ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(12):161-170
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.734; 534.5; 534.14 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_161

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ, СОСТАВЛЯЮЩИХ ОСНОВУ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ В МЕЛЬНИЦАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

А.А. Редюшев[1], Н.И. Козлов[1], А.Е. Цыганов[1]

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

Аннотация: Представлен обзор отечественных и зарубежных источников информации о малогабаритных вибропреобразователях, включая перспективы использования современных пьезоматериалов. Определены тенденции развития исследуемого объекта техники, а именно – особенностей новых конструкций и технологий изготовления малогабаритных вибропреобразователей с повышенной чувствительностью в ультразвуковом диапазоне частот для регистрации высокочастотных составляющих сигналов при измерении нагрузок до 20 000 g с включением исследований перспективных пьезоматериалов. Рассмотрены требования, предъявляемые к вибропреобразователям с повышенной чувствительностью и с выносными малошумящими предварительными усилителями сигналов, работающих в требуемом частотном диапазоне. Определены близкие к объекту исследования разработки, которые могут быть использованы в объекте исследования. Представлены результаты информационно-аналитических исследований возможностей создания малогабаритных вибропреобразователей с повышенной чувствительностью для регистрации высокочастотных составляющих сигналов при измерении нагрузок до 20 000 g. Приведены конструктивные и динамические схемы датчиков, динамические схемы преобразователей.

Ключевые слова: мельницы различных типов, малогабаритные вибропреобразователи, пьезоматериалы, усилители сигналов, конструктивные и динамические схемы датчиков, динамические схемы преобразователей, уравнения состояния пьезоэлектрических преобразователей, уравнения колебаний пьезокерамических тел, чувствительный элемент.

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.* Научное обоснование выбора оптимальных параметров сборочных единиц, составляющих основу виброизмерительного оборудования для определения параметров ударных импульсов мелющей загрузки в мельницах различных типов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 12. – С. 161–170. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_161.

© А.А. Редюшев, Н.И. Козлов, А.Е. Цыганов. 2026.

Scientific foundation of selecting optimal parameters for the assembly units that form the core of vibration measurement equipment intended for determining the shock impact parameters of the grinding media in various types of mills

A.A. Redushev[1], N.I. Kozlov[1], A.E. Tsiganov[1]

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

Abstract: A review of Russian and foreign sources on compact vibration transducers is presented, including the perspective applications of advanced piezoelectric materials. Development trends of the technical object under study are identified, namely the features of new designs and fabrication technologies for compact vibration transducers with enhanced sensitivity in the ultrasonic frequency range, intended for recording high-frequency signal components when measuring loads up to 20,000 g and incorporating research on advanced piezoelectric materials. The requirements imposed on vibration transducers with enhanced sensitivity and remote low-noise preamplifiers operating in the required frequency range are considered. Developments close to the object of study that can be utilized in the object of study are identified. The results of analytical studies on the feasibility of creating compact vibration transducers with enhanced sensitivity for recording high-frequency signal components and loads up to 20,000 g are presented.

Key words: mills of different types, compact vibration transducers, piezoelectric materials, signal amplifiers, constructional and dynamic sensor scheme, dynamic transducer scheme, piezoelectric transducer equations of state, equations of piezoceramic bodies oscillations, sensor.

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. Scientific foundation of selecting optimal parameters for the assembly units that form the core of vibration measurement equipment intended for determining the shock impact parameters of the grinding media in various types of mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(12):161-170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_161.

Введение

Снижение энергоемкости процесса измельчения горных пород является ключевым вопросом в решении задачи снижения энергозатрат при реализации технологических процессов, связанных с обогащением полезных ископаемых [1]. Решить эту задачу можно только измерив истинные динамические параметры отдельных мелющих тел в помольной камере мельниц различных типов [2, 3]. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость создания нового инновационного оборудования, позволяющего вести измерения непосредственно в зоне контакта мелющих тел — шаров. Логично, что замерить величины соударения шаров можно только превратив отдельный шар в виброизмерительное устройство. Ключевым элементом этого устройства должен являться ударный акселерометр, обладающий малыми габаритами и способный регистрировать высокочастотные составляющие сигналов при измерении нагрузок до 20 000 *g* [4].

