

ДАТЧИК АКТИВНОЙ УДАРНОЙ СИЛЫ, КОНСТРУКТИВНО СХОДНЫЙ С МАГНИТОУПРУГИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Е.С. Долгих

dolgikh.e@sch2009.net

А.П. Дроздов

aleksandrdrzdov145@sch2009.net

О.М. Лаврушин

lavrushin.o@sch2009.net

П.В. Шпильковский

shpilkovskiy.p@sch2009.net

Инженерно-физическая метрологическая лаборатория ГБОУ «Школа № 2009»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Измерение интенсивных ударных сил представляет большой интерес для исследователей, тем не менее, эта задача до сих пор не имеет надежного решения. Это связано как с отсутствием физического преобразователя, способного работать с контактными ударными силами высокой интенсивности, так и с отсутствием методик динамической тарировки для таких преобразователей. На основе новых данных о поведении ферромагнетиков при динамической деформации удалось использовать преобразователь магнитоупругого типа для измерения активных динамических нагрузок, в том числе ударных контактных сил высокой интенсивности, и разработать для них прототипы методик динамической тарировки.

Ключевые слова

Измерение, метрология, деформация, активные ударные силы, магнитоупругий преобразователь, динамическая тарировка, нагрузочные характеристики, задача Герца

Поступила в редакцию 02.06.2023
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Экспериментальное исследование физических и механических свойств материалов, подвергаемых воздействию интенсивных динамических нагрузок, имеет большое значение. Без этого изучения невозможно последующее построение корректных математических моделей для решения разнообразных прикладных задач в интересах развития материаловедения, техники и обороны.

Процессы динамической деформации, протекающие с критическими и сверхкритическими скоростями, сложны и малоизучены. В результате интенсивной ударно-волновой деформации в материалах могут возникать как обратимые, так и необратимые физические, физико-химические и механические явления: деформация со сверхвысокими скоростями, мгновенный экстремально высокий разогрев, фазовые превращения, изменение электронной структуры, упрочнение твердых тел в ударных волнах, ударное нарушение сплошности (разрушение) и т. п. Для таких процессов характерны очень большие активные силы, воздействующие на чувствительные элементы (ЧЭ) известных средств измере-

ния и выходящие далеко за пределы рабочих диапазонов этих приборов. Поэтому обычные измерительные комплексы и методики измерения активных ударных сил не позволяют получать сколько-нибудь надежные экспериментальные результаты.

В Инженерно-физической метрологической лаборатории (ИФМЛ) при ГБОУ «Школа № 2009» г. Москвы при кураторстве кафедры МТ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся работы по изучению поведения ферромагнитных материалов при их динамической деформации [1–5]. Эти работы позволяют подойти к созданию нового типа датчиков для измерения активных динамических сил, имеющих конструктивное сходство с магнитоупругими преобразователями (МУП) [6–8]. Датчик силы (ДС) имеет стальной монолитный магнитопровод, форма которого адаптирована для конкретных условий применения. В магнитопроводе ДС размещена одна или несколько обмоток для обеспечения рабочего режима магнитомеханических характеристик магнитопровода и для регистрации полезного сигнала.

Проблемы динамической тарировки физических преобразователей. Для ДС снимаемый сигнал пропорционален деформации его ЧЭ. Чувствительным элементом датчика является весь его монолитный стальной корпус. Высокая механическая прочность ЧЭ позволяет, находясь в диапазоне упругих деформаций, регистрировать ударные активные силы высокой интенсивности.

Как правило, каждый датчик является физическим преобразователем [8], преобразующим физическую величину на своем «входе», которую нужно измерить, в другую физическую величину на своем «выходе». Но для того чтобы преобразователь стал датчиком, т. е. прибором количественного измерения входной величины, нужно провести его тарировку.

Тарировка — это процедура, устанавливающая устойчивую во всем диапазоне измерений однозначную связь между параметрами физической величины на входе преобразователя с параметрами физической величины на его выходе.

Простую статическую тарировку можно представить на примере пружинного динамометра. Его тарировка заключается в установлении однозначного соответствия между одномерной величиной — весом, растягивающим пружину, и изменением длины пружины при этом растяжении.

Процедура динамической тарировки намного сложнее [9, 10].

Во-первых, для динамической силы нет меры, а значит, не может быть эталона, и, соответственно, нельзя создать эталонный генератор силы или как-то иначе сравнить две разных силы.

Во-вторых, при динамической тарировке, сопровождающейся волновыми процессами, теряется принцип однозначности. При такой нагрузке ЧЭ преобразователя находится в изменяющемся во времени сложном многомерном напряженно-деформированном состоянии (растяжение-сжатие по трем осям, сдвиг, кручение). А на выходе преобразователя этому многомерному комплексу будет соответствовать одномерное электрическое напряжение. И поскольку нарушение

принципа однозначности принципиально неустранимо, то приходится вводить методические ограничения как по применимости измерительных процедур, так и по методикам обработки полученных экспериментальных результатов.

