Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0448

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 427–443.

DOI: **10.7463/1114.0736576**

Представлена в редакцию: 08.07.2014

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 623.454.255.2

Расчет пьезоэлектрического контактного датчика цели с учетом волновых процессов

Ефремов А. К.[1,*]

*efrak@mail.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Предложена математическая модель пьезоэлектрического преобразователя как элемента контактного датчика цели (КДЦ) взрывателя, ориентированная на исследование прохождения через пьезоэлемент (ПЭ) короткого импульса интенсивного механического напряжения с геометрической длиной, соизмеримой с длиной ПЭ. Введено понятие эквивалентного механического напряжения. Методика расчета позволяет проанализировать фазы волнового нагружения ПЭ и оценить быстродействие КДЦ в зависимости от порогового уровня потенциала срабатывания исполнительного элемента огневой цепи, скорости встречи боеприпаса с целью и закона возникающего контактного механического напряжения. Приведены результаты расчета реального КДЦ.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, контактный датчик цели взрывателя, фазы волнового нагружения пьезоэлемента, эквивалентное механическое напряжение, выходной электрический потенциал

Введение

Как известно, механические взрыватели, обладая рядом несомненных достоинств, тем не менее не всегда способны удовлетворить все требования технического задания на проектирование. Это, главным образом, относится к обеспечению высокого быстродействия при поражении таких целей, как объекты бронетанковой техники, с помощью кумулятивных и бронебойно-фугасных снарядов, имеющих малопрочную головную часть, что порождает относительно низкий уровень контактной силы (реакции или инерции), необходимой для надежного срабатывания датчика цели.

Указанный недостаток механических взрывателей можно устранить за счет использования электрической энергии. Следует отметить, что первое электрическое взрывное устройство предложено в России академиком Б.С. Якоби еще в 1834 г. Основы теории электрических взрывателей впервые разработал Г.М. Третьяков [1]; он же в начале 40-х годов выдвинул идею использования пьезоэффекта в контактных датчиках цели (КДЦ) взрывателей.

Основным достоинством электромеханических взрывателей является то, что они обладают высокими чувствительностью и быстродействием, адаптивно реагируя на условия встречи боеприпаса с целью. Кроме того, уменьшается число подвижных конструктивных элементов, а электрические цепи допускают 100%-ный контроль в процессе производства. Вместе с тем включение электрических цепей в конструкцию взрывателя порождает и специфические трудности – например, необходимость борьбы со статическим электричеством и блуждающими токами, способными вызвать преждевременное срабатывание исполнительного элемента, особенно повышенной чувствительности. В связи с этим в электрическую цепь вводят коммутирующие и шунтирующие элементы, которые в результате взведения должны быть отключены к моменту срабатывания взрывателя.

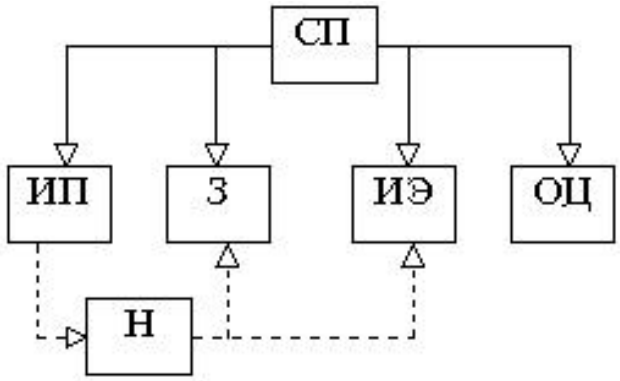


Рис. 1. Структурная схема электромеханического взрывателя

Обобщенная структурная схема электромеханического взрывателя представлена на рис. 1, где ИП – источник питания (внешний или автономный); З – замыкатель цепи (инерционный или реакционный) или коммутирующее устройство; ИЭ – исполнительный элемент, т.е. электровоспламенитель (ЭВ), мостиковый или искровой электродетонатор (ЭД); Н – накопитель (аккумулятор энергии), заряжаемый от ИП; СП – элементы системы предохранения; ОЦ – огневая цепь. При отсутствии накопителя ИП представляет собой преобразователь генераторного типа, срабатывающий в результате контакта боеприпаса с целью [14, 16]. Электрическая часть обеспечивает срабатывание исполнительного элемента огневой цепи при поражении цели, а механическая – безопасность взрывателя в служебном обращении и надежное взведение (снятие ступеней предохранения) при выстреле (пуске).

Пьезоэлектрические преобразователи (ПП) – устройства, в которых проявляется прямой или обратный пьезоэффект, т.е. преобразование механической энергии в электрическую и наоборот. ПП широко используют в устройствах как общетехнического назначения (датчики ускорения, давления, силы; стабилизированные генераторы, фильтры, приемники и генераторы ультразвуковых колебаний, звукосниматели и т.д.), так и специального. Действие интегральных ПП основано на распространении поверхностно-

акустических волн. В области теории преобразователей и, в частности пьезоэлектрических, классической является работа академика А.А. Харкевича [3]. Вопросам проектирования и применения ПП посвящено довольно много работ, например [4-7].

