

К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВИБРАЦИОННЫХ И УДАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД В МЕЛЬНИЦАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

А.А. Редюшев¹, Н.И. Козлов¹, А.Е. Цыганов¹

¹ ООО «ГлобалТест», Саров, Россия, e-mail: redushev@globaltest.ru

Аннотация: Описаны принципы выбора геометрических размеров и материала пьезоэлемента, составляющего основу ударных акселерометров. Установлены зависимости между характеристиками ударных акселерометров, которые влияют на их производительность, точность и применяемость в конкретных условиях. Произведен расчет конструктивных, прочностных и электротехнических параметров пьезоэлементов, выполненных из различных материалов. Определены наиболее эффективные пьезокерамические материалы, обеспечивающие сдвиговый режим работы пьезоэлемента. Произведены расчеты электрической емкости, величины заряда, жесткости и собственной частоты для различных геометрических параметров кольцевого сдвигового пьезоэлемента. Выявлена конструктивная схема расположения пьезоэлементов, обеспечивающая наибольшую эффективность, состоящего из последовательно соединенных пьезоэлементов, выполненных из материала марки ЦТС-36. Определены геометрические размеры, емкость и жесткость кольцевого пьезоэлемента. Получены зависимости массы инерционного элемента от коэффициента Пуассона (вида материала) для различных диаметров пьезоэлемента. Доказано, что коэффициент Пуассона, который определяет вид материала, в значительной степени влияет на массу инерционного элемента. Получены зависимости чувствительности пьезоэлемента от коэффициента Пуассона (вида материала). Установлены количественные и качественные взаимосвязи, определяющие точность, быстродействие и применимость датчиков в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: мельницы различных типов, измельчение горных пород, ударные характеристики акселерометров, пьезокерамические материалы, пьезоэлемент, чувствительность пьезоэлемента, эффективность пьезомодуля.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-67-00009, <https://rscf.ru/project/25-67-00009/>

Для цитирования: Редюшев А. А., Козлов Н. И., Цыганов А. Е. К вопросу об исследованиях вибрационных и ударных характеристик акселерометров для измерения ударно-вибрационных нагрузок при измельчении горных пород в мельницах различных типов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11. – С. 145–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_145.

On the issue of vibratory and shock characteristics of accelerometer for shock-vibratory loads measurement during rock grinding in different types of mills

A.A. Redushev¹, N.I. Kozlov¹, A.E. Tsiganov¹

¹ LLC GlobalTest, Sarov, Russia, e-mail: redushev@globaltest.ru

Abstract: The paper describes principles for selecting geometric dimensions and material of the piezoelectric element that forms the core of shock accelerometers. Relationships between the characteristics of shock accelerometers that affect their performance, accuracy, and applicability under specific conditions have been established. Structural, strength, and electrical parameters of piezoelectric elements made of various materials have been calculated. The most efficient piezoceramic materials providing shear-mode operation of the piezoelectric element have been identified. Calculations of electric capacitance, electric charge, stiffness, and natural frequency have been performed for various geometric parameters of an annular shear-mode piezoelectric element. A structural arrangement of piezoelectric elements has been found that ensures the highest efficiency of a piezoelectric accelerometer consisting of piezoelectric elements connected in series and made of CTS-36 material. The size, capacitance, and stiffness of the annular piezoelectric element have been determined. Dependences of the inertial element mass on material Poisson's ratio for different diameters of the piezoelectric element have been obtained. It has been proven that Poisson's ratio, which defines the material type, significantly affects the mass of the inertial element. Dependences of the piezoelectric element sensitivity on material Poisson's ratio have been derived. Quantitative and qualitative interrelations have been established that determine the accuracy, speed of response, and applicability of the sensors under various operating conditions.

Key words: mills of different types, rock milling, shock accelerometer properties, piezoceramic materials, piezoelectric element, piezoelectric element sensitivity, piezoelectric module efficiency.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-67-00009, <https://rscf.ru/project/25-67-00009/>

For citation: Redushev A. A., Kozlov N. I., Tsiganov A. E. On the issue of vibratory and shock characteristics of accelerometer for shock-vibratory loads measurement during rock grinding in different types of mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11):145-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_145.

Введение

Ударные акселерометры широко применяются в аэрокосмической отрасли, автомобилестроении, оборонной промышленности и машиностроении для регистрации кратковременных высокоамплитудных импульсов ускорения.