За последние годы наибольшая активность в области создания малогабаритных вибропреобразователей наблюдалась в Китае, США, Южной Корее

[5 — 8]. В Российской Федерации такие исследования практически не проводились, что явилось отрицательным фактором в решении вышеуказанной проблемы. Поэтому целью исследований, представленных в настоящей работе, является научное обоснование создания новых конструкций и технологий изготовления малогабаритных вибропреобразователей с повышенной чувствительностью в ультразвуковом диапазоне частот для регистрации высокочастотных составляющих сигналов при измерении нагрузок до 20 000 *g* с включением исследований перспективных пьезоматериалов для выбора оптимальных параметров сборочных единиц, составляющих основу виброизмерительного оборудования для определения параметров ударных импульсов мелющей загрузки в мельницах различных типов.

Методы

Создание пьезоэлектрических датчиков механических величин является весьма сложной специфической задачей измерительной техники. При создании пьезоэлектрических датчиков механических величин используются достижения различных отраслей науки и техники: механики, физики, электротехники и др. [9, 10].

Пьезоэлектрический датчик механических величин представляет собой механо-электрический преобразователь, предназначенный для преобразования механической энергии колебаний поверхности контролируемого объекта в месте установки датчика (механической энергии колебаний частиц жидкой или газообразной среды) в энергию электрического сигнала для дальнейшей обработки. Данное определение отличается от расширенной трактовки термина «датчик физических величин», который используется в отечественной и зарубежной технической литературе [11 — 13] и включает в состав звенья преобразования измеряемой величины, без которых функция преобразования утрачивает свою полноту и определенность.

В приведенной классификации отсутствует виброметрический режим работы, характеризующийся тем, что собственная частота датчика находится ниже рабочего диапазона частот, что позволяет реализовать широкий рабочий частотный диапазон и высокий коэффициент преобразования. Однако неизмеряемые низкочастотные колебания вызывают дополнительные собственные колебания, наложенные на основную запись, что затрудняет последующий анализ. Только при достаточном демпфировании (коэффициент потерь £ = 0,6 — 1,4) возникающие собственные колебания быстро затухнут. По этой причине данный режим работы датчиков в настоящее время практически не используется, поскольку применение демпферов усложняет конструкцию датчиков, а искаженная собственными колебаниями запись требует более сложного алгоритма обработки данных, фильтрации низкочастотных колебаний и т.п. [14].

Данная общая классификация может быть усложнена внутри каждого типа датчика, однако многие конструктивно-компоновочные параметры, такие как форма и соотношения размеров чувствительного элемента (ЧЭ), часто приводимые в различных классификациях, имеют вторичную природу либо несущественны, как, например, крепление с помощью болта, проходящего через отверстие в корпусе датчика, или резьбового хвостовика, выполненного заодно с корпусом. При этом конструктивные различия между пьезодатчиками разных модификаций в такой же степени велики, в какой и ограничены технологичными формами (в виде тел вращения) и способами изготовления, применяемыми в массовом производстве (литье,

прессование, штамповка, резьбовые соединения и т.п.) [15].

Результаты

Конструктивные и динамические схемы датчиков

В настоящем разделе приведен краткий обзор известных конструктивных схем преобразователей различного типа. Можно наглядно увидеть их общие черты, объединяющие датчики в один класс приборов инерционного действия, и их различия, в первую очередь, по виду механических деформаций пьезо-электрического элемента (ПЭ) и форме ЧЭ.

Приведенные динамические модели датчиков дополняют конструктивные схемы (КС) и позволяют оценить реакцию датчиков на механическое возмущение в месте их крепления [16].

На приведенных КС датчиков (рис. 1) приняты следующие обозначения: 1 — пьезоэлемент; 2 — инерционный элемент; 3 — корпус; 4 — пружина; 5 — изолятор; 6 — электрические выводы; 7 — упругая мембрана; 8 — гайка; 9 —