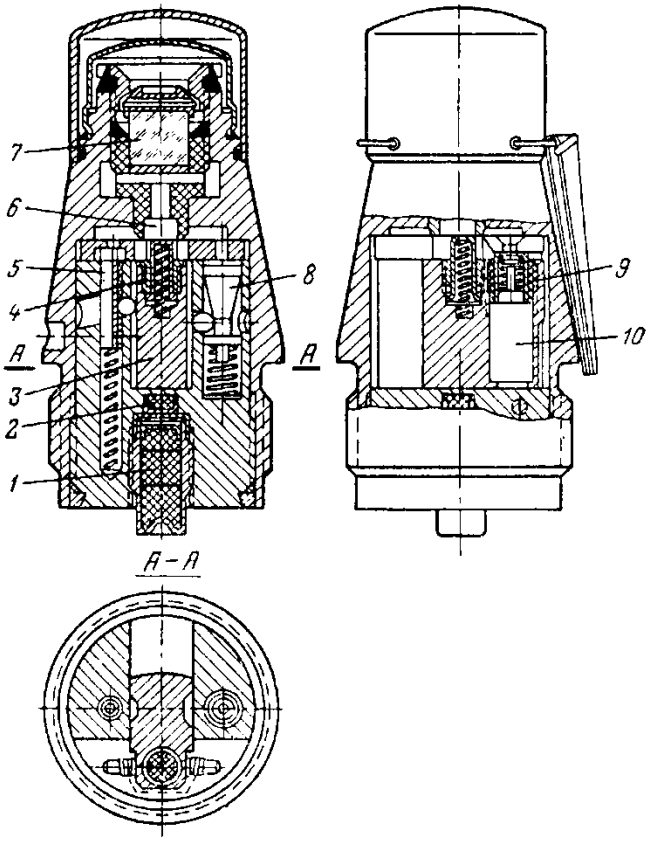


Рис. 2. Пьезоэлектрический взрыватель: 1 – детонатор; 2 – передаточный заряд; 3 – движок; 4 – изоляционная втулка; 5 – инерционный стопор; 6 – центральный контакт; 7 – пьезогенератор; 8 – замыкатель; 9 – контактный колпачок; 10 – электродетонатор

ПП нашли применение в качестве чувствительных элементов КДЦ взрывателей для кумулятивных снарядов и реактивных противотанковых гранат [8, 9]. ПП располагается в головной части взрывателя и воспринимает силу реакции преграды. В зависимости от расположения детонирующего узла взрыватели подразделяют на головные (типа ГПВ – рис. 2, [10]) и головодонные; в последних связь между обеими частями является электрической и организуется через корпус взрывателя. Преимуществом взрывателей данного типа является способность создавать короткие (до единиц мкс) электрические импульсы большой интенсивности при небольших габаритах и автономности, а также лучшее (по сравнению с механическими взрывателями) действие по броне при больших углах встречи от нормали. Одним из трудновыполнимых требований, предъявляемых к пьезовзрывателям, является избирательность, т.е. способность отличать целевую

преграду (поверхность объекта бронетанковой техники) от нецелевой (экраны, сетки, ветки и т.д.).

Поражающее действие кумулятивного снаряда определяется энергией боевого заряда, формирующего поток продуктов детонации, а не кинетической энергией боеприпаса. Однако скорость встречи имеет большое значение с точки зрения оптимизации бронепробития, учитывая необходимость совмещения фокуса кумулятивной струи с поверхностью брони [11]. В состав перспективного взрывателя может входить адаптивное устройство, вырабатывающее команду на подрыв боевого заряда на основе анализа конкретных условий встречи боеприпаса с целью.

В данной статье излагается приближенная методика расчета ПП с ориентацией на интенсивный ударный процесс, возникающий при взаимодействии боеприпаса с преградой. Как уже отмечалось выше, этот процесс характеризуется высокой скоростью встречи и кратковременностью (единицы и десятки мкс), вследствие чего возрастает роль волновых процессов в корпусе боеприпаса и в самом ПП. Предлагаемая методика относится к случаю, когда высота пьезоэлемента (ПЭ) соизмерима с длиной волны механического напряжения. Фазы нагружения ПЭ зависят от соотношения этих геометрических параметров и определяют формирование электрического сигнала на выходе. Расчет проводится на основе использовании понятия эквивалентного механического напряжения, в каждый момент времени усредняемого по длине пьезоэлемента. Приведен пример расчета реакции реального пьезоэлектрического КДЦ.

1. Пьезоэффект

Количественно пьезоэффект характеризуется взаимообратимым соответствием между механическими и электрическими величинами. Пьезоэлектрические свойства проявляют как кристаллические материалы, так и поляризованная керамика [7]. Существует 32 кристаллографических класса; пьезоэффект наблюдается в 20 классах из 21 класса, не имеющего центра симметрии, причем можно выделить 10 полярных классов, имеющих особую полярную ось (электрический дипольный момент). На кристаллах этого класса электрический заряд может возникать не только при приложении механического напряжения, но и при объемном нагревании (пироэффект). Физическая природа пьезоэффекта в кристаллах и в керамике несколько различна [5, 7].