В горном деле применение ударных акселерометров необходимо при изучении процесса взаимодействия мелющих тел в помольной камере мельниц раз-

личных типов, так как удары стальных шаров друг о друга и о корпус помольной камеры мельницы можно рассматривать как микровзрывы, при которых возникают ударные импульсы с амплитудой в десятки тысяч g [1 – 3]. В отличие от виброакселерометров, ударные датчики работают в экстремальных динамических режимах, где критическими становятся не только статические параметры, но и переходные характеристики

[4–6]. Ключевыми факторами, определяющими производительность и точность, являются чувствительность, диапазон измерений, рабочий частотный диапазон и собственная резонансная частота. Несмотря на широкое использование этих параметров в технической документации, систематический анализ их взаимного влияния и методологических ограничений остается недостаточно освещенным в прикладной литературе. В последние годы в Российской Федерации активно развивается производство отечественных измерительных преобразователей, в частности предприятием ООО «ГлобалТест», что обуславливает необходимость верификации общих метрологических закономерностей на базе доступной российской элементной базы [7].

Цель данной работы — установить и количественно описать зависимости между указанными характеристиками, оценить их влияние на точность измерений и сформировать критерии выбора датчиков для конкретных условий эксплуатации с учетом современных отечественных и зарубежных аналогов.

Методы

Учитывая, что чувствительный элемент имеет очень высокую добротность (показатель затухания $<0,02$) [8], а также исходя из условий применения динамического вибропреобразователя (масса объекта весьма значительна), в качестве основного расчетного выражения для собственной f_0'' и резонансной f_0'' частоты закрепленного на объекте преобразователя принимается

$$f_0'' \approx f_p'' \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K_2}{M_2}}. \quad (1)$$

Для ПМ со «сдвиговым» режимом работы можно записать

$$(f_0'')^2 = \frac{S \cdot E_{cd}}{4\pi^2 \cdot h \cdot M_2}, \quad (2)$$

откуда

$$M_2 = \frac{S \cdot E_{cd}}{4\pi^2 \cdot h \cdot (f_0'')^2} = \frac{S \cdot E}{8\pi^2 \cdot h \cdot (1 + \mu)(f_0'')^2} = \quad (3)$$

где f_0'' — собственная частота закрепленного на объекте датчика [кГц]; S — площадь пьезоэлемента [м^2]; E — модуль продольной упругости материала пьезоэлемента [Н/м^2]; h — толщина пьезоэлемента [м]; M_2 — масса инерционного элемента [кг]; K_2 — жесткость между инерционным элементом и основанием корпуса, определяется свойствами пьезоэлемента.

$E_{cd} = E/(2 \cdot (1 + \mu))$ — модуль сдвига материала чувствительного элемента [Н/м^2]; μ — коэффициент Пуассона.

Для электрической схемы пьезомодуля (ПМ), использующего режим сдвига, справедливо выражение

$$U_{\text{вых}} = d_{15} \cdot F/C_{\text{пз}}, \quad (4)$$

где d_{15} — сдвиговый пьезомодуль [Кл/Н].

Подставляя в формулу известные соотношения,

$$F = M_2 \cdot g; C_{\text{пз}} = (S \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0)/h, \quad (5)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная [Ф/м], получаем выражение для чувствительности ПМ по напряжению:

$$\xi_u = 0,028 \cdot \frac{d_{15} \cdot E_{cd}}{\varepsilon \cdot (f_0'')^2 \cdot 10^{-12}} \quad (6)$$

или:

$$\xi_u = 0,014 \cdot \frac{d_{15} \cdot E}{\varepsilon \cdot (1 + \mu) \cdot (f_0'')^2 \cdot 10^{-12}} [\text{В/г}]. \quad (7)$$

Преобразовывая последнюю формулу для собственной частоты $f_0'' = 6,5 \text{ кГц}$, получаем выражение для расчетной

Таблица 1

**Значения чувствительности пьезомодулей
для некоторых пьезокерамических материалов**
Piezoelectric module sensitivity for several piezoceramic materials

Параметр	Материал пьезоэлемента				
	ЦТБС-3	ПКР-7	ЦТС-19	ЦТС-36	ПКР-1
d_{15} , пКл/Н	560	760	522	438	420
d_{33} , пКл/Н	320	610	377	221	220
E , Н/м ²	$0,72 \cdot 10^{11}$	$0,58 \cdot 10^{11}$	$0,57 \cdot 10^{11}$	$0,62 \cdot 10^{11}$	$0,63 \cdot 10^{11}$
μ	0,34	0,42	0,37	0,29	0,35
$E_{сд}$, Н/м ²	$0,26 \cdot 10^{11}$	$0,20 \cdot 10^{11}$	$0,21 \cdot 10^{11}$	$0,24 \cdot 10^{11}$	$0,23 \cdot 10^{11}$
ε	2160	3500	1770	655	650
$\xi_{\Sigma}^{6,5\text{кГц}}$, В/г	4,6	2,9	4,1	10,6	9,95

оценки реализуемой чувствительности ПМ: для 6,5 кГц —

$$\xi_u = 331 \cdot \frac{d_{15} \cdot E}{\varepsilon \cdot (1 + \mu)} \text{ [В/г]}. \quad (8)$$

Результаты

В табл. 1 для сравнения представлены элетрофизические постоянные, а так-

же вычисленные значения чувствительности пьезомодулей для некоторых пьезокерамических материалов [9].

