

УДК 621.317.39

**ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ДАТЧИКА ДЕТОНАЦИИ НА ОСНОВЕ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
КОНСТРУКЦИИ И
ПЬЕЗОТЕХНОЛОГИИ**

Гелаев Р. В., Мадорский В. В., Масоми Х.

Донской государственный технический
университет, г. Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

epohrbats@Gmail.com

Представлены обоснование и экспериментальные характеристики пьезоэлектрического датчика детонации с потенциально невысокой стоимостью. Доказано, что предлагаемый преобразователь имеет улучшенные эксплуатационные характеристики по сравнению с известными датчиками. Рассмотрена конструкция пьезоэлектрического датчика давления. Проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пьезоэффект, датчик детонации, повышение чувствительности, упругие прокладки, моделирование, эксперимент.

Введение. Для получения максимального крутящего момента в автомобильном двигателе необходимое опережение зажигания устанавливается в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя, положения дроссельной заслонки, коэффициента избытка воздуха в топливно-воздушной смеси, рециркуляции отработавших газов, а также от внешних условий. В [1–3] описана замкнутая система с обратной связью автоматического регулирования угла опережения зажигания, в которой используется зависимость изменения давления в цилиндре во времени для определения момента зажигания, соответствующего максимальному крутящему моменту (и, следовательно, максимальной экономии топлива) с помощью датчика детонации. Для регулирования угла опережения зажигания необходимо определять момент наступления максимального давления в цилиндре при рабочем ходе поршня. Кроме того, требуется непрерывное измерение высокочастотных составляющих колебаний давления, обусловленных детонацией двигателя.

В настоящей работе предлагается конструкция пьезоэлектрического датчика детонации с улучшенными эксплуатационными характеристиками и относительно невысокой стоимостью по сравнению с существующими датчиками, который можно использовать для регулирования опережения зажигания.

Модель неоднородного чувствительного элемента датчика. Конструкция любого пьезоэлектрического датчика, как правило, содержит детали, выполненные из различных

UDC 621.317.39

**INCREASING THE SENSITIVITY
OF THE KNOCK SENSOR BASED ON
DESIGN AND PIEZO TECHNOLOGY
IMPROVEMENT**

Gelaev R.V., Madorskiy V.V., Masomi Kh.

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

epohrbats@Gmail.com

The paper provides the substantiation and experimental characteristics of the piezoelectric knock sensor with potentially low cost. It is proved that the proposed converter has improved performance characteristics in comparison with the known sensors. The design of the piezoelectric pressure sensor is considered. Theoretical results are compared with experimental data.

Keyword: piezoelectric effect, knock sensor, increased sensitivity, elastic strip, modeling, experiment.

материалов — пьезокерамический элемент, металлический корпус, инерционная масса, проводники, изолятор. Неоднородность физико-механических свойств сосредоточена в пьезоэлектрическом элементе. Из-за различия упругих свойств материалов силовые воздействия приводят к сложному пространственному напряженно-деформированному состоянию конструкции датчика. Для определения влияния состояния на информативность и надежность датчика при механических воздействиях рассмотрим пространственную электроупругую модель чувствительного элемента.

В настоящее время отсутствуют пространственно-аналитические методы, позволяющие находить точные решения для любой сложной конструкции датчика через относительно простые выражения. В настоящей работе основное внимание уделяется приближенным методам расчета датчика детонации, работающего на деформации растяжения-сжатия при продольном пьезоэлектрическом эффекте (рис. 1).

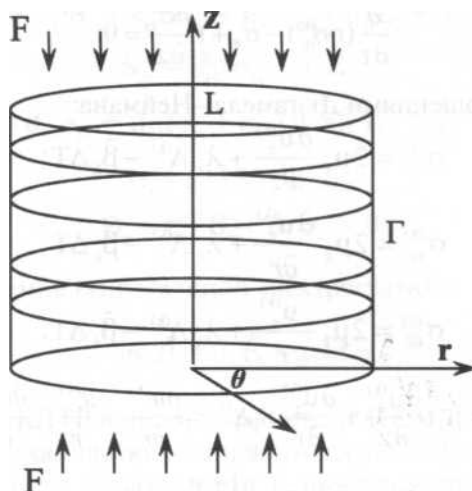


Рис. 1. Датчик с чувствительным элементом

Введем ряд допущений:

1. Считаем, что на пьезоэлемент в составе датчика действует одноосная квазистатическая сила вида P , где P определяется информационными параметрами (переменным давлением, усилием, ускорением из-за детонации и т. д.).