Полная система уравнений, описывающих упругие и электромагнитные процессы в ПП, представляет собой совокупность волнового уравнения (для упругой механической системы) и уравнений Максвелла, с учетом взаимосвязи между ними. В общем виде указанная система уравнений неразрешима, и поэтому предлагается упрощенный метод, ориентированный на пьезокерамику. Состояние последней в процессе нагружения можно охарактеризовать величинами, имеющими механическую (напряжение σ, деформация ζ) и электрическую (индукция D и напряженность поля E) природу, т.е.

$$D = D(E,\sigma);\ \zeta = \zeta(E,\sigma),$$

откуда

$$\left.\begin{aligned} dD &= \frac{\partial D}{\partial E}dE + \frac{\partial D}{\partial \sigma}d\sigma = \alpha_{11}dE + \alpha_{12}d\sigma \\ d\zeta &= \frac{\partial \zeta}{\partial E}dE + \frac{\partial \zeta}{\partial \sigma}d\sigma = \alpha_{21}dE + \alpha_{22}d\sigma \end{aligned}\right\}.$$

Для малых приращений (обозначая $\Delta D = D; \Delta\zeta = \zeta; \Delta\sigma = \sigma; \Delta E = E$) с учетом принципа взаимности коэффициентов ($\alpha_{12} = \alpha_{21} = d$) получим уравнения электромеханической связи

$$D = \varepsilon E + d \cdot \sigma; \quad \zeta = d \cdot E + \frac{\sigma}{K}, \tag{1}$$

где $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; d – пьезомодуль; K – модуль упругости 1-го рода.

Как известно, $D = \varepsilon E + P$, где P – электрическая поляризация, причем при отсутствии поля (пьезоэлемент закорочен) $P = D$. Из уравнений связи (1) видно, что

$$\left.\frac{D}{\sigma}\right|_{E=0} = \left.\frac{P}{\sigma}\right|_{E=0} = \left.\frac{\zeta}{E}\right|_{\sigma=0} = d. \tag{2}$$

Соотношения (2) при $E = 0$ характеризуют прямой пьезоэффект, а при $\sigma = 0$ – обратный. Направления поляризации и механического напряжения могут не совпадать, а деформации – носить характер растяжения, сжатия или сдвига. Пьезомодуль, механическое напряжение и деформация в общем случае – тензорные величины: поскольку свойства пьезоэлектрика связаны с кристаллографической анизотропией [7], т.е. $d = d_{ij}$. Индукция может быть определена как поверхностная плотность электрического заряда q, тогда уравнение прямого пьезоэффекта, согласно (2), будет иметь вид

$$d = \frac{q}{\sigma s} = \frac{q}{F} \tag{3}$$

где $F = \sigma s$ – приложенная сила. Именно этой формулой чаще всего пользуются на практике при расчете ПП. Однако при этом предполагают, что напряженно-деформированное состояние и электрическое поле однородны (равномерно распределены). Ниже рассматривается случай волнового нагружения ПП, когда параметры, характеризующие его состояние в каждый момент времени определенным образом распределены по его длине.

2. Математическая модель

На рис. 3 показана схема замещения ПП применительно к КДЦ, где C_n – собственная емкость ПЭ; $C_ш$ – шунтирующая емкость (паразитная или специально включенная); ИЭД – искровой электродетонатор.

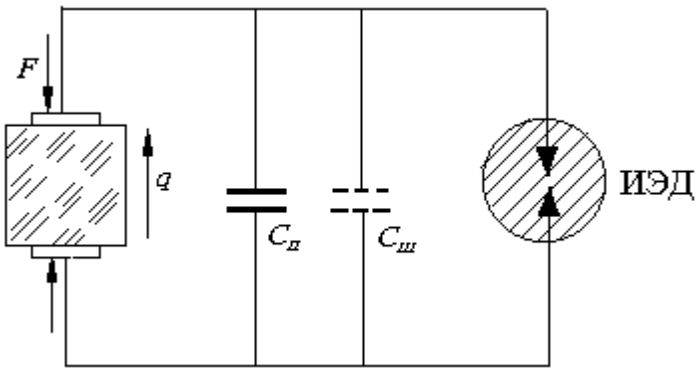


Рис.3. Схема замещения ПП

ПП рассматривается как генератор заряда. Срабатывание ИЭД происходит после достижения на его электродах потенциала U , достаточного для пробития межэлектродного искрового промежутка:

$$U = \frac{q}{C} \approx \frac{\sigma s d}{C_n} \geq U_{\min},$$

где U_{min} – некоторый пороговый уровень, определяющий чувствительность ИЭД. Рассматривая ПЭ как плоский конденсатор толщиной h, можно определить его емкость

$$C_n = \frac{\varepsilon s}{h} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 s}{h},$$

где h – высота ПП; s – площадь его поперечного сечения. Таким образом,

$$U = \frac{hd}{\varepsilon}\sigma = \frac{hd}{\varepsilon_r \varepsilon_0}\sigma \qquad (4)$$

Видно, что при $\varepsilon = \text{const}$ выходной сигнал ПП будет пропорционален закону приложенного механического напряжения. Вместе с тем экспериментально установлено, что в действительности $\varepsilon_r = \varepsilon_r(E, \sigma) \approx \varepsilon_r(E)$; по некоторым данным, указанная зависимость близка к линейной:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r0} + \gamma E, \qquad (5)$$