Из таблицы видно, что наиболее эффективными пьезокерамическими материалами для сдвигового режима работы являются материалы марок ЦТС-36 и ПКР-1. Однако для анализа приведем

Таблица 2

Результаты основных параметров пьезомодулей со сдвиговыми пьезоэлементами
Shear-mode piezoelectric modules base parameters

Пьезоэлемент		ЦТС-19			ЦТС-36		
		Ø15×Ø11×4	Ø30×Ø20×5	Ø30×Ø20×10	Ø15×Ø11×4	Ø30×Ø20×5	Ø30×Ø20×10
1 шт.	C, пФ	1400	1250	2500	820	750	1500
	Q, пКл	650	650	650	450	450	450
	U, В	0,46	0,52	0,26	0,55	0,6	0,3
	K, Н/м	$1,8 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^9$
	f_o , кГц	21	20	29	21	20	29
2 шт. (последовательно)	C, пФ	700	625	1250	410	375	750
	Q, пКл	650	650	650	450	450	450
	U, В	0,92	1,04	0,52	1,1	1,2	0,6
	K, Н/м	$0,9 \cdot 10^9$	$0,85 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$0,9 \cdot 10^9$	$0,85 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$
	f_o , кГц	14,8	14,5	20	14,8	14,5	20
2 шт. (параллельно)	C, пФ	2800	2500	5000	1670	1500	3000
	Q, пКл	1300	1300	1300	900	900	900
	U, В	0,46	0,52	0,26	0,55	0,6	0,3
	K, Н/м	$0,9 \cdot 10^9$	$0,85 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$0,9 \cdot 10^9$	$0,85 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$
	f_o , кГц	14,8	14,5	20	14,8	14,5	20

результаты расчета наиболее распространенной и технологически освоенной керамики типа ЦТС-19, имеющей также максимальный пьезомодуль d_{15} .

В табл. 2 представлены расчеты электрической емкости C , величины заряда Q , жесткости K и собственной частоты f_0 для различных геометрических параметрах кольцевого сдвигового пьезоэлемента и двух типов керамики ЦТС-19 и ЦТС-36. Расчеты приведены для инерционного элемента массой $M_2 = 0,1$ кг при ускорении $1 g$. По результатам анализа табл. 2, наибольшую эффективность имеет ПМ, состоящий из последовательно соединенных пьезоэлементов из марки ЦТС-36 с геометрическими размерами $\varnothing 30 \times \varnothing 20 \times 5$.

Для макета № 2 выбрана схема «тендем с двумя пьезоэлементами и с центральным расположением инерционного элемента».

Рассмотрим два варианта геометрических размеров (рис. 1) пьезоэлементов из двух типов керамики:

- $\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 20$ — ЦТС-36;
- $\varnothing 30 \times \varnothing 20 \times 20$ — ЦТС-19.

В качестве инерционного элемента выбирается незаполяризованная керамика с габаритами $\varnothing 50 \times \varnothing 20 \times 20$ [10].

Для расчета чувствительности ПМ по напряжению ξ_y и собственной резонансной частоты f_0 определим электрическую емкость и жесткость соответствующих пьезоэлементов [11].

Емкость кольцевого пьезоэлемента определяется по формуле

$$C = \pi \epsilon \epsilon_0 \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{H}. \quad (9)$$

Таблица 3

Параметры кольцевого пьезоэлемента
Annular piezoelectric element parameters

	$\varnothing 30 \times \varnothing 20 \times 20$ ЦТС-19	$\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 20$ ЦТС-36	$\varnothing 50 \times \varnothing 20 \times 20$ ЦТС-36
C , пФ	$C_1 = 300$	$C_2 = 200$	$C_3 = 500$
K , Н/м ²	$K_1 = 1,2 \cdot 10^9$	$K_2 = 2,1 \cdot 10^9$	$K_3 = 5,1 \cdot 10^9$

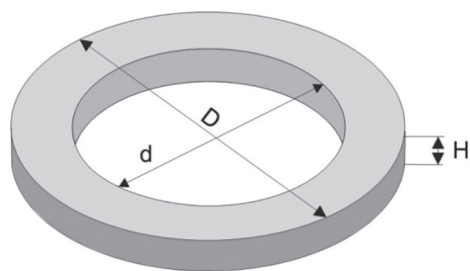


Рис. 1. Геометрические размеры кольцевого пьезоэлемента

Fig. 1. Size of annular piezoelectric element

Жесткость кольцевого пьезоэлемента определяется по формуле

$$K = (S \cdot E)/H, \quad (10)$$

где S — площадь пьезоэлемента [м²]; E — модуль продольной упругости материала пьезоэлемента [Н/м²]; H — толщина пьезоэлемента [м];

Результаты расчетов представлены в табл. 3

На основании проведенных исследований получены зависимости между основными параметрами пьезоэлемента.