2. Считаем задачу квазистатической, что обусловлено следующими предположениями:

- колебания являются установившимися, а частота их значительно ниже резонансной частоты датчика f_0 ;
- для пьезоэлектрических датчиков погрешность статических решений не превышает 5 % до частот $0,2 \cdot f_0$ [4];
- для рассматриваемого датчика низкочастотная полоса пропускания составляет величину менее 5 КГц при резонансной частоте f_0 , приблизительно равной 100 КГц.

3. Постоянная времени, ответственная за нестационарные тепловые процессы в рассматриваемом датчике, значительно превышает период собственных колебаний. Поэтому действием тепловых процессов (пироэффектом) пренебрегаем [5] или считаем, что температура датчика не влияет на его напряженно-деформированное состояние.

4. Предполагаем, что все элементы (слои) датчика соединены жестко или без проскальзывания. Эти требования приводят к условию непрерывности для механических смещений и напряжений между слоями датчика.

Указанные выше допущения позволяют рассматривать задачу как квазистатическую для кусочно-однородного анизотропного электроупругого пакета (рис. 1).

Пусть V — объем, Γ — его боковая поверхность, H — высота, a — радиус. Введем цилиндрическую систему координат $\{r, \theta, z\}$. Направление вектора остаточной поляризации пьезокерамического элемента совпадает с осью Oz . Поверхности пьезоэлемента толщиной $2h$ при $z = \pm h$ полностью покрыты электродами нулевой толщины. На цилиндрической поверхности при $r=a$ электроды отсутствуют.

Два других упругих слоя датчика выполнены из изотропных материалов. Механические и пьезоэлектрические свойства в пределах каждого слоя неизменны. Толщины упругих слоев обозначим H_κ , где $\kappa=1,3$. Пусть $H_1=H_3$ (симметричный пакет). Через $\kappa=2$ обозначим пьезокерамический элемент. Общая толщина пакета равна $H=2*H_1+2*h$. Считаем, что толщина слоев пакета мала по сравнению с другим его размером — диаметром.

Напряженно-деформированное состояние описывается следующей системой уравнений [6, 7]:

– уравнениями равновесия для цилиндрической осесимметричной задачи:

$$r\partial_3\sigma_{zz}+\partial_1(r\sigma_{rz})=0, \quad \partial_1(r\sigma_{rr})-\sigma_{\theta\theta}+r\partial_3\sigma_{zr}=0; \quad (1)$$

– соотношениями для упругих прокладок:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}=2\mu\partial_3U_3+\lambda\Lambda; \quad \sigma_{rr}=2\mu\partial_1U_1+\lambda\Lambda; \quad \sigma_{\theta\theta}=2\mu U_1/r+\lambda\Lambda; \\ \sigma_{rz}=\mu(\partial_3U_1+\partial_1U_3); \quad \Lambda=\partial_3U_3+\partial_1U_1+U_1/r; \\ \lambda=E\nu/((1+\nu)(1-2\nu)); \quad \mu=0.5E/(1+\nu); \end{aligned} \quad (2)$$

– соотношениями Коши в цилиндрической системе координат:

$$S_{zz}=\partial_3U_z; \quad S_{rr}=\partial_1U_1; \quad S_{\theta\theta}=U_1/r; \quad S_{rz}=\partial_1U_z+\partial_3U_1. \quad (3)$$

В уравнениях (1–3) введены следующие обозначения: $U(U_1, U_z)$ — вектор механических перемещений; λ, μ — упругие константы Ляме упругих слоев с E, ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона; σ, S — механические напряжения и деформации соответственно; ∂_3 и ∂_1 — операторы производных по z и r .

В пьезоэлектрическом слое ($\kappa=2$), кроме уравнений (1, 3), выполняются следующие соотношения [5, 6]:

– уравнения пьезоэлектрического эффекта:

$$D_m=d_{mk}\sigma_k+\epsilon_{mk}\epsilon_k; \quad S_m=s_{mk}\sigma_k+d_{mk}\epsilon_k; \quad (4)$$

– уравнения электростатики:

$$\operatorname{div}D=0; \quad \epsilon=-\operatorname{grad}\varphi,$$

где φ — электрический потенциал; d_{mk} — пьезомодуль; s_{mk} — модули гибкости, измеренные при постоянном электрическом поле; ϵ_{mk} — свободные диэлектрические проницаемости; D, ϵ — векторы электрической индукции и напряженности электрического поля соответственно.