где ε_{r0} – начальное значение при отсутствии поля; γ – эмпирический коэффициент. Подставив (5) в (4), получим

$$\beta = \frac{\lambda U}{\sigma} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\varepsilon_{r0}} E}, \qquad (6)$$

где $\lambda = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r0}}{hd}$. При однородном поле

$$E = \frac{U}{h}.$$

Подставив это значение в (6), будем иметь

$$\beta = \frac{\lambda U}{\sigma} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_0}\beta}, \qquad (7)$$

Величину $\sigma_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r0}^2}{\gamma d}$ назовем «характеристическим» механическим напряжением. Если пренебречь зависимостью ε_r от E, то $\varepsilon_r = \varepsilon_{r0}$; тогда из (4) следует, что в этом случае

$$U = \frac{hd}{\varepsilon_{r0}\varepsilon_0}\sigma = \frac{\sigma}{\lambda},$$

т.е. $\beta = \lambda U/\sigma = 1$. Из формулы (7) получаем

$$\beta = \frac{\sigma_0}{2\sigma}\left(\sqrt{1 + 4\frac{\sigma}{\sigma_0}} - 1\right)$$

и, соответственно,

$$U = \frac{\sigma_0}{2\lambda}\left(\sqrt{1 + 4\frac{\sigma}{\sigma_0}} - 1\right).$$

Отсюда видно, что при $4\sigma/\sigma_0 << 1$, т.е. при относительно малых значениях механического напряжения $\beta \approx 1{,}0$.

Предположим теперь, что механическое напряжение (в данный момент времени) равномерно распределено вдоль ПЭ. В фиксированный момент времени $U = U(x)$, т.е. напряженность электрического поля

$$E = \frac{dU}{dx} = \frac{1}{h}\frac{dU}{d\bar{x}}, \qquad (8)$$

где $\bar{x} = x/h$, причем, очевидно, $0 \le \bar{x} \le 1.0$. Подставим (8) в (6), используя введенные ранее обозначения:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{\sigma_0}\frac{d\beta}{d\bar{x}}} \qquad (9)$$

Для упрощения решения задачи с учетом волновых процессов принимаем σ равным эквивалентному механическому напряжению $\sigma_э$, считая его постоянным в пределах ПЭ в рассматриваемый момент времени. Для вычисления $\sigma_э$ примем следующую расчетную схему: представляем ПП как некую «вставку», согласованную с опорой (корпусом боеприпаса) по волновому сопротивлению (рис. 4). Учитывая кратковременность процесса соударения боеприпаса с преградой, будем пренебрегаем отражением волн от свободного торца, т.е. рассматриваем прохождение только прямой одномерной волны (режим бегущей волны).

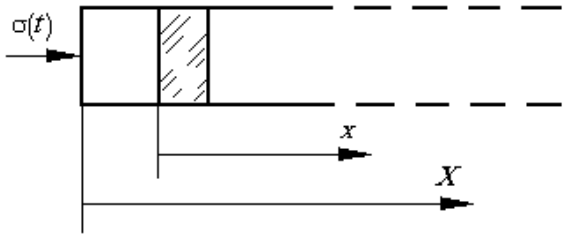


Рис. 4. Упрощенная расчетная схема

Процессы в этой системе можно описать с помощью известного волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

где $u = u(t,x)$ – смещение соответствующего (плоского) сечения относительно начального положения x; $c = \sqrt{K/\rho}$ – скорость распространения волны (скорость звука); ρ – плотность материала; X – перемещение боеприпаса (деформация головной части взрывателя). Если известен закон изменения напряжения на входном (ударном) торце $\sigma(t)$, то, как следует из теории колебаний упругих однородных стержней [12], напряжение в произвольном сечении ПЭ

$$\sigma(t,x) = \sigma\left(t - \frac{x}{c}\right).$$

Соответственно, в общем виде

$$\sigma_э(t) = \frac{1}{h}\int_{x_1}^{x_2} \sigma\left(t - \frac{x}{c}\right)dx$$

Преобразуем это выражение, введя безразмерные величины,

$$\sigma_э(\bar{t}) = \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}_2} \sigma[\tau_0(\bar{t} - \bar{x})]d\bar{x} = \int_{\bar{t}-\bar{x}_2}^{\bar{t}-\bar{x}_1} \sigma(\tau_0\xi)d\xi \qquad (10)$$

где $\tau_0 = h/c$ – время прохождения волны сжатия вдоль ПЭ; $\bar{t} = t/\tau_0$; $\xi = \bar{t} - \bar{x}$. Принимая в (9) $\sigma = \sigma_э$, получим следующее решение данного дифференциального уравнения:

$$f(\beta) = \frac{\sigma_0}{\sigma_э}\Delta\bar{x} = -\beta - \ln(1-\beta), \qquad (11)$$

где $\Delta\bar{x} = \bar{x}_2 - \bar{x}_1$. Значения $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ зависят от фазы нагружения ПЭ (см. ниже).

Из (11) выразить β в явном виде нельзя, и поэтому задача сводится к обратной: задаваясь $\sigma_э$, находим функцию $f(\beta)$, а затем (численно) β и, соответственно, потенциал на выходе ПП:

$$U = \frac{\beta\sigma_э}{\lambda}.$$

Соответствующая обратная зависимость приведена в табл. 1. Следует отметить, что при $f(\beta) \geq 4.0$ $\beta \approx 1.0$, т.е. $U \approx \sigma_э/\lambda$.