На рис. 2 представлены зависимости массы инерционного элемента от коэффициента Пуассона (вида материала) для различных диаметров пьезоэлемента, построенные по формуле (3).

Анализ зависимостей показывает, что коэффициент Пуассона, который определяет вид материала, в значительной степени влияет на массу инерционного элемента [12, 13]. Кроме того, воспользовавшись формулой (1), можно определить максимальные габаритные размеры чувствительного элемента, которые должны удовлетворять условиям технического задания на конструирование удар-

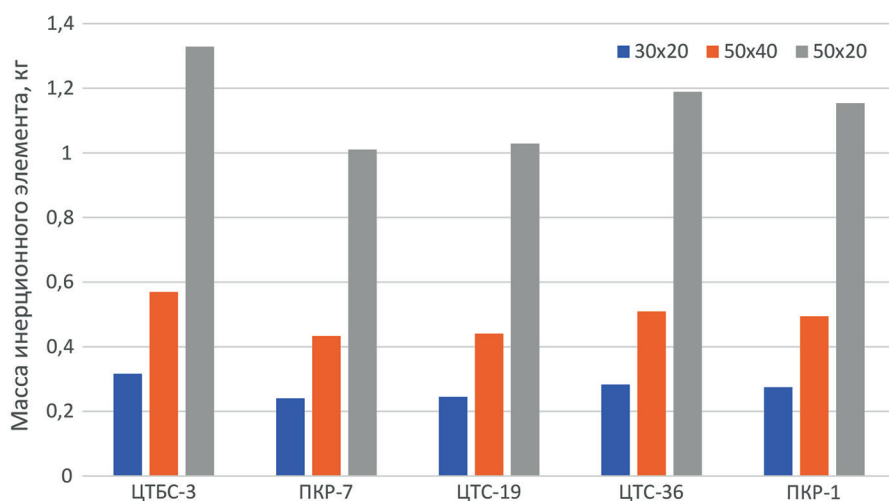


Рис. 2. Зависимости массы инерционного элемента от коэффициента Пуассона (вида материала) для различных диаметров пьезоэлемента

Fig. 2. Inertial element mass vs. material Poisson's ratio for different piezoelectric element diameters

ного вибропреобразователя для измерения ударных импульсов в помольных камерах мельниц различных типов [14].

На рис. 3 представлены зависимости чувствительности пьезоэлемента от коэффициента Пуассона (вида материала).

Из выражения (7) видно, что в схеме пьезомодуля, испытывающего сдвиговые напряжения, при фиксированных значениях собственной частоты чувствительность определяется только значениями

электрофизических параметров материала пьезоэлемента [15, 16].

Разберем фундаментальные зависимости между основными метрологическими параметрами ударных акселерометров (внешний вид акселерометра приведен на рис. 4): чувствительностью, диапазоном измерений, рабочим частотным диапазоном и собственной резонансной частотой. На основе анализа физических принципов преобразования

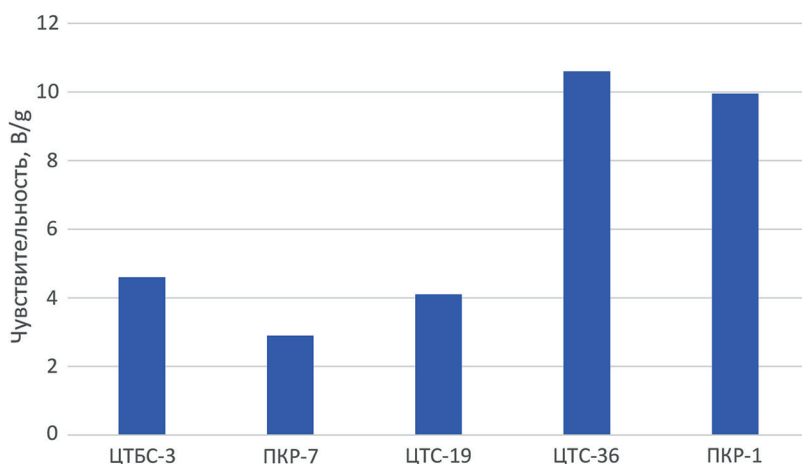


Рис. 3. Зависимости чувствительности пьезоэлемента от коэффициента Пуассона (вида материала)

Fig. 3. Piezoelectric element sensitivity vs material Poisson's ratio

и динамических моделей колебательных систем установлены количественные и качественные взаимосвязи, определяющие точность, быстродействие и применимость датчиков в различных условиях эксплуатации [17, 18]. Показано, что проектирование и выбор ударных акселерометров требуют компромиссного подхода, учитывающего обратную пропорциональность чувствительности и диапазона измерений, а также ограничение рабочего частотного диапазона $1/3 - 1/5$ от резонансной частоты.