Есть и другие причины, затрудняющие динамическую тарировку. Поэтому динамическая тарировка — это решение разветвленной системы экспериментальных и аналитических задач, которые начинаются с постановки задачи измерения, определения области применения и используемых допущений для измерительных комплексов и применяемых методик измерения и обработки полученных результатов и т. д.

В ИФМЛ разрабатываются свои способы динамической тарировки:

- тарировка с помощью построения комплекса нагрузочных характеристик;
- тарировка методом сравнения экспериментальных результатов, полученных для простой кинематической схемы, с аналитическим решением задачи механики для той же кинематической схемы.

Построение нагрузочных характеристик ДС, конструктивно сходных с МУП. Нагрузочная характеристика — частный случай тарировки, которая устанавливает соотношение между какими-либо частными параметрами, входного воздействия на входе преобразователя и частными параметрами отклика на выходе. Нагрузочная характеристика отличается от тарировки, как необходимый признак от достаточного. Задача такого способа тарировки состоит в получении достаточного набора нагрузочных характеристик, которые с необходимой надежностью перекрывают технические требования по информативности и точности исследуемого прибора.

Нами были экспериментально получены нагрузочные характеристики для опытного экземпляра ДС, конструктивно сходного с МУП, представленные в виде графических зависимостей пикового значения U_m , снимаемого с ДС электрического сигнала от предконтактной скорости v падающего груза, расчетной силы соударения груза о ЧЭ ДС и зависимость квадрата пикового сигнала U_m^2 от высоты сброса груза, поскольку эти величины связаны с энергией соударения.

Работы выполняли на установке и оборудовании нашей лаборатории с использованием разработанного в ней датчика. Типичный пример осциллограммы ударного процесса показан на рис. 1.

Ударную нагрузку создавали с помощью вертикального копра. Высоту сброса изменяли от 0,1 до 0,7 м, предконтактную скорость — от 1,4 до 3,7 м/с. Ударные процессы регистрировали с помощью нового ДС. По осциллограммам записанных сигналов определяли пиковое значение U_m и ему ставили в соответствие высоту сброса. Полученная при этом нагрузочная характеристика $U_m(v)$ приведена на рис. 2.

Этот опыт показывает, что датчик работоспособен. При монотонном увеличении предконтактной скорости груза так же монотонно увеличивается пиковое значение сигнала.

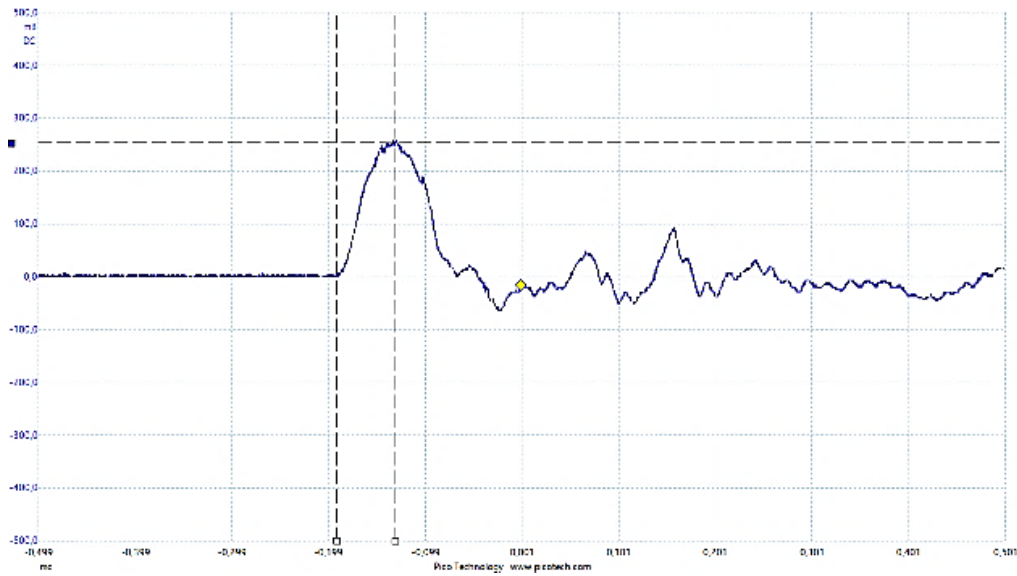


Рис. 1. Оциллограмма ударного процесса, полученная с помощью ДС (скриншот с экрана осциллографа)