Таблица 1. Зависимость параметра β от значений функции $f(\beta)$

$f(\beta)$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
β	0,383	0,507	0,598	0,650	0,698	0,737	0,770	0,798	0,821	0,841

Обозначим через t_y длительность ударного импульса; тогда его геометрическая длина будет равна ct_y. Можно выделить три основные фазы нагружения ПЭ (рис. 5).

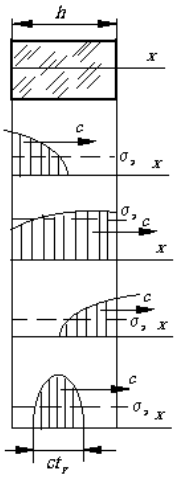


Рис. 5. Фазы волнового нагружения пьезоэлемента

Первая фаза: пьезоэлемент нагружен частично: $x_1 = 0$; $x_2 = ct$; $\bar{x}_1 = 0$; $\bar{x}_2 = \bar{t}$; $\Delta\bar{x} = \bar{t}; 0 \leq \bar{t} \leq 1$;

$$\sigma_э(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \sigma(\tau_0\xi)d\xi;\ f(\beta) = \frac{\sigma_0}{\sigma_э}\bar{t}. \qquad (12)$$

Вторая фаза: пьезоэлемент нагружен по всей высоте ($ct_y > h$): $x_1 = 0$; $x_2 = h$; $\bar{x}_1 = 0$; $\bar{x}_2 = 1.0$; $\Delta\bar{x} = 1.0; 1 \leq \bar{t} \leq \bar{t}_y$;

$$\sigma_э(\bar{t}) = \int_{\bar{t}-1}^{\bar{t}} \sigma(\tau_0\xi)d\xi;\ f(\beta) = \frac{\sigma_0}{\sigma_э}. \qquad (13)$$

Данная фаза является основной, так как в ее пределах достигается максимум потенциала на выходе ПП. Для весьма короткого импульса ($ct_y < h$)

$$\sigma_э(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}_y} \sigma(\tau_0 \xi) d\xi = \text{const}. \qquad (14)$$

При укорочении импульса постоянного уровня напряжение $\sigma_э$, очевидно, уменьшится, что приведет к снижению уровня выходного сигнала (это явление наблюдалось на практике).

Третья фаза: постепенная упругая разгрузка пьезоэлемента (волна сжатия выходит из него и начинает распространяться вдоль «стержня»): $x_1 = c\left(t - t_y\right)$; $x_2 = h$; $\bar{x}_1 = \bar{t} - \bar{t}_y$; $\bar{x}_2 = 1.0$; $\Delta\bar{x} = 1 - \bar{t} + \bar{t}_y$; $\bar{t}_y \le \bar{t} \le 1 + \bar{t}_y$;

$$\sigma_э(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \sigma(\tau_0 \xi) d\xi;\ f(\beta) = \frac{\sigma_0}{\sigma_э}\bar{t}\ . \qquad (15)$$

Эта фаза представляет лишь теоретический интерес.

Величина характеристического напряжения σ_0 может быть определена при известных параметрах пьезокерамики [5-7]. В частности, для титаната бария ($BaTiO_3$), применяющегося в КДЦ взрывателей, $d_{33} = (150 \ldots 350) \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; $\varepsilon_{r0} = 1{,}2 \cdot 10^3$; $\gamma = 2{,}7 \cdot 10^{-3}$ м/В. При этих значениях $\sigma_0 = 18{,}9$ МПа.

Рассмотрим пример расчета эквивалентного механического напряжения. Предположим, что входное напряжение изменяется по линейному закону:

$$\sigma(t) = \sigma_m \frac{t}{t_y},\ 0 \le t \le t_y\ .$$

Согласно (10), будем иметь

$$\sigma_э = \frac{\sigma_m \tau_0}{t_y} \int_{\bar{t}-\bar{x}_2}^{\bar{t}-\bar{x}_1} \xi d\xi = \sigma_m \frac{1}{2\bar{t}_y} \Delta\bar{x}\left[2\bar{t} - \left(\bar{x}_1 + \bar{x}_2\right)\right].$$

Используя выражения (12)–(15), получим для «длинного» импульса ($\bar{t}_y > 1.0$)

$$\frac{\sigma_э}{\sigma_m} = \frac{1}{2\bar{t}_y} \times \begin{cases} (\bar{t})^2,\ 0 \le \bar{t} \le 1.0 \\ 2\bar{t} - 1,\ 1.0 \le \bar{t} \le \bar{t}_y \\ (\bar{t}_y)^2 - (\bar{t} - 1)^2,\ \bar{t}_y \le \bar{t} \le 1 + \bar{t}_y \end{cases}$$

и для «короткого» ($\bar{t}_y < 1.0$)

$$\frac{\sigma_э}{\sigma_m} = \frac{1}{2\bar{t}_y} \times \begin{cases} (\bar{t})^2,\ 0 \le \bar{t} \le \bar{t}_y \\ (\bar{t}_y)^2 = const,\ \bar{t}_y \le \bar{t} \le 1.0 \\ (\bar{t}_y)^2 - (\bar{t} - 1)^2,\ 1 \le \bar{t} \le 1 + \bar{t}_y \end{cases}$$

Графики законов изменения потенциала на выходе ПП для двух импульсов механического напряжения одинакового уровня, но различной длительности представлены на рис. 6 (кривые 1 и 2 при $\bar{t}_y = 2{,}0$ и $\bar{t}_y = 0{,}5$, соответственно) . Наглядно

видно, что при резком уменьшении длительности импульса, но при том же пиковом уровне может значительно уменьшиться уровень выходного сигнала КДЦ.