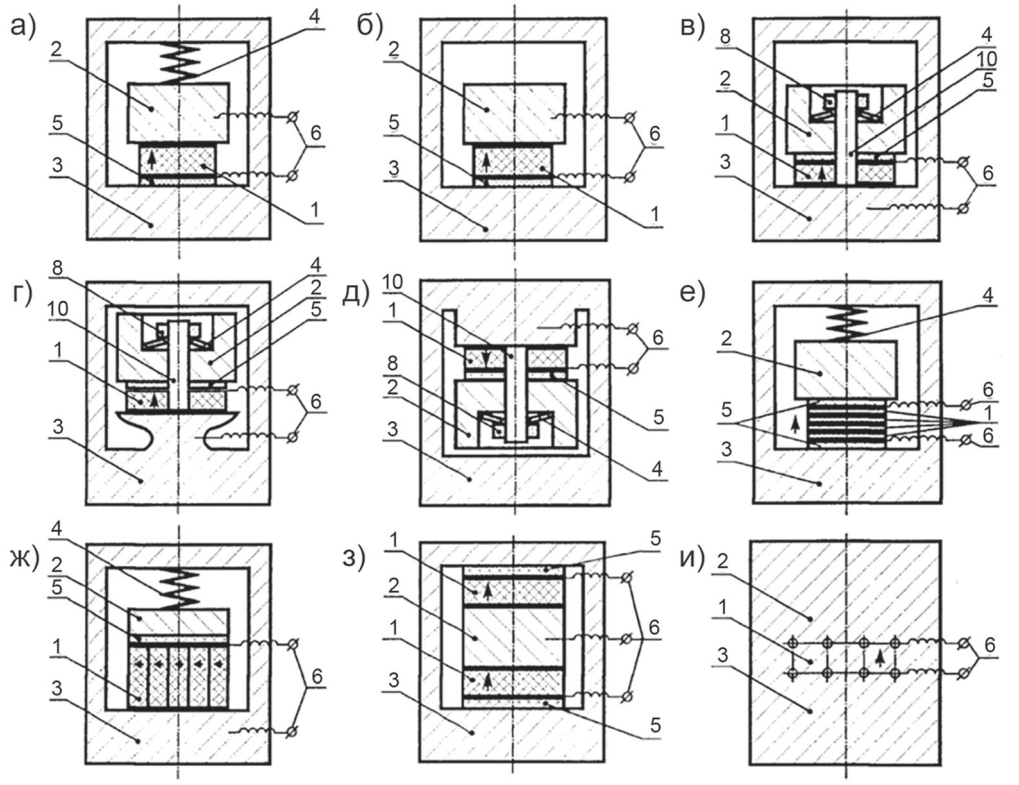


Рис. 1. Принципиальные конструктивные схемы ПА компрессионного типа: ПА с ЧЭ, с пружинным закреплением (а); ПА с жестким креплением ЧЭ (б); ПА с центральной направляющей ЧЭ (в); ПА с центральной направляющей ЧЭ и колоколообразной опорой (г); «обратно расположенный» ПА с центральной направляющей ЧЭ (д); ПА с блоком последовательно расположенных ЧЭ, с пружинным закреплением (е); ПА с блоком последовательно и поперечно расположенных ЧЭ (ж); ПА с ЧЭ, разделенными твердой прокладкой (з); твердотельный ПА (и)

Fig. 1. Structural schemes of compressional piezoelectric accelerometer: PA with spring-fixed sensor (a); PA with hard-fixed sensor (b); PA with central sensor conductor (v); PA with central sensor conductor and bell-shaped support (g); reverse PA with central sensor conductor (d); PA with series of serial spring-fixed sensors (e); PA with serial and parallel sensors (g); PA with sensor separated with solid pad (z); solid-state PA (i)

прокладка; 10 — опорный стержень; 11 — стяжное кольцо; 12 — стяжной болт; 13 — стойка; 14 — резонатор; 15 — изолирующая втулка; 16 — крышка корпуса; 17 — электрические контакты; 18 — соединитель.

На КС не показаны крепежные и другие вспомогательные конструктивные элементы сжатия — растяжения пьезоэлемента.

Пьезоакселерометры (ПА) компрессионного типа (рис. 1) характеризуются простотой конструкции, технологичностью и пригодностью к массовому производству.

В силу этих свойств они получили наибольшее распространение в различных областях науки и техники, включая автомобильную промышленность (датчики для измерения вибрации и удара, датчики детонации и др.).

К достоинствам рассматриваемых ПА следует также отнести: большую прочность, надежность и высокую собственную частоту (до 50—200 кГц). Так, например, ПА на рис. 1, а имеет высокую погрешность измерений, обусловленную нежелательной чувствительностью к акустическому давлению и деформации, действующим на корпус ПА [17]. Применение жесткого и, соответственно, массивного корпуса снижает суммарную погрешность измерений, но не устраняет отмеченные недостатки. По этой причине большее распространение получили ПА по КС (рис. 1, *б–д*), в которых за счет устранения связи между ЧЭ и крышкой корпуса и некоторых технических усовершенствований паразитные эффекты проявляются меньше. К примеру, за счет особой формы основания (см. КС на рис. 1, *г*) разработчикам ПА удалось уменьшить деформационную чувствительность примерно в 20—40 раз [18].