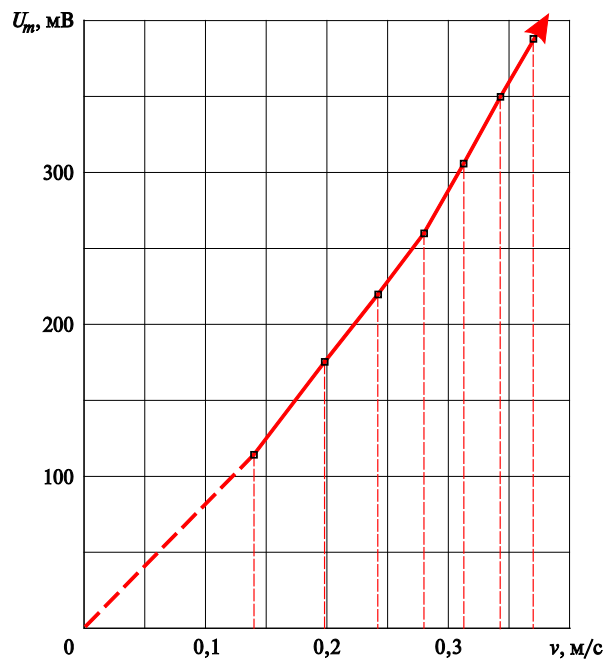


Рис. 2. Нагрузочная характеристика $U_m(v)$:
красная сплошная линия — для экспериментального ДС; красная
пунктирная линия — аппроксимация нагрузочной характеристики

Вторую нагрузочную характеристику будем строить для силы соударения, возникающей при ударном взаимодействии падающей сборки с ЧЭ.

Для расчета силы соударения по ее осциллограмме используем некоторые допущения. Будем считать падающий груз несжимаемым шаром, опору датчика — неподвижной. Под деформацией ЧЭ при соударении $\varepsilon(t)$ будем понимать смещение верхнего торца ЧЭ (т. е. $\varepsilon(t) = \Delta l$), а саму деформацию считать чисто упругой, одноосной и распространяющейся мгновенно. Шар массой m с предконтактной скоростью v_0 ударяет упругий ЧЭ. В момент времени $t_{\text{пф}}$, когда скорость шарика станет равной нулю ($v = 0$), деформация ЧЭ ε_0 будет наибольшей, и при этом упругая сила сжатия будет максимальной.

Мы предполагаем, что сигнал $U(t)$, снимаемый с ЧЭ, пропорционален его деформации $\varepsilon(t)$, поэтому полученная осциллограмма $U(t)$ будет с точностью до масштаба и постоянного коэффициента $1/L$ соответствовать деформации $\varepsilon(t)$.

Чтобы определить пиковую значение деформации ε_0 , соответствующее пиковому значению F_{max} силы сжатия ЧЭ, нужно перейти от зависимости деформации $\varepsilon(t)$ к зависимости $\dot{\varepsilon}(t)$ — скорости деформации, которая, в соответствии с принятыми допущениями, соответствует скорости торможения шара. А для этого следует применить процедуру графического дифференцирования графика $\varepsilon(t)$. Масштаб графика играет роль постоянного коэффициента при графической зависимости и на процедуру дифференцирования не влияет. После дифференцирования получим зависимость $\dot{\varepsilon}(t) = v(t)$, которая будет определять скорость торможения шара.

Подставив в график $v(t)$ числовое значение предконтактной скорости шарика v_0 в момент времени $t = 0$, определимся с масштабом зависимости $v(t)$.

Скорость v_0 получили, зная высоту сброса h :

$$v_0 = \sqrt{2gh}.$$

Далее найдем значение максимальной деформации ε_0 , соответствующей времени $t = t_{\text{пф}}$. Для этого выполним обратное действие — графическое интегрирование. Вычислим определенный интеграл функции $\varepsilon(t)$ на отрезке времени $t: [0; t_{\text{пф}}]$, определив площадь под кривой графика $\varepsilon(t)$, поскольку масштаб по осям T и v уже известен.

Неизвестным остается только модуль упругости ЧЭ датчика $C_{\text{ДС}}$. Модуль упругости определим из закона сохранения энергии. Поскольку потенциальная энергия шарика до начала падения равна полной потенциальной энергии упруго сжатого ЧЭ ДС,

$$mgh = 0,5C_{\text{ДС}}\varepsilon_0^2,$$

откуда

$$C_{\text{ДС}} = \frac{2mgh}{\varepsilon_0^2}.$$

Соответственно, пиковое значение силы

$$F_{\text{max}} = C_{\text{ДС}}(\varepsilon_0).$$

Применим теперь эту методику к исследуемому ДС. С его помощью были записаны осциллограммы ударных процессов, соответствующих сбросу шара с высот от 0,1 до 0,7 м. Затем к ним была применена процедура графического дифференцирования. Далее в соответствии с ранее описанной методикой были определены числовые значения максимальной деформации ЧЭ ϵ_0 , модуля упругости ЧЭ $C_{\text{КДС}}$ и пикового значения активной силы F_{max} . Полученные результаты сведены в табл. 1 и представлены в виде графической зависимости $F_{\text{max}}(h)$. Там же приведены значения энергии шара mgh в зависимости от высоты сброса h , соответствующие пиковые значения сигнала U_m и его квадрата U_m^2 как параметра с точностью до постоянного коэффициента, равного энергии удара.