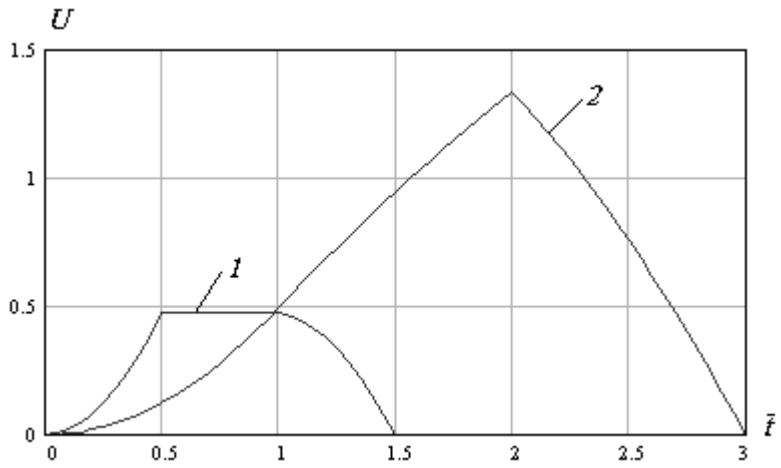


Рис. 6. Законы потенциала на выходе ПП

Изложенная методика может быть распространена на случай, когда необходимо учесть дополнительную (шунтирующую) емкость.

3. Пример расчета КДЦ

Кратко остановимся на методах определения входного механического напряжения. В работах [13, 14] рассматривались вопросы, связанные с внедрением боеприпасов в преграды в основном типа грунта и расчетом КДЦ в этих условиях. В данном же случае речь идет о взаимодействии боеприпаса, имеющего сравнительно малопрочную головную часть, с жесткой преградой типа брони. Сложность аналитического описания этого процесса, отсутствие достоверных сведений о физико-механических свойствах материалов при динамическом (высокоскоростном) нагружении, а также соответствующих измерительно-регистрирующих средств – основные трудности, возникающие при попытке решения данной задачи. В результате проведения экспериментов по статическому и динамическому нагружению головной части взрывателя типа ВП-16 (на копре «Массет» [15]), с использованием магнитоанизотропного датчика [16]) удалось получить эмпирическое выражение для контактной (усредненной) силовой характеристики, а именно

$$P = bX^n,$$

где $b = 1{,}84 \cdot 10^6$ Н/м^n; $n = 0{,}73$. Потерей скорости боеприпаса на начальном этапе деформирования головной части можно пренебречь, что позволяет вычислить контактную силу как функцию времени, полагая $X \approx V_c t$, где V_c – скорость встречи:

$$P(t, x) \approx bV_c^n t^n.$$

Соответственно, напряжение сжатия ПЭ

$$\sigma(t,x)=\frac{bV_c^n}{s}\left(t-\frac{x}{c}\right)^n.$$

Вновь воспользовавшись соотношениями (12) и (13), можно записать выражение для эквивалентного напряжения в пределах двух фаз нагружения ПЭ

$$\sigma_э(\bar{t})=\frac{bV_c^n}{s}\int_{\bar{t}-\bar{x}_2}^{\bar{t}-\bar{x}_1}(\tau_0\xi)^n d\xi=\sigma_m\times\begin{cases}(\bar{t})^{1+n}, 0\le\bar{t}\le 1.0\\ (\bar{t})^{1+n}-(\bar{t}-1)^{1+n}, \bar{t}>1\end{cases}$$

где

$$\sigma_m=\frac{b(V_c\tau_0)^n}{(1+n)s}\ -$$

коэффициент, имеющий размерность механического напряжения и зависящий от скорости встречи с целью.

Предлагаемая методика является приближенной, однако полученные с ее помощью результаты тем не менее дают возможность оценить ожидаемую работоспособность пьезоэлектрического КДЦ в заданных условиях встречи боеприпаса с преградой. При расчете пороговое значение потенциала срабатывания исполнительного элемента (ИЭД) было принято равным $U_{\min}=3$ кВ. В табл. 2 представлены значения σ_m и времени срабатывания t_c.