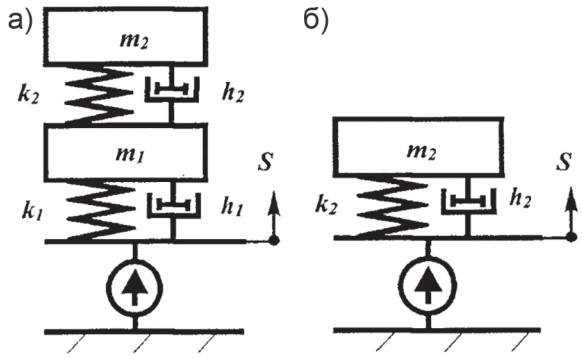
На представленных КС пьезоэлементы показаны в виде кольца или диска, но они могут быть и другой формы. Для повышения чувствительности, например, используют ЧЭ в виде многослойного пакета с параллельным или последовательным электрическим соединением нескольких пьезоэлементов (см. рис. 1, *е*). Возможно также применение поперечного пьезоэффекта (рис. 1, *ж*) или неоднородной поляризации пьезоэлементов как по толщине, так и по диаметру. Тендем-датчики (рис. 1, *з*) обладают некоторой взаимокомпенсацией неизмеряемых линейных и угловых компонент вибрации, а также возможностью уменьшения влияния технологических неточностей изготовления ПА.

Динамические схемы преобразователей

Для того чтобы понять принцип работы датчика или оценить его работоспособность в тех или иных условиях, достаточно проанализировать КС с учетом действующих на корпус физических факторов, сопровождающих эксплуатацию контролируемого объекта. Однако статическая картина КС нередко может быть обманчивой даже с учетом правильно переданных на рисунке соотношений размеров элементов датчика.

Упрощенные динамические модели преобразователей представлены на рис. 2. К этой схеме сводятся большинство пьезоэлектрических преобразователей механических величин. Данной модели, в первом приближении, соответствуют и датчики резонансного и полурезонансного типа, использующие деформации изгиба. Однако такое моделирование для ЧЭ в виде биморфных (многослойных) мембран приемлемо только для волн длиной, существенно превышающей габаритные размеры преобразователя [19].

Если поперечные размеры ЧЭ окажутся сравнимыми с длиной изгибной волны, то деформация упругого элемента на различных радиусах будет непро-



m_1 – масса корпуса;
m_2 – масса инерционного элемента;
k_1 – коэффициент упругости сопряжения датчика детонации с двигателем внутреннего сгорания (ДВС);
k_2 – коэффициент упругости пьезоэлемента;
h_1 – демпфер, моделирующий диссипативные свойства сопряжения датчика детонации с ДВС;
h_2 – демпфер, моделирующий внутреннее трение материала пьезоэлемента

Рис. 2. Упрощенные динамические схемы датчиков: колебательная система с двумя степенями свободы (а); колебательная система с одной степенью свободы (б)
Fig. 2. Simplified dynamic sensor scheme: two degree of freedom oscillator (a); one degree of freedom oscillator (b)

порциональной расстоянию до контура закрепления, что отразится на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) преобразователя, причем на разных частотах по-разному. Тем не менее, принято считать, что волновой характер распространения колебаний по деталям следует учитывать для датчиков с рабочей частотой свыше 10 кГц. Моделью таких преобразователей является колебательная система с распределенными параметрами (с бесконечно большим числом степеней свободы). При расчете же, например, датчиков детонации, имеющих рабочий частотный диапазон от 6 до 8 кГц, для определения положения колебательной системы с n степенями свободы в любой момент времени достаточно указать n независимых обобщенных координат, физический смысл которых может быть различным [20]. Ниже приводятся численные решения для различных колебательных систем при заданном движении точки опоры, охватывающих практическое большинство динамических моделей пьезоэлектрических датчиков. В большинстве практических случаев расчета целесообразно пренебречь элементами, обладающими относительно малыми механической податливостью, массой и внутренними механическими потерями, и свести ди-