Таблица 1

Числовые значения максимальной деформации ЧЭ, модуля упругости ЧЭ и пикового значения активной силы

h , м	v_0 , м/с	ϵ_0 , МКМ	$C_{\text{КДС}} \times 10^{-8}$, кг/с ²	F_{max} , кН	mgh , Дж	U_m , В	U_m^2 , В ²	mgh/U_m^2
0,1	1,40	46,2	1,98	91,5	0,588	0,142	0,0202	29,2
0,2	1,98	75,1	1,98	148,7	1,176	0,190	0,0361	32,6
0,3	2,42	94,5	2,02	188,0	1,764	0,234	0,0548	32,2
0,4	2,80	109,8	2,00	220,0	2,352	0,272	0,0740	31,8
0,5	3,13	136,3	1,67	272,0	2,940	0,335	0,1122	26,2
0,6	3,43	160,7	1,63	300,2	3,528	0,368	0,1354	26,1
0,7	3,70	187,6	1,62	323,2	4,116	0,394	0,1552	26,5

На основании табл. 1 построим нагрузочную характеристику $U_m^2(h)$ (рис. 3) и нагрузочную характеристику ДС $F_{\text{max}}(h)$ и $U_m(h)$ (рис. 4).

В отличие от силы ударного взаимодействия, для которой определить истинное значение не представляется возможным, потенциальная энергия шара перед падением известна. Поскольку процесс считается чисто упругим, то по закону Гука наибольшая упругая энергия его сжатия будет пропорциональна квадрату деформации ϵ_0^2 или квадрату пикового значения сигнала датчика U_m^2 . Поэтому энергия упругого сжатия, определяемая величиной, пропорциональной U_m^2 , должна удовлетворять соотношению $U_m^2(h)/h = \text{const}$. Это соотношение позволит интегрально оценить порядок возможной ошибки измерения и выбранной методики расчета. Для этого определим M — среднее значение $U_m^2(h)$ для всех h в экспериментальной выборке $U_m^2(h)/h$:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{U_m^2(h_i)}{h_i}$$

Далее выполним нормировку величин $U_m^2(h_i)/h_i$ по среднему значению M и таким образом сможем комплексно оценить вероятную ошибку этого метода тарирования. Это отклонение, как видно на графике, не превышает 10 % (см. рис. 3).

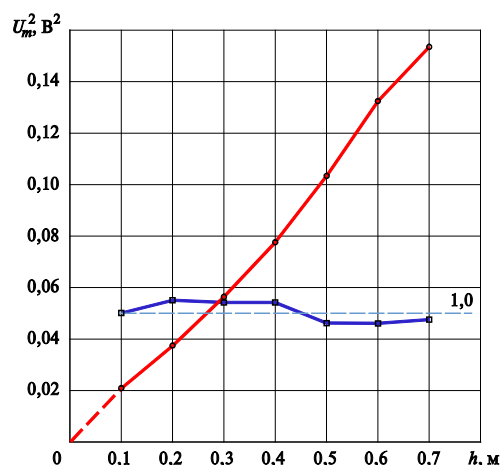


Рис. 3. Нагрузочная характеристика ДС $U_m^2(h)$ (показана красным цветом; синим цветом обозначена расчетная вероятная ошибка измерения)

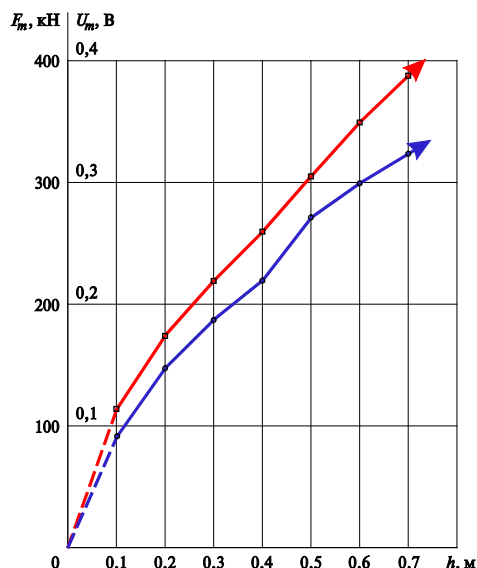


Рис. 4. Нагрузочная характеристика ДС $U_m(h)$ (красная линия) и нагрузочная характеристика ДС $F_{max}(h)$ (синяя линия); пунктиром показаны аппроксимации этих нагрузочных характеристик

Динамическая тарировка датчика ударной активной силы методом сравнения экспериментальных результатов с аналитическим решением. Другим способом динамической тарировки ДС стало сравнение экспериментального результата, полученного при регистрации процесса соударения, с аналитическим решением математической модели соударения, выполненным для этой же кинематической схемы соударения и параметров.

В качестве математической модели соударения выбрали задачу упругого соударения двух шаров, решенную Генрихом Рудольфом Герцем. Выбор этой математической модели определен тем, что, она является самой простой и отработанной, и ее можно реализовать в условиях нашей лаборатории.