Таблица 2. Параметры срабатывания КДЦ

V_C, м/с	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
σ_m, МПа	48,3	65,0	80,1	94,3	108	120	133	145	156	168
t_C, мкс	7,56	6,63	6,18	5,9	5,72	5,59	5,48	5,39	5,31	5,24

Видно, что зависимость t_c от скорости встречи имеет явно асимптотический характер; заметное уменьшение времени срабатывания наблюдается лишь в диапазоне значений скорости 50...500 м/с, а дальнейшее ее возрастание заметного эффекта с точки зрения увеличения быстродействия не дает. Это объясняется возрастанием сжатия импульса механического напряжения во времени (из-за увеличения крутизны переднего фронта), т.е. его геометрическая длина становится все меньше по сравнению с длиной ПЭ, что приводит к ослаблению зависимости эквивалентного напряжения от конкретного закона изменения $\sigma(t)$. Этот вывод и полученные расчетные данные в принципе достаточно хорошо коррелируются с известными результатами натурных (полигонных) испытаний пьезовзрывателей.

В работах [8,9,17] рассматривается пьезоиндукционный вариант преобразователя, который представляет собой источник тока, а не заряда и поэтому может быть

использован для инициирования срабатывания омического (а не искрового) исполнительного элемента огневой цепи взрывателя.

Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1) Предложена математическая модель пьезоэлектрического преобразователя как чувствительного элемента КДЦ взрывателя, учитывающая зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля.

2) Введено понятие эквивалентного механического напряжения, представляющего собой результат усреднения его эпюры по длине пьезоэлемента в каждый момент времени, что позволяет проследить фазы его волнового нагружения и формирование выходного потенциала.

3) Предлагаемая методика расчета, будучи приближенной, тем не менее дает возможность оценить ожидаемое время срабатывания КДЦ в зависимости от скорости встречи боеприпаса с целью и закона контактного механического напряжения.

4) Расчетная оценка быстродействия реального КДЦ при заданном пороговом уровне потенциала срабатывания исполнительного элемента (ИЭД) достаточно хорошо коррелируется с известными результатами натурных испытаний.

Список литературы

1. Третьяков Г.М. Основы теории проектирования электрических трубок и взрывателей. М.: Артакадемия, 1939. 410 с.
2. Астапов Ю.М., Борзов А.Б., Ефремов А.К., Жураковский В.Н., Козлов В.И., Ковригин В.А., Лабунец Л.В., Лихоеденко К.П., Лобанов Б.С., Микаэльян С.В., Муратов И.В., Павлов Г.Л., Соболева Н.С., Суворов С.В., Сучков В.Б., Хохлов В.К., Шахтарин Б.И. Автономные информационные и управляющие системы. В 4 т. Т. 4: Труды кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Баумана / под ред. А.Б. Борзова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2011. 332 с.
3. Харкевич А.А. Избранные труды. В 3 т. Т. 1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. М.: Наука, 1973. 400 с.
4. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
5. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 272 с.
6. Ерофеев А.А., Проклин А.И., Уланов В.Н. Пьезоэлектроника. М.: Радио и связь, 1994. 240 с.
7. Ерофеев Н.К. Измерительная информационная техника: учеб. пособие. Л.: ЛМИ, 1990. 293 с.
8. Сулин Г.А. Сенсорные системы боеприпасов: учеб. пособие. СПб.: БГТУ, 1998. 79 с.

9. Сулин Г.А. Теоретические основы расчета сенсорных систем: учеб. пособие. СПб.: БГТУ, 2000. 64 с.
10. Прохоров Б.А. Боеприпасы артиллерии. М.: Машиностроение, 1973. 512 с.
11. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др. Средства поражения и боеприпасы: учеб. / под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
12. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний: учеб. для вузов. / Под ред. К.С. Колесникова. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 272 с. (Сер. Механика в техническом университете; т. 4).
13. Ефремов А.К. Приближенный закон перегрузки при встрече боеприпаса с преградой и расчет КДЦ взрывателя // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2010. № 1. С. 9-15.
14. Ефремов А.К. Особенности расчета контактных датчиков цели взрывателей // Наука и образование. Электронный научно-технический журнал. 2013. № 8. С. 233-254. DOI: 10.7463/0813.0605972
15. Ефремов А.К., Капустян А.В. Особенности воспроизведения ударных воздействий при механических испытаниях // Наука и образование. Электронный научно-технический журнал. 2012. № 2. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/322339.html (дата обращения 01.10.2014).
16. Ефремов А.К. Магнитоупругий генераторный преобразователь // Наука и образование. Электронный научно-технический журнал. 2014. № 6. С. 195-208. DOI: 10.7463/0614.0716613
17. Ефремов А.К., Капустян А.В., Федоров В.Н. Пьезоиндукционный контактный датчик цели // Оборонная техника. 2005. № 4/5. С. 49-55.

.

Science & Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0448

Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, no. 11, pp. 427–443.