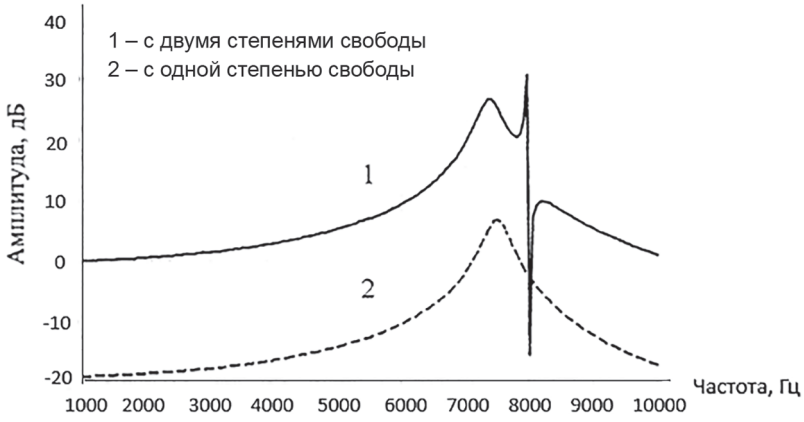


Рис. 3. Расчетные относительные АЧХ колебательных систем
Fig. 3. Calculated relative frequency response of oscillators

намическую модель к колебательной системе с двумя или одной степенью свободы.

Анализ динамических схем позволяет оценить реакцию конструкции на входное механическое возмущение и рассчитать ряд основных характеристик преобразователей, включая АЧХ и коэффициент преобразования. Наличие резонансных пиков в АЧХ преобразователей всегда объясняется попаданием каких-то собственных частот в рабочий частотный диапазон (рис. 3).

АЧХ приведены для режима холостого электрического хода (для наглядности АЧХ колебательной системы с одной степенью свободы смещена по оси ординат на — 20 дБ).

Так, например, в спектре колебательной системы с двумя степенями свободы (см. рис. 3, кривая *1*) содержатся два резонанса, относительное положение которых зависит от соотношения масс m_1 и m_2 и коэффициентов упругости k_1 и k_2. При учете диссипативных сил с помощью демпферов h_1, и h_2 смежные ветви резонансных кривых смыкаются в общую вершину. По мере увеличения диссипативных сил, действующих в системе, вершины резонансных кривых сглаживаются и несколько смещаются. Динамическое моделирование может быть одним из инструментов проектирования различных преобразователей, и особенно датчиков резонансного и полурезонансного типа. Путем изменения параметров колебательной системы, числа степеней свободы можно добиться заданных характеристик датчика: формы АЧХ, полосы пропускания и коэффициента преобразования. В то же время такая расчетная оценка может оказаться недостаточной в силу принятых модельных ограничений. Следует отметить, что при рассмотрении динамических моделей не учтена взаимосвязь преобразователя и контролируемого объекта. Приведенные схемы (см. рис. 2, *а*, *б*) соответствуют случаю крепления датчика на массивную и жесткую стенку. В иных случаях динамические схемы следует дополнить элементами, моделирующими корпус.

Выводы

Анализ эквивалентных колебательных систем с несколькими степенями свободы позволяет сделать следующие выводы относительно применимости этих схем для описания пьезоэлектрических преобразователей:

1. Применение эквивалентных колебательных систем ограничено для описания преобразователей в области резонанса. Поведение системы справедливо для конструкций, размеры которых существенно меньше длины принимаемой волны. Если габаритные размеры преобразователя окажутся сравнимыми с длиной волны, то соответствующие детали колеблются уже не как целые, а как элементы с распределенными параметрами, поскольку их деформация в различных точках зависит от пространственного положения, что непременно ведет к возникновению амплитудных и частотных искажений. В этом случае необходимо учитывать волновой характер распространения колебаний по механическим деталям преобразователя.

2. При совпадении частоты колебаний опоры с собственными частотами системы будут наблюдаться резонансы, общее число которых равно числу степеней свободы. Наличие резонансных пиков в ЛЧХ преобразователей всегда объясняется попаданием каких-то собственных частот в рабочий частотный диапазон.

Заключение

В результате проведенного научного анализа математических моделей движения мелющей загрузки в помольных

камерах мельниц различных типов осуществлено научное обоснование выбора оптимальных параметров сборочных единиц, составляющих основу виброизмерительного оборудования для определения параметров ударных импульсов мелющей загрузки в мельницах различных типов.

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. *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.

4. *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.

5. *Zhang X., Li H., Sun W.* Design considerations for integrated power management in MEMS sensors // IEEE Sensors Journal. 2021, vol. 21, no. 8, pp. 9956 — 9965.

6. *Chen Y., Xu Y.* Performance evaluation of high-precision vibration test systems for MEMS sensors // Microsystems & Nanoengineering. 2021, vol. 7, article 46.