На установке ИФМЛ были проведены эксперименты в соответствии с условиями задачи Герца. Закаленные стальные шары диаметром 20...50 мм с шагом 5 мм последовательно сбрасывали с высоты 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 м на чувствительный элемент датчика, который в результате ударной нагрузки формирует электрический сигнал. Скриншоты некоторых осциллограмм, генерируемых ДС при ударе, представлены на рис. 5. Мы предполагаем, что сигнал, снимаемый с датчика

$U(t)$, пропорционален силе соударения $F(t)$. Для проверки этого предположения определим по осциллограммам сигналов их пиковые значения U_m и длительности переднего фронта T_0 (эксп.) и вставим их в соответствующую размеру шара и высоте сброса строку в пятый и шестой столбец табл. 2.

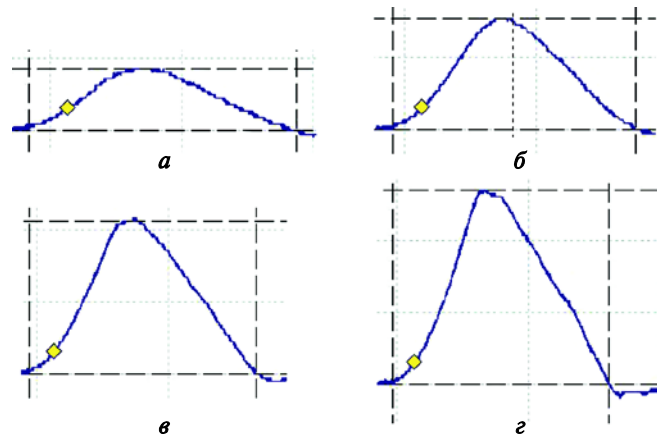


Рис. 5. Скриншоты осциллограмм, полученные при сбросе шара диаметром 35 мм с различной высоты:

a — $h = 0,1$ м, $U_m = 85$ мВ, $t_{\text{нф}} = 43$ мкс; $б$ — $h = 0,3$ м, $U_m = 154$ мВ, $t_{\text{нф}} = 42$ мкс;
 $в$ — $h = 0,5$ м, $U_m = 211$ мВ, $t_{\text{нф}} = 38$ мкс; $г$ — $h = 0,7$ м, $U_m = 270$ мВ, $t_{\text{нф}} = 35$ мкс

В задаче Герца рассматривается случай центрального удара двух шаров с радиусами R_1 и R_2 и массой m_1 и m_2 , движущихся поступательно со скоростями, направленными по прямой, которая соединяет их центры. В силу используемой нами кинематической схемы «удар шара о полуплоскость» будем считать, что второй шар неподвижен, его радиус и масса много больше, чем у первого, и скорость соударения v_0 равна скорости первого шара.

В задаче помимо этих условий были приняты следующие допущения:

- все деформации, возникающие в процессе соударения, абсолютно упругие;
- материалы взаимодействующих объектов изотропны, а значит, все их упругие свойства описываются всего двумя парами параметров — модулями Юнга E_1 , E_2 и коэффициентами Пуассона ν_1 , ν_2 , в рассматриваемом случае из-за схожести материалов шара и наковальни можно считать, что $E_1 = E_2$ и $\nu_1 = \nu_2$;
- деформации малы по сравнению с радиусами кривизны поверхностей;
- местная упругая деформация тел в зонах, примыкающих к точке начального контакта, существенно превышает другие составляющие общей деформации тел;
- силы инерции малы и контактная сила близко соответствует статической упругой силе;
- амплитуда упругих волн в шаре уменьшается очень быстро (как кубическая степень от расстояния), и переотраженные волны на процесс не влияют.

Опуская само процедуру решения этой задачи, перейдем сразу к решениям. Нас интересовало решение этой задачи в отношении параметров, которые мы можем получить из экспериментов, это пиковое значение силы ударного взаимодействия шаров F_{\max} , длительность соударения t_0 пиковое значение давления в центральной точке контакта p_0 , эти решения выглядят следующим образом:

$$F_{\max} = n^{2/5} \left(\frac{5V^2}{4M} \right)^{3/5};$$

$$t_0 = 2,9432 \left(\frac{5}{4MnV^{1/2}} \right)^{2/5};$$

$$p_0 = \frac{3n}{2\pi R} \left(\frac{5V^2}{4nM} \right)^{1/5},$$

где $n = \frac{4\sqrt{R}}{3\pi(k_1 + k_2)}$; $M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$; $R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$, а с учетом наложенных условий для

R_1, R_2, m_1 и m_2 будем иметь: $M = m_1, R = r_1$. Поскольку в качестве материала для шара и полуплоскости использована закаленная сталь, можно считать, что $k_1 =$

$k_2 = k$, где $k = \frac{1 - \nu^2}{\pi E}$; ν — коэффициент Пуассона (для стали $\nu = 0,33$); E — мо-

дуль Юнга (для стали, примерно, $E = 200$ ГПа), и тогда $n = \frac{2\sqrt{R}}{3\pi k}$. Для получения

