, S.I. Tuning and Calibration of a Hemispherical Resonator Gyroscope with a Metal Resonator to Operate in Angular Rate Sensor Mode, *GiroskopiyaiNavigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 31–41.

13. Пористые пьезокомпозиционные материалы на основе пьезокерамики ПКП-12 / Е. В. Карюков, А. А. Панич, В. К. Доля [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4 (47). С. 7.

14. Управление свойствами пьезокерамического материала системы ЦТС, используемого в гидроакустических излучателях / А. В. Нагаенко, С. Н. Свирская, А. Е. Панич, А. Ю. Малыхин, А. В. Скрылёв // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. С. 9.

15. Zhang H.L., Li J.-F., Zhang B.-P. Microstructure and electrical properties of porous PZT ceramics derived from different pore-forming agents // *Acta Materialia*, 2007. № 55. Pp. 171-181.

16. Zhang Y. L., et al. Electrostatic energy harvesting device with dual resonant structure for wideband random vibration sources at low frequency. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, pp. 1-8.

17. Tabesh A., Frechette L. G. A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 57, pp. 840–849.

18. Нагаенко А. В., Нестеров А. А., Панич Е. А. Управление электрофизическими параметрами пьезоматериалов путем создания многокомпонентных керамических композитов // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2018. Т. 18, № 2. С. 396–399.

19. Усиление пьезоэлектрических и диэлектрических свойств и макроскопическая релаксация зарядового и полевого отклика в 0–3 композитах / Г. С. Радченко, А. В. Скрылев, А. Ю. Мальхин, А. А. Панич // *Журнал технической физики*. 2018. № 88 (2).

20. Нагаенко А. В. Пьезоэлектрики. Основные параметры и технология получения : учеб. Пособие. Ростов-на-Дону : Фонд науки и образования, 2021. 104 с.

### References

1. Rafique S., *Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments*, Springer International Publishing, Berlin, 2018, 172 P.

2. Al-Rufai F.M., Yakimovich B. A., Kuvshinov V.V., Al-Saidi A.A., Bordan D. F. [Modeling and analysis of the operation of a piezoelectric energy storage system using the Matlab/Simulink software environment]. *Интеллектуальные системы в производстве*, vol. 20, no. 3, 2022. Pp. 24-33 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2022-3-24-33.

3. Aktual'nyye problemy p'yezoelektricheskogo priborostroyeniya. Sbornik trudov III molodezhnoy vs Rossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem (20–23 sentyabrya 2021). – Rostov-na-Donu : Fond nauki i obrazovaniya, 2021 – 296 p.

4. Bazalevskaya S.S. *Vliyaniye termomekhanicheskikh vozdeistviya na strukturu i fazovyi sostav p'yezoelektricheskikh kristallov semeistva langasita* [Influence of thermomechanical effects on the structure and phase composition of piezoelectric crystals of the langasite family]: PhD thesis. Moscow, 2020. 169 p. (in Russ.).

5. Crance J.L., Berchok C.L., and Keating J.L. (2017). “Gunshot call production by the North Pacific right whale *Eubalaena japonica* in the south-eastern Bering Sea”, *Endangered Species Research*, 34, 251-267.

6. Sabirov F.S. [Sensors of spatial vibrations and diagnostics of the machining process on machine tools]. *Datchiki i sistemy*. No. 3, 2017. Pp. 55-61 (in Russ.).

7. Malykhin A.YU., Nesterov A.A., Panich A.Ye. *Osobnosti mekhanicheskikh kharakteristik segnetozhestkogo materiala PKP-35 pri ispol'zovanii v uslovi-*

*yakh silovogo ul'trazvuka* [Peculiarities of Mechanical Characteristics of the Ferro-Rigid Material PKP-35 When Used under Conditions of Power Ultrasound]. *Tekhnologii i materialy dlya ekstremal'nykh uslovii : materialy XIV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* [Proc. Technologies and materials for extreme conditions: materials of the XIV All-Russian scientific conference]. Moscow, 2019.

8. Panich A.Ye., Panich A.A., Svirskaya S.N., Malykhin A.YU., Skrylov A.V., AleksyuninYe.S., Panich Ye.A. *Innovatsionnye tekhnologii dlya biomeditsinskogo primeneniya* [Innovative technologies for biomedical applications]. *Genetika – fundamental'naya osnova innovatsii v meditsine i seleksii : materialy VIII nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proc. Genetics - the fundamental basis for innovation in medicine and breeding : materials of the VIII scientific and practical conference with international participation]. Rostov-on-Don ; Taganrog, 2019. Pp. 175-179 (in Russ.).

9. Zmitrichenko YU.G., Tochil'nikov G.V., Bespалov V.G., Bus'koYe.A., Kozubova K.V., Senchik K.YU., YermakovaYe.D., Zhilinskaya N.T., Berkovich A.Ye. *Otsenka effektivnosti termicheskoi ablyatsii vysokointensivnym sfokusirovannym ul'trazvukom na modeli myshechnoi tkani krysy* [Evaluation of the effectiveness of thermal ablation by high-intensity focused ultrasound on a model of rat muscle tissue]. *Belye nochi – 2020 : sbornik tezisov VI Peterburgskogo mezhdunarodnogo onkologicheskogo foruma* [Proc. White Nights - 2020 : a collection of abstracts of the VI St. Petersburg International Cancer Forum], 2020. P. 282 (in Russ.).