DOI: **10.7463/1114.0736576**

Received: 08.07.2014

© Bauman Moscow State Technical Unversity

The Evaluation of Piezoelectric Contact Target Sensor Taking Account of the Wave Processes

A.K. Efremov[1,*]

*efrak@mail.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: piezoelectric transducer, fuse contact target sensor, the phases of wave loading of piezoelectric element, equivalent mechanical stress, output electrical potential

Mechanical fuses usually do not provide high performance in the process of destruction of such objects as the armored vehicles. Shaped and armor-piercing high-explosive shells have a heading part of low strength. This prevents from achieving a required level of contact force (reaction or inertia), which is necessary for reliable operation of the target sensor. At the same time, electromechanical fuses have higher sensitivity and operating speed rates being capable of adaptive response to the conditions of shell encountering with the target. A generalized block diagram of the fuse is analysed, and a mathematical model of the piezoelectric transducer (PT) as a sensing element of the fuse contact sensor target (CST) is proposed. The model takes into account the empirical dependence of the relative permittivity of piezoelectric ceramics on the electric field. An approximate method of calculating the response of PT is presented. It is oriented at evaluating the propagation of a short stress pulse of high intensity, the geometric length of which is commensurate with the length of the piezoelectric element (PE). In this case significantly increases the role of wave processes in the ammunition shell and the PT itself. The calculation is based on the use of the concept of equivalent stress, which is obtained by averaging its diagrams at each time point along the PE. The method allows to analyze the sequence of loading phases passing through the PE body, which depends on the ratio of said geometrical parameters and quantitative characteristics of the output electrical signal of the transducer. An example of estimating the performance of a real piezoelectric CTS is presented. The experimentally obtained force characteristic of the head of piezoelectric fuse is taken into account as well as the encountering speed of the shell and the threshold operating level of the firing train actuator. Calculation results are in good agreement with the results of field tests. The method outlined in this paper may be used in the design of piezoelectric CST. It is supposed to create a more strict mathematical model of the transducer.

References

1. Tret'yakov G.M. *Osnovy teorii proektirovaniya elektricheskikh trubok i vzryvateley* [Basics of theory of electrical tubes and fuses designing]. Moscow, Artakademiya Publ., 1939. 410 p. (in Russian).
2. Astapov Yu.M., Borzov A.B., Efremov A.K., Zhurakovskiy V.N., Kozlov V.I., Kovrigin V.A., Labunets L.V., Likhoedenko K.P., Lobanov B.S., Mikael'yan S.V., Muratov I.V., Pavlov G.L., Soboleva N.S., Suvorov S.V., Suchkov V.B., Khokhlov V.K., Shakhtarin B.I.: Borzov A.B., ed. *Avtonomnye informatsionnye i upravliaiushchie sistemy. V 4 t. T. 4: Trudy kafedry "Avtonomnye informatsionnye i upravlyayushchie sistemy" MGTU im. Baumana* [Autonomous information and control systems. In 4 vols. Vol. 4: Proc. of department "Autonomous information and control systems" of Bauman MSTU]. Moscow, JSC "Inzhener" Publ., JSC "Oniko-M" Publ., 2011. 332 p. (in Russian).
3. Kharkevich A.A. *Izbrannye trudy. V 3 t. T. 1. Teoriya elektroakusticheskikh preobrazovateley. Volnovye protsessy* [Selected works. In 3 vols. Vol. 1. Theory of electroacoustic transducers. Wave processes]. Moscow, Nauka Publ., 1973. (in Russian).
4. Osadchiy E.P., ed. *Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* [Design of sensors for the measurement of mechanical values]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 480 p. (in Russian).
5. Aronov B.S. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli iz p'ezoelektricheskoy keramiki* [Electromechanical transducers of piezoelectric ceramics]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 272 p. (in Russian).
6. Erofeev A.A., Proklin A.I., Ulanov V.N. *P'ezoelektronika* [Piezo electronics]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1994. 240 p. (in Russian).
7. Erofeev N.K. *Izmeritel'naya informatsionnaya tekhnika* [Measuring information technology]. Leningrad, LMI Publ., 1990. 293 p. (in Russian).
8. Sulin G.A. *Sensornye sistemy boepripasov* [Sensor systems of ammunition]. St. Petersburg, BSTU Publ., 1998. 79 p. (in Russian).
9. Sulin G.A. *Teoreticheskie osnovy rascheta sensornykh system* [Theoretical basis of calculation of sensory systems]. St. Petersburg, BSTU ("Voenmekh") Publ., 2000. 64 p. (in Russian).
10. Prokhorov B.A. *Boepripasy artillerii* [Artillery ammunition]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 512 p. (in Russian).

11. Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., et al. *Sredstva porazheniya i boepripasy* [Means of destruction and ammunition]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 984 p. (in Russian).
12. Il'in M.M., Kolesnikov K.S., Saratov Iu.S. *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2003. 272 p. (Ser. *Mekhanika v tekhnicheskom universitete* [Mechanics at technical university]; vol. 4). (in Russian).
13. Efremov A.K. Approximate law of setback during shell collision with a target and evaluation of fuse target sensor. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy*, 2010, no. 1, pp. 9-15. (in Russian).
14. Efremov A.K. Some features of calculating the response of contact target sensors of fuses. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU,* 2013, no. 8, pp. 233-254. DOI: 10.7463/0813.0605972 (in Russian).
15. Efremov A.K., Kapustian A.V. Some features of shock testing. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU,* 2012, no. 2. Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/322339.html , accessed 01.05.2014). (in Russian).
16. Efremov A.K. Magnetoelastic Generator Type Transducer. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU,* 2014, no. 6, pp. 195-208. DOI: 10.7463/0614.0716613 (in Russian).
17. Efremov A.K., Kapustyan A.V., Fedorov V.N. Piezoelectric contact target sensor. *Oboronnaya tekhnika*, 2005, no. 4/5, pp. 49-55. (in Russian).