численных решений аналитической задачи Герца, соответствующих нашему эксперименту, была подготовлена простая программа, листинг которой показан на рис. 6. Получены соответствующие решения для рассмотренных вариантов размера шаров и высоты сброса.

```

1 import math
2 h1 = float(input('Введите высоту в сантиметрах '))
3 d = float(input('Введите диаметр шара в миллиметрах '))
4 m1 = float(input('Введите массу шара в граммах '))
5 h = h1/100
6 m = m1/1000
7 R = d/2/1000
8 M = 1 / m
9 k1 = (1-0.33**2)/(3.14*200*1000000000)
10 V = math.sqrt(2*10*h)
11 n = (4*math.sqrt(R))/(3*3.14*(k1**2))
12 F = (n**(2/5))*(((5*V**2)/(4*M))**(3/5))
13 to = 2.94*((5/(4*M*n*V**(1/2)))**(2/5))
14 Po = ((3*n)/(2*3.14*R))*((5*V**2)/(4*n*M))**(1/2)
15 print('Сила равна: ',F)
16 print('То Равно: ',to)
17 print('Давление равно: ',Po)
18
19

```

Рис. 6. Программа получения численных решений задачи Герца

Сведем все полученные решения для пиковой силы F_{\max} (в табл. 2 $F_{\text{ан}}$), пикового давления в центральной точке контакта p_0 и длительности переднего фронта T_0 (аналит.) и экспериментальные результаты для всех вариантов размера шаров и высоты сброса в табл. 2.

Таблица 2

Числовые значения, полученные в результате эксперимента, и с помощью аналитического решения

Параметры шара (диаметр, масса)	H , м	$F_{\text{ан}}$, кН	p_0 , ГПа	T_0 , мкс (аналит.)	U_m , мВ	T_0 , мкс (эксп.)	$U_m/F_{\text{ан}}$, мВ/кН
20 мм; 32,6 г	0,10	2,58	3,97	65	25	62	9,69
	0,30	4,99	4,96	58	50	81	10,02
	0,50	6,77	5,49	55	74	85	10,93
	0,70	8,29	5,87	54	91	85	10,98
25 мм; 66,7 г	0,10	4,14	4,01	83	36	102	8,70
	0,30	8,01	5,00	74	80	112	9,99
	0,50	10,88	5,54	71	111	116	10,20
	0,70	13,32	5,93	68	134	120	10,06
30 мм; 110,1 г	0,10	5,80	3,98	98	58	109	10,00
	0,30	11,22	4,96	87	100	113	8,91
	0,50	15,25	5,49	83	149	96	9,77
	0,70	18,66	5,87	80	188	91	10,08
35 мм; 175,4 г	0,10	7,92	3,98	114	85	102	10,73
	0,30	15,30	4,96	102	154	93	10,07
	0,50	20,79	5,49	97	211	86	10,15
	0,70	25,44	5,87	94	270	82,7	10,61
40 мм; 261,2 г	0,10	10,33	3,98	130	89	118	8,62
	0,30	19,96	4,96	117	177	110	8,87
	0,50	27,12	5,49	111	262	100	9,66
	0,70	33,19	5,87	107	333	96	10,03
45 мм; 358,2 г	0,10	12,78	3,95	144	96	122	7,51
	0,30	24,70	4,92	129	200	124,3	8,10
	0,50	33,56	5,45	123	289	120	8,61
	0,70	41,07	5,83	119	357	116	8,69
50 мм; 510,5 г	0,10	16,14	3,98	163	111	146	6,88
	0,30	31,20	4,96	146	217	134	6,96
	0,50	42,39	5,49	139	308	148	7,27
	0,70	51,87	5,87	134	388	137	7,48