7. *Kim D., Park S.* Recent advances in accelerometer calibration techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021, vol. 70, 3509011.

8. *Gupta P., Kumar S.* Advances in low-noise design for piezoelectric accelerometers // Sensors and Actuators A: Physical. 2021, vol. 320, article 112564.

9. *Rivera C., Martinez J.* Integrated control boards for fiber-optic accelerometers: Design and case studies // Sensors. 2021, vol. 21, article 6194.

10. *Lee Y., Choi K.* A multi-stage filter design for low-power sensor applications // Microsystems & Nanoengineering. 2021, vol. 7, article 87.

11. *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.

12. *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.

13. *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.

14. *Nguyen T., Park H.* Optimization techniques for capacitance-based MEMS sensor circuits // IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 220889 — 220898.

15. *Богуш М. В.* Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. — М.: Техносфера, 2014. — 312 с.

16. *Окадзаки К.* Технология керамических диэлектриков. Пер. с японского. — М.: Энергия, 1976. — 336 с.

17. *Кирпичёв А. А.* Повышение эффективности вибродиагностики с использованием пьезоэлектрических и вихретоковых преобразователей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГУПИ, 2006. — 22 с.

18. *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.

19. *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.

20. *Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В.* Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с. ГИАБ

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 (Plaksinskie 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. 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.

4. 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.

5. Zhang X., Li H., Sun W. Design considerations for integrated power management in MEMS sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2021, vol. 21, no. 8, pp. 9956–9965.

6. Chen Y., Xu Y. Performance evaluation of high-precision vibration test systems for MEMS sensors. *Microsystems & Nanoengineering*. 2021, vol. 7, article 46.

7. Kim D., Park S. Recent advances in accelerometer calibration techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021, vol. 70, 3509011.

8. Gupta P., Kumar S. Advances in low-noise design for piezoelectric accelerometers. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021, vol. 320, article 112564.

9. Rivera C., Martinez J. Integrated control boards for fiber-optic accelerometers: Design and case studies. *Sensors*. 2021, vol. 21, article 6194.

10. Lee Y., Choi K. A multi-stage filter design for low-power sensor applications. *Microsystems & Nanoengineering*. 2021, vol. 7, article 87.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Nguyen T., Park H. Optimization techniques for capacitance-based MEMS sensor circuits. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 220889–220898.

15. 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.

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

17. 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.

18. 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.

19. 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.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Редюшев Андрей Андреевич[1] — директор,
e-mail: redushev@globaltest.ru,
Козлов Никита Игоревич[1] — исполнительный директор,
главный конструктор, e-mail: mail@globaltest.ru,
Цыганов Алексей Евгеньевич[1] — 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. Redushev[1], Director, e-mail: redushev@globaltest.ru,
N.I. Kozlov[1], Executive Director, Chief Designer, e-mail: mail@globaltest.ru,
A.E. Tsiganov[1], 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 10.11.2026.
Received by the editors 01.07.2026; received after the review 10.08.2026; accepted for printing 10.11.2026.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www. gornaya-kniga.ru

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ АНКЕРНЫХ КРЕПЕЙ И ЕГО ИСПЫТАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ
(2026, № 6, СВ 24, 16 с.)

Вознесенский Александр Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, профессор, НИТУ МИСИС,
e-mail: asvoznesenskii@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,
Куткин Ярослав Олегович — канд. техн. наук, доцент, НИТУ МИСИС, e-mail: kutkin.yo@misis.ru,
Минзарипов Рустам Галимжанович — начальник Службы прогнозирования и предотвращения горных ударов,
АО «Североуральский бокситовый рудник» (АО «СУБР»), e-mail: Rustam.Minzaripov@rusal.com,
Николенко Петр Владимирович — д-р техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5126-6576.

A DEVICE FOR MEASURING THE LENGTH OF ANCHOR SUPPORTS AND TESTING THEM UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS

A.S. Voznesenskii[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru, ORCID ID: 0000-0003-0926-1808,
Ya.O. Kutkin[1], Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: kutnew@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2644-3371,
R.G. Minzaripov, Head of the Service for Forecasting and Prevention of Rock Bursts,
Severouralsky Bauxite Mine (JSC «SUBR»), 624480, Severouralsk, Russia, e-mail: Rustam.Minzaripov@rusal.com,
P.V. Nikolenko[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: p.nikolenko@misis.ru, ORCID 0000-0002-5126-6576,
[1] NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.