Для рассматриваемой объемной краевой задачи для датчика детонации граничные условия имеют вид:

1. Механические на торцах при $z=\pm H/2$:

$$\sigma_{zz}=P; \quad \sigma_{rz}=0. \quad (5)$$

2. Электрические на электродах пьезоэлемента при $z=\pm h$ (условие к. з.):

$$\varphi=0. \quad (6)$$

3. На боковых поверхностях при $r = a$ граничные условия заданы в интегральном смысле, что соответствует условию — главный вектор всех сил равен нулю:

$$\int \sigma_{rr} dz = 0. \quad (7)$$

Главный момент всех сил автоматически равен нулю, т. к. во всем объеме датчика отсутствуют касательные напряжения.

Для пьезоэлемента введено дополнительное условие:

$$D_r = 0.$$

На границах между слоями при $z = \pm h$ предполагается идеальный жесткий контакт, при котором выполняются условия непрерывности для вектора механических смещений и компонент механических напряжений.

В окончательном виде решение рассматриваемой краевой задачи (1–7) для пьезоэлектрического элемента в виде диска имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= P; \quad \sigma_{rz} = 0; \\ \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} &= P(|s_{13}| - \nu/E) / [s_{11} + s_{12} + (h/H_1)(1 - \nu)/E]. \end{aligned} \quad (8)$$

Сравнение аналитических и численных решений. Из (8) видно, что механические напряжения $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta}$ при действии силы P определяются разностью упругих модулей материалов s_{km} чувствительного пьезоэлектрического слоя и E , ν упругих накладок.

В общем случае знак планарных напряжений в рассматриваемом пьезоэлементе зависит от разности $(|s_{13}| - \nu/E)$. Параметры ν/E и $|s_{13}|$ определяют характер напряженно-деформированного состояния (растяжение, сжатие или знак планарных напряжений) слоев датчика детонации перпендикулярно приложенной силе. Причем всегда ν/E и $|s_{13}|$ положительны.

Как видно из (8), при увеличении толщины накладок H_1 или уменьшении толщины чувствительного элемента $2h$ планарные механические напряжения в слое из пьезокерамики возрастают.

При сжатии ($P < 0$), если $(|s_{13}| - \nu/E) > 0$, в пьезоэлементе действуют сжимающие планарные напряжения, во втором случае, если $(|s_{13}| - \nu/E) < 0$, растягивающие, причем σ_{rr} по величине могут быть соизмеримы с $\sigma_{zz} = P$.

Условием неоявления растягивающих планарных напряжений при сжатии является $(|s_{13}| - \nu/E) > 0$.

По отношению к керамике ЦТС–19 ($s_{13} = -5,3 \cdot 10^{-12}$ 1/Па) этому условию удовлетворяет большинство материалов для датчиков, выпускаемых промышленностью.

По отношению к кристаллам кварца ($s_{13} = -1,6 \cdot 10^{-12}$ 1/Па) этому условию не соответствуют такие материалы, как латунь, дюралюминий и титан. А по отношению к кристаллам ниобата лития ($s_{13} = -0,43 \cdot 10^{-12}$ 1/Па) — сталь.

Для определения функции преобразования K_F пьезоэлектрических датчиков детонации генераторного типа, используя соотношения (3, 8), получим следующее выражение в окончательном виде:

$$K_F = (d_{33} + d_{31}(|s_{13}| - \nu/E) / (s_{11} + s_{12} + (h/H_1)(1 - \nu)/E)). \quad (9)$$

В отличие от известных одномерных приближенных моделей [4], в формуле (9) имеется дополнительное слагаемое, зависящее от пьезомодуля d_{31} и комбинации упругих модулей материалов и геометрических размеров рассматриваемых выше слоев датчика. В зависимости от соотношения упругих модулей деталей полученное в (9) дополнительное слагаемое может быть как положительным, так и отрицательным. Если поперечные напряжения совпадают по фазе с продольными, то коэффициент преобразования датчика уменьшается. Если же они находятся в противофазе, то коэффициент преобразования увеличивается, при этом необходимо иметь ввиду, что пьезомодули d_{33} и d_{31} имеют противоположные знаки. Только при совпадении модулей $(|s_{13}| = \nu/E)$ или $H_1 = 0$ формула (9) принимает известный вид [5].

Эффект изменения K_F от жесткости материала силопередающих элементов датчика возрастает с уменьшением толщины $2h$ и увеличением толщины накладок H_1 .

На рис. 2 продемонстрированы изменения коэффициента преобразования чувствительного элемента в зависимости от его толщины: кривые соответствуют расчету по формуле (9) с помощью программы *MATLAB* [8], а точки — опытным данным.