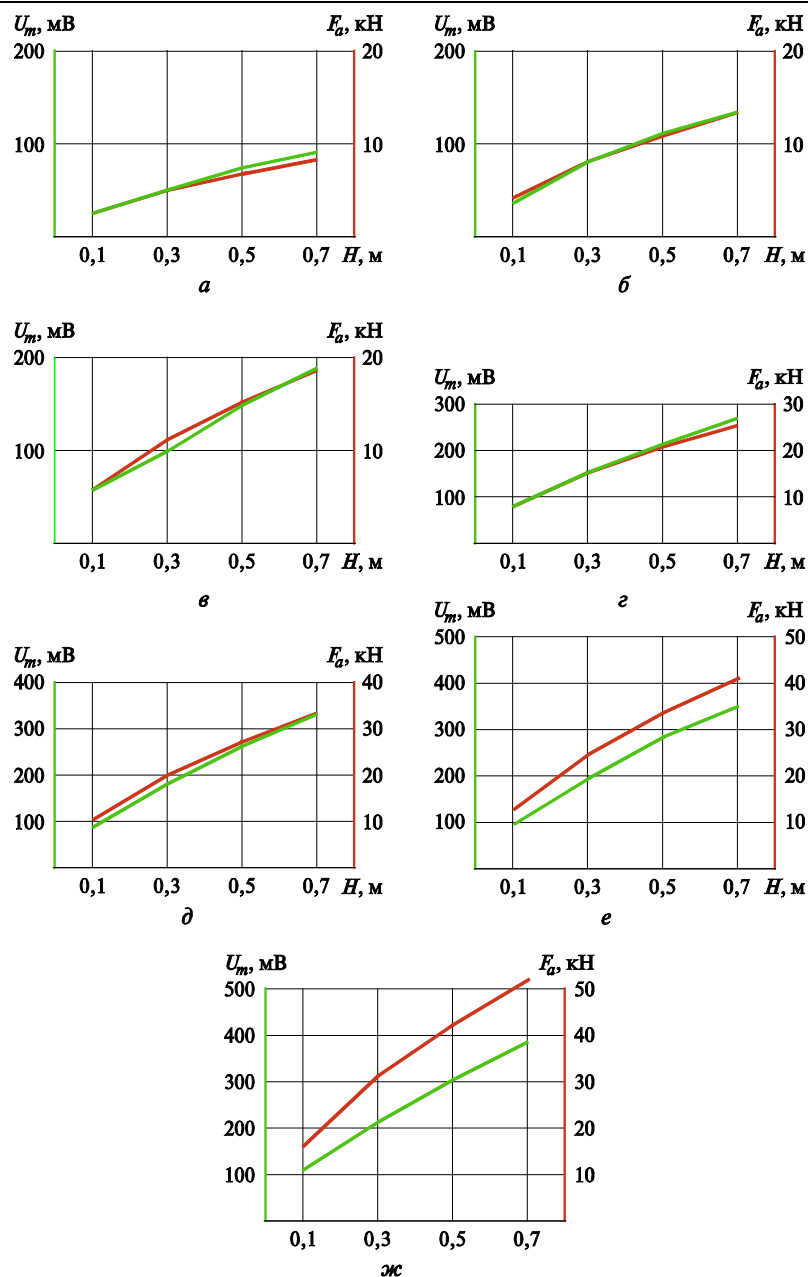


Рис. 7. Сравнительные графики расчетного пикового значения силы соударения F_m (красная линия) и пикового значения U_m сигнала, снятого с датчика (зеленая линия) при сбросе шара диаметром:

а — 20 мм; б — 25 мм; в — 30 мм; г — 35 мм; д — 40 мм; е — 45 мм; ж — 50 мм

В табл. 2 соотношение U_m/F_{an} имеет смысл чувствительности преобразователя. На основании этой таблицы построим сравнительные графики расчетной пиковой величины силы соударения F_m и пикового значения U_m соответствующего ему сигнала, снятого с датчика (рис. 7). Красным цветом на рисунке пока-

зана расчетная (аналитическая зависимость), зеленым — зависимость, полученная из соответствующих пиковых значений $U_m(H)$.

Выводы. Наши работы показали, что новый ДС, конструктивно сходный с МУП, можно применять для измерения динамических нагрузок, что доказано двумя независимыми способами динамической тарировки. Во-первых, способ динамической тарировки с помощью построения нагрузочных характеристик показал, что в исследованном диапазоне ударных нагрузок пиковая величина снимаемого сигнала имела однозначную связь с высотой сброса и предконтактной скоростью груза, силой соударения, а приведенная зависимость $U_m^2(h)$, характеризующая энергию соударения с зависимостью mgh . Во-вторых, с помощью динамической тарировки методом сравнения экспериментальных результатов регистрации процессов ударного нагружения ДС и результатов аналитического решения соударения двух шаров (задача Герца).

Полученные результаты показали очень хорошую сходимость и экспериментальной и аналитической зависимостей для сравнительно невысоких скоростей и массы шара. По мере роста энергии соударения расхождения увеличиваются, поскольку начинают сказываться факторы, исключенные в допущениях, а именно исключение сил инерции, сил диссипативной природы и упруго-волновых возмущений в самом шаре.

Определена чувствительность нового ДС в условиях выбранной рабочей точки его магнитного состояния; для проведенного нами эксперимента она составила около 10,0 мВ/кН.

Литература

- [1] Лаврушин М.Ю. Датчики измерений на основе генераторного эффекта в ферромагнетиках. *Приборы*, 2020, № 5 (239), с. 21–27.
- [2] Лаврушин М.Ю. Датчик для измерения ударных контактных сил. *Инженерно-физические проблемы новой техники. XIV ВНТК: сб. матер.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 51–55.
- [3] Лаврушин М.Ю. Исследование процессов высокоскоростной деформации контактным датчиком силы. *Инженерно-физические проблемы новой техники. XIV ВНТК: сб. матер.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, с. 56–58.
- [4] Лаврушин М.Ю. Исследование поведения ферромагнетика при динамической деформации на примере инвара 44НХТЮ. *Приборы*, 2022, № 10 (268), с. 54–62.
- [5] Лаврушин М.Ю. Новый прибор для измерения ударной активной силы, конструктивно сходный с магнитоупругими преобразователями. *Приборы*, 2022, № 10 (268), с. 45–53.
- [6] Бауманн Э. *Измерение сил электрическими методами.* Москва, Мир, 1978, 430 с.
- [7] Шишкинский В.И. *Магнитоанизотропные монолитные силоизмерители.* Москва, Машиностроение, 1981, 80 с.
- [8] Харкевич А.А. *Теория преобразователей: избранные труды.* В 3 т. Т. 1. Москва, Наука, 1973, с. 52–217.