Сформулированы практические рекомендации по оптимизации характеристик под задачи ударного мониторинга, краш-тестирования и баллистических измерений с учетом особенностей отечественной и зарубежной элементной базы.

Чувствительность и диапазон измерений

Обратная зависимость обусловлена конструктивными ограничениями. Пьезоэлектрические акселерометры с высокой чувствительностью (100–500 мВ/г или 10–50 пКл/г) имеют диапазон до 5000–10 000 г. Ударные датчики для баллистики и испытаний взрывных устройств (0,5–5 мВ/г) выдерживают 50 000–200 000 г. Превышение $A_{\max}$ приводит к нелинейности, гистерезису, микротрещинам в пьезокерамике и необратимому дрейфу нуля. Аналогичные закономерности подтверждаются на линейке ударных акселерометров российского производства (ООО «ГлобалТест», серии AP), где заявленная чувствительность 0,01–10 мВ/г соответствует рабочим диапазонам 10 000–100 000 г при сохранении линейности в пределах $\pm 1,5\%$ до предела измерений [2, 3].

В MEMS-акселерометрах аналогичный компромисс реализуется через изменение зазора между обкладками и жесткости подвеса.

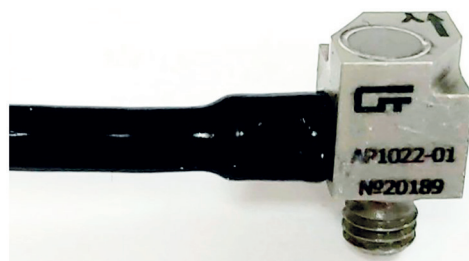


Рис. 4. Внешний вид акселерометра

Fig. 4. Accelerometer view

Резонансная частота и частотный диапазон

Высокая резонансная частота (50–150 кГц) обеспечивает широкий рабочий диапазон (до 20–30 кГц), но снижает чувствительность и увеличивает высокочастотные шумы [19]. При превышении $f > 1/3 \cdot f_r$ наблюдается резонансное усиление амплитуды (> 3 дБ) и нелинейные фазовые сдвиги, что искажает форму ударного импульса и приводит к ошибкам при вычислении скорости и перемещения методом численного интегрирования. Критическое демпфирование ($\zeta \approx 0,6 - 0,7$) в ударных датчиках обычно не применяется, так как сужает полосу и снижает быстродействие; вместо этого используется слабое структурное демпфирование и цифровая коррекция АЧХ/ФЧХ. В отечественных решениях (в т.ч. ООО «ГлобалТест») для компенсации фазовых искажений в полосе 0,1–0,3 $\cdot f_r$ внедряются аппаратные фильтры нижних частот с настройкой по крутизне среза 12–24 дБ/окт, что позволяет сохранять форму импульса при сохранении паспортной полосы пропускания.

Влияние на точность измерений

Точность ударных измерений определяется не только паспортной погрешностью (обычно $\pm 1 - 5\%$), но и согласованием параметров датчика со спектром воздействия [20]. При $f_{\text{work}} < f_{\text{max}}$ спектра возникает интегральная ошибка амплитуды до 15–20% и фазовая ошибка

$>30^\circ$, недопустимая для анализа динамики удара. Дополнительные факторы: температурный дрейф чувствительности (до $0,02\%/^\circ\text{C}$ у пьезокерамики), перекрестная чувствительность ($<3-5\%$), импеданс предусилителя заряда и паразитные емкости кабельных трасс. В условиях высоких ускорений проявляется эффект пьезоэлектрического просачивания и нелинейная зависимость выхода от скорости нарастания импульса (dA/dt). При использовании отечественных датчиков рекомендуется учитывать особенности калибровочных сертификатов, выдаваемых по ГОСТ Р 8.798-2012, где погрешность указывается в расширенном виде с коэффициентом покрытия $k = 2$.

Выводы

В результате проведенных исследований были разработаны основные принципы создания акселерометров для измерения ударно-вибрационных нагрузок при измельчении горных пород в мельницах различных типов.

1. Запас по диапазону: задавать $A_{\max}$ с запасом $20-30\%$ от ожидаемого пикового ускорения с учетом возможных отражений и резонансов конструкции.

2. Частотное согласование: обеспечивать $f_r \geq 3 \cdot f_{\max}$ спектра ударного сигнала. При необходимости точного восстановления формы импульса применять цифровую инверсную фильтрацию амплитудно-частотной характеристики.