10. Zatserklyanny, O.V., Panich A. Ye. [Piezoelectric materials for vibration sensors and actuators in devices for measuring the density of liquids and gases]. *Datchiki i sistemy*. 2020. No. 4. Pp. 48-54 (in Russ.).

11. Marakhovskiy M.A., Marakhovskiy V.A., Miryushchenko E.A., Panich Ye.A. *Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya novykh polifaznykh p'ezomaterialov dlja gidroakusticheskikh preobrazovatelej* [Study of the possibility of creating new polyphase piezomaterials for hydroacoustic transducers]. *Prikladnyye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki : trudy XVI Mezhdunarodnoj konferentsii, 23–25 maja 2018 g.* [Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics: Proceedings of the XVI International Conference, May 23–25, 2018]. 2018. Pp. 616-619 (in Russ.).

12. Raspopov V.Ya., Alaluev R.V., Ladonkin A.V., Likhosherst V.V., Shepilov S.I. Tuning and Calibration of a Hemispherical Resonator Gyroscope with a Metal Resonator to Operate in Angular Rate Sensor Mode, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 31-41.

13. Karyukov Ye.V., Panich A.A., Dolya V.K. [i dr.] [Porous piezocomposite materials based on PKP-12 piezoceramics]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2017. No. 4. P. 7 (in Russ.).

14. Nagayenko A.V., Svirskaya S.N., Panich A.Ye., Malykhin A.YU., Skrylov A.V. [Controlling the properties of the piezoceramic material of the PZT system used

in hydroacoustic emitters]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2016. No. 2. P. 9 (in Russ.).

15. Zhang H.L., Li J.-F., Zhang B.-P. Microstructure and electrical properties of porous PZT ceramics derived from different pore-forming agents // *Acta Materialia*, 2007. No. 55. Pp. 171-181.

16. Zhang Y. L., et al. Electrostatic energy harvesting device with dual resonant structure for wideband random vibration sources at low frequency. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, pp. 1-8.

17. Tabesh A., Frechette L.G. A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 57, pp. 840-849.

18. Nagayenko A.V., Nesterov A.A., Panich Ye.A. [Controlling the electrophysical parameters of piezomaterials by creating multicomponent ceramic composites]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*. 2018. Vol. 18, no. 2. Pp. 396-399.

19. Radchenko G.S., Skrylev A.V., Malykhin A.YU., Panich A.A. [Enhancement of Piezoelectric and Dielectric Properties and Macroscopic Relaxation of Charge and Field Response in 0-3 Composites]. *Zhurnal tehnichej fiziki*. 2018. No. 88.

20. Nagayenko, A. V. P'ezoelektriki. *Osnovnye parametry i tehnologija poluchenija* [Piezoelectrics. Main parameters and production technology]. Rostov-na-Donu : Fond nauki i obrazovaniya, 2021. 104 p. (in Russ.).

\*\*\*

### Development of Technique for Piezoelectric Element Automated Selection Process

*F. M. Al-Rufae*, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*B. A. Yakimovich*, DSc in Engineering, Professor, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*V. V. Kuvshinov*, PhD in Engineering, Professor, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*Piezoelectric elements are one of the most popular electronic components in use and are used in many electronic devices. These devices are very effectively used in medicine, education, construction, the oil and gas industry, military equipment, metrology, and many other fields. They are part of devices that provide diagnostics of various human organs, measure the flow of pumped liquids and gases, and utilize the mechanical energy of a person and vehicles for the purpose of its subsequent conversion into electrical energy.*

*Currently, manufacturers of piezoelectric elements present a large number of various models on the Russian market that can satisfy any customer request.*

*The orientation of developers of electronic devices that use piezoelectric elements, is quite difficult. In addition, great difficulties arise in the selection of piezoelectric elements at the present time, when many models have become unavailable for purchase within the country.*

*To evaluate several models of piezoelectric elements in the shortest possible time, taking into account the analysis of a large amount of data, is very difficult and time-consuming, as well as involving a large team of specialized experts for analysis. To optimize the choice of the most appropriate model and save time and human resources, an automated control system for the selection of piezoelectric elements has been implemented. The proposed system takes into account a set of the most significant properties of piezoelectric elements as well as the possibility of their purchase (availability) in the domestic market, which significantly reduces the time spent by companies in selecting the necessary devices. The system is one of the elements of the developed methodology for selecting piezoelectric elements.*

**Keywords:** piezoactuator, algorithm, piezoelectric element, capacitance, availability status, automation

Получено: 19.02.23

#### Образец цитирования

*Аль-Руфай Ф. М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В.* Разработка методики автоматизированного выбора пьезоэлементов // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2023. Т. 21, № 2. С. 93-101. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-93-101.

#### For Citation

*Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.* [Development of technique for piezoelectric element automated selection process]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 93-101 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-93-101.