Датчик активной ударной силы, конструктивно сходный с магнитоупругими преобразователями

- [9] Кольский Г. *Волны напряжения в твердых телах*. Москва, Иностранная литература, 1955, 194 с.
- [10] ГОСТ ИСО 5347-0-95. *Межгосударственный стандарт. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара*. Москва, Издательство стандартов, 1995, 29 с.

Долгих Евгений Сергеевич — ученик 10-го А класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Дроздов Александр Павлович — ученик 9-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Лаврушин Олег Михайлович — ученик 9-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Шпильковский Павел Васильевич — ученик 11-го А класса, ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Лаврушин Михаил Юрьевич научный руководитель Инженерно-физической метрологической лаборатории ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Долгих Е.С., Дроздов А.П., Лаврушин О.М., Шпильковский П.В. Датчик активной ударной силы, конструктивно сходный с магнитоупругими преобразователями. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 10 (87).

<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-10-943>

ACTIVE IMPACT FORCE SENSOR STRUCTURALLY SIMILAR TO THE MAGNETOELASTIC TRANSDUCERS

E.S. Dolgikh

A.P. Drozdov

O.M. Lavrushin

P.V. Shpilkovskiy

dolgikh.e@sch2009.net

aleksandrdrozdov145@sch2009.net

lavrushin.o@sch2009.net

shpilkovskiy.p@sch2009.net

Engineering and Physical Metrology Laboratory, State Budgetary Educational Institution "School No. 2009", Moscow, Russian Federation

Abstract

The intense impact forces measurement is of significant interest to researchers; however, this problem still does not have a reliable solution. This is due to both the missing physical transducer capable of working with the high-intensity contact impact forces and the missing dynamic calibration techniques for such transducers. Based on new data on the ferromagnets behavior under the dynamic deformation, it became possible to use a magnetoelastic type transducer to measure the active dynamic loads, including the high-intensity impact contact forces, and develop prototypes of the dynamic calibration techniques for them.

Keywords

Measurement, metrology, deformation, active impact forces, magnetoelastic transducer, dynamic calibration, load characteristics, Hertz problem

Received 02.06.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Lavrushin M.Yu. Measurement sensors based on the generator effect in ferromagnets. *Instruments*, 2020, no. 5 (239), pp. 21–27. (In Russ.).
- [2] Lavrushin M.Yu. Datchik dlya izmereniya udarnykh kontaknykh sil [Sensor for measuring impact contact forces]. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki. XIV VNTK: sb. mater.* [Engineering and physical problems of new technology. XIV VNTK: collection of materials]. Moscow, BMSTU Press, 2020, pp. 51–55. (In Russ.).
- [3] Lavrushin M.Yu. Issledovanie protsessov vysokoskorostnoy deformatsii kontaktnym datchikom sily [Study of high-speed deformation processes using a contact force sensor]. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki. XIV VNTK: sb. mater.* [Engineering and physical problems of new technology. XIV VNTK: collection of materials]. Moscow, BMSTU Press, 2020, pp. 56–58. (In Russ.).
- [4] Lavrushin M.Yu. Investigation of the behavior of a ferromagnet under dynamic deformation on the example of an invar 44NKhTYu. *Instruments*, 2022, no. 10 (268), pp. 54–62. (In Russ.).
- [5] Lavrushin M.Yu. A new device for measuring impact active force, structurally similar to magnetoelastic transducers. *Instruments*, 2022, no. 10 (268), pp. 45–53. (In Russ.).
- [6] Baumann E. *Izmerenie sil elektricheskimi metodami* [Measurement of forces by electrical methods]. Moscow, Mir Publ., 1978, 430 p. (In Russ.).

- [7] Shishkinskiy V.I. *Magnitoanizotropnye monolitnye siloizmeriteli* [Magnetoanisotropic monolithic force meters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 80 p. (In Russ.).
- [8] Kharkevich A.A. *Teoriya preobrazovateley: izbrannye trudy* [Theory of transducers: selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1973, vol. 1, pp. 52–217. (In Russ.).
- [9] Kol'skiy G. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress waves in solids]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1955, 194 p. (In Russ.).
- [10] GOST ISO 5347-0-95. *Mezhhgosudarstvennyy standart. Vibratsiya. Metody kalibrovki datchikov vibratsii i udara* [State Standart 5347-0-95. Interstate standard. Vibration. Methods for calibrating vibration and shock sensors]. Moscow, Standard Publ., 1995, 29 p. (In Russ.).

Dolgikh E.S. — Student, 10th grade A, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Drozdov A.P. — Student, 9th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Lavrushin O.M. — Student, 9th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Shpilkovskiy P.V. — Student, 11th grade A, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Lavrushin M.Yu., Scientific Director, Engineering and Physical Metrology Laboratory, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Dolgikh E.S., Drozdov A.P., Lavrushin O.M., Shpilkovskiy P.V. Active impact force sensor structurally similar to the magnetoelastic transducers. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 10 (87). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-10-943>