3. Монтаж и импеданс: жесткое крепление (шпилька, резьба) сохраняет паспортную f_r . Клей, магниты или восковые площадки снижают резонансную частоту на $15-40\%$ и вносят нелинейность.

4. Согласование электроники: использовать предусилители заряда с входным сопротивлением $>10^9 \text{ Ом}$ и полосой пропускания, превышающей f_{work} на 20% . Кабели с низкой емкостью ($<100 \text{ пФ/м}$) минимизируют затухание высокочастотных компонент.

5. Верификация и калибровка: перед эксплуатацией проводить ударную калибровку на стенде с лазерной интерферометрией (по ISO 16063-11/ГОСТ Р 8.798). При использовании продукции отечественных производителей (ООО «ГлобалТест» и др.) рекомендуется запрашивать протоколы первичной поверки в аккредитованных лабораториях Росстандарта, что обеспечивает прослеживаемость измерений к государственным эталонам.

6. Импортозамещение и адаптация: при переходе на российские аналоги следует учитывать различия в стандартизации разъемов, требованиях к ЭМС и условиях эксплуатации. Многие отечественные датчики поставляются с встроенными платами согласования и поддержкой цифровых интерфейсов (RS-485, CAN), что упрощает интеграцию в отечественные системы сбора данных.

Установлено, что характеристики ударных акселерометров образуют жестко связанную систему компромиссов. Чувствительность и диапазон измерений обратно пропорциональны, рабочий частотный диапазон ограничен резонансной частотой, а точность напрямую зависит от согласования параметров датчика с динамическим спектром воздействия. Игнорирование этих зависимостей приводит к систематическим погрешностям, искажению формы импульса и ложной интерпретации данных. Анализ показывает, что современные отечественные решения, в частности продукция ООО «ГлобалТест», соответствуют базовым метрологическим закономерностям и обеспечивают конкурентоспособные параметры в диапазонах $5000-100\,000 \text{ г}$ при резонансных частотах $25-90 \text{ кГц}$. Перспективные направления развития включают разработку MEMS-акселерометров с адаптивным демпфированием, цифровую компенсацию частотных искажений на уровне встроенных процессоров, а также многопараметрическую

оптимизацию на основе методов машинного обучения для автоматического подбора датчиков под специфические ударные профили. Ускорение локализации производства и гармонизация отечественных стандартов с международными метрологическими требованиями позволят повысить воспроизводимость ударных измерений в научно-технических и промышленных задачах.

Заключение

Все вышеперечисленные соображения легли в основу разработки методики испытаний ударного акселерометра.

Для проведения испытаний ударного акселерометра в соответствии с ГОСТ

52931-2008 была разработана Методика поверки ударного акселерометра (Приложение 1 к отчету), в основе которой содержатся требования и условия, разработанные ООО «ГлобалТест» в 2022 г. для поверки вибропреобразователей АР1022.

Отличительной особенностью разработанной Методики является учет особенностей условий, возникающих в помольных камерах мельниц различных типов при измельчении горных пород: ударные ускорения, частота и амплитуда ударных импульсов, их значения, габариты акселерометра, возможность записи на флэш-память, работа с источником питания и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитрак Ю. В., Кравцов А. А., Адамова Л. С., Кутуев Р. Р., Цыганов А. Е. О влиянии метода математического моделирования движения мелющей загрузки в помольных камерах мельниц на точность и достоверность получаемых результатов / Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2025): Материалы международной конференции. — Екатеринбург: Изд-во «Форт-Диалог Исеть», 2025. — С. 97–99.
2. Chanturia V. A., Dmitrak Y. V., Kravtsov A. A., Zadkov D. A., Klyuev R. V., Kondratiev V. V., Karlina A. I., Martyushev N. V. Digital simulation of rock grinding process in ball mill // Scientific Reports. 2025, vol. 15, article 45653. DOI: 10.1038/s41598-025-30289-7.
3. Матмуродов Ф. М., Расулов Н. Ф., Нематова С. Х. Динамическое моделирование функционирования четырех опорных вибрационных мельниц // Universum: технические науки. — 2025. — Т. 2. — № 1 (130). — С. 47–51. DOI: 10.32743/UniTech.2025.130.1.19212.
4. Fonte C. B., Oliveira Jr J. A., de Almeida L. C. DEM-CFD coupling: mathematical modelling and case studies using ROCKY-DEM and ANSYS Fluent / Proceedings of the 11th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia. 2015, pp. 7–9.
5. Cveticanin L., Ismail G. M. Higher-order approximate periodic solution for the oscillator with strong nonlinearity of polynomial type // The European Physical Journal Plus. 2019, vol. 134, no. 6, article 266. DOI: 10.1140/epjp/i2019-12621-3.
6. Isoletta G., Cuomo F., Opromolla R., Fasano G. Characterization of space objects' attitude motion using Lomb-Scargle Periodogram / Aerospace Europe Conference 2023 — 10th EUCASS — 9th CEAS. 2023, pp. 1–15. DOI: 10.13009/EEUCASS2023-754.
7. Редюшев А. А., Козлов Н. И., Цыганов А. Е. Научный анализ теоретических и экспериментальных исследований по определению параметров ударных импульсов с применением различных типов чувствительных элементов // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 661–673. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1331-1341.
8. Yan Qin, Chun Liu, Xiaoyu Zhang, Xingang Wang A three-dimensional discrete element model of triaxial tests based on a new flexible membrane boundary // Scientific Reports. 2021, vol. 11, no. 1, article 4753. DOI: 10.1038/s41598-021-84224-7.
9. Gautschi G. Piezoelectric sensors / Piezoelectric Sensorics: Force Strain Pressure Acceleration and Acoustic Emission Sensors Materials and Amplifiers. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 73–91.
10. Foss G., Meloy J., Valentino M., Walter P. Sensors and their signal conditioning for dynamic acceleration, force, pressure, and sound applications / Handbook of Experimental Structural Dynamics. Springer, New York, 2022, pp. 1–57. DOI: 10.1007/978-1-4939-6503-8_33-1.

11. Yang F., Kong D., Kong L. Accurate measurement of high-frequency blast waves through dynamic compensation of miniature piezoelectric pressure sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018, vol. 283, pp. 344–352. DOI: 10.1016/j.sna.2018.09.055.
12. Богуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. — М.: Техносфера, 2014. — 312 с.
13. Окадзак К. Технология керамических диэлектриков. Пер. с японского. — М.: Энергия, 1976. — 336 с.
14. Дмитрак Ю. В., Кравцов А. А., Адамова Л. С., Кутуев Р. Р., Цыганов А. Е. Научный анализ математических моделей движения мелющей загрузки в помольных камерах мельниц различных типов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2025. — № 9-1. — С. 53–72. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_53.
15. Wang G., Li Y., Cui H., Yang X., Yang C. Research on piezoelectric pressure sensor for shock wave load measurement // *ISA Transactions*. 2020, vol. 104, pp. 382–392. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.05.018.
16. Zhang C., Chen Y., Wang Y., Bai Q. Discrete element method simulation of granular materials considering particle breakage in geotechnical and mining engineering: A short review // *Green and Smart Mining Engineering*. 2024, vol. 1, no. 2, pp. 190–207.
17. Wang G., Li Y., Cui H., Yang X., Yang C. Acceleration self-compensation mechanism and experimental research on shock wave piezoelectric pressure sensor // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021, vol. 150, article 107303. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107303.
18. Локтионов А. П. Измерительно-полиномиальная обработка входных данных вычислительной системы // *Известия Юго-Западного государственного университета*. — 2025. — Т. 28. — № 4. — С. 21–39. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-4-21-39.
19. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
20. Кирпичёв А. А. Повышение эффективности вибродиагностики с использованием пьезоэлектрических и вихретоковых преобразователей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГУПИ, 2006. — 22 с. **VIAS**

REFERENCES

1. Dmitrak Yu. V., Kravtsov A. A., Adamova L. S., Kutuev R. R., Tsyganov A. E. On the influence of the method of mathematical modeling of the grinding charge motion in mill grinding chambers on the accuracy and reliability of the results obtained. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnogo i netraditsionnogo mineral'nogo syr'ya (Plakinskie chteniya — 2025): Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Innovative processes of complex and deep processing of natural and unconventional mineral raw materials (Plaksin Readings — 2025), Materials of the international conference], Ekaterinburg, 2025, pp. 97–99. [In Russ].
2. Chanturia V. A., Dmitrak Y. V., Kravtsov A. A., Zadkov D. A., Klyuev R. V., Kondratiev V. V., Karlina A. I., Martyushev N. V. Digital simulation of rock grinding process in ball mill. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 45653. DOI: 10.1038/s41598-025-30289-7.
3. Matmurodov F. M., Rasulov N. F., Nematova S. Kh. Dynamic modeling of the functioning of four-support vibratory mills. *Universum: Technical Sciences*. 2025, vol. 2, no. 1 (130), pp. 47–51. [In Russ]. DOI: 10.32743/UniTech.2025.130.1.19212.
4. Fonte C. B., Oliveira Jr J. A., de Almeida L. C. DEM-CFD coupling: mathematical modelling and case studies using ROCKY-DEM and ANSYS Fluent. *Proceedings of the 11th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia. 2015, pp. 7–9.
5. Cveticanin L., Ismail G. M. Higher-order approximate periodic solution for the oscillator with strong nonlinearity of polynomial type. *The European Physical Journal Plus*. 2019, vol. 134, no. 6, article 266. DOI: 10.1140/epjp/i2019-12621-3.
6. Isoletta G., Cuomo F., Oromolla R., Fasano G. Characterization of space objects' attitude motion using Lomb-Scargle Periodogram. *Aerospace Europe Conference 2023 — 10th EUCASS — 9th CEAS*. 2023, pp. 1–15. DOI: 10.13009/EEUCASS2023-754.
7. Redushev A. A., Kozlov N. I., Tsiganov A. E. Scientific analysis of theoretical and experimental studies on the determination of shock pulse parameters using various types of sensing elements. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 661–673. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1331-1341.

8. Yan Qin, Chun Liu, Xiaoyu Zhang, Xingang Wang A three-dimensional discrete element model of triaxial tests based on a new flexible membrane boundary. *Scientific Reports*. 2021, vol. 11, no. 1, article 4753. DOI: 10.1038/s41598-021-84224-7.

9. Gautschi G. Piezoelectric sensors. *Piezoelectric Sensorics: Force Strain Pressure Acceleration and Acoustic Emission Sensors Materials and Amplifiers*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 73 – 91.

10. Foss G., Meloy J., Valentino M., Walter P. Sensors and their signal conditioning for dynamic acceleration, force, pressure, and sound applications. *Handbook of Experimental Structural Dynamics*. Springer, New York, 2022, pp. 1 – 57. DOI: 10.1007/978-1-4939-6503-8_33-1.

11. Yang F., Kong D., Kong L. Accurate measurement of high-frequency blast waves through dynamic compensation of miniature piezoelectric pressure sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018, vol. 283, pp. 344 – 352. DOI: 10.1016/j.sna.2018.09.055.

12. Bogush M. V. *Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektrotermouprugikh modeley* [Design of piezoelectric sensors based on spatial electrothermoelastic models], Moscow, Tekhnosfera, 2014, 312 p.

13. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov*. Per. s yaponskogo [Technology of ceramic dielectrics. Translated from Japanese], Moscow, Energiya, 1976, 336 p.

14. Dmitrak Iu. V., Kravtsov A. A., Adamova L. S., Kutuev R. R., Tsiganov A. E. Scientific analysis of mathematical models of charge motion in grinding chambers of various-type mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 9-1, pp. 53 – 72. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_53.

15. Wang G., Li Y., Cui H., Yang X., Yang C. Research on piezoelectric pressure sensor for shock wave load measurement. *ISA Transactions*. 2020, vol. 104, pp. 382 – 392. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.05.018.

16. Zhang C., Chen Y., Wang Y., Bai Q. Discrete element method simulation of granular materials considering particle breakage in geotechnical and mining engineering: A short review. *Green and Smart Mining Engineering*. 2024, vol. 1, no. 2, pp. 190 – 207.

17. Wang G., Li Y., Cui H., Yang X., Yang C. Acceleration self-compensation mechanism and experimental research on shock wave piezoelectric pressure sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021, vol. 150, article 107303. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107303.

18. Loktionov A. P. Measuring-polynomial processing of input data of a computing system. *Proceedings of the Southwest State University*. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 21 – 39. [In Russ]. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-4-21-39.

19. Sharapov V. M., Musienko M. P., Sharapova E. V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors], Moscow, Tekhnosfera, 2006, 632 p.

20. Kirpichev A. A. *Povyshenie effektivnosti vibrodiagnostiki s ispol'zovaniem p'ezoelektricheskikh i vikhretokovykh preobrazovateley* [Improving the efficiency of vibration diagnostics using piezoelectric and eddy current transducers], Candidate's thesis, Moscow, 2006, 22 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Редюшев Андрей Андреевич¹ — директор, e-mail: redushev@globaltest.ru,

Козлов Никита Игоревич¹ — исполнительный директор,
главный конструктор, e-mail: mail@globaltest.ru,

Цыганов Алексей Евгеньевич¹ — инженер-конструктор, e-mail: cyganov@globaltest.ru,

¹ ООО «ГлобалТест».

Для контактов: Редюшев А.А., e-mail: redushev@globaltest.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Redushev¹, Director, e-mail: redushev@globaltest.ru,

N.I. Kozlov¹, Executive Director, Chief Designer, e-mail: mail@globaltest.ru,

A.E. Tsiganov¹, Design Engineer, e-mail: cyganov@globaltest.ru,

¹ LLC GlobalTest, 607185, Sarov, Russia.

Corresponding author: A.A. Redushev, e-mail: redushev@globaltest.ru.

Получена редакцией 01.07.2026; получена после рецензии 10.08.2026; принята к печати 10.10.2026.

Received by the editors 01.07.2026; received after the review 10.08.2026; accepted for printing 10.10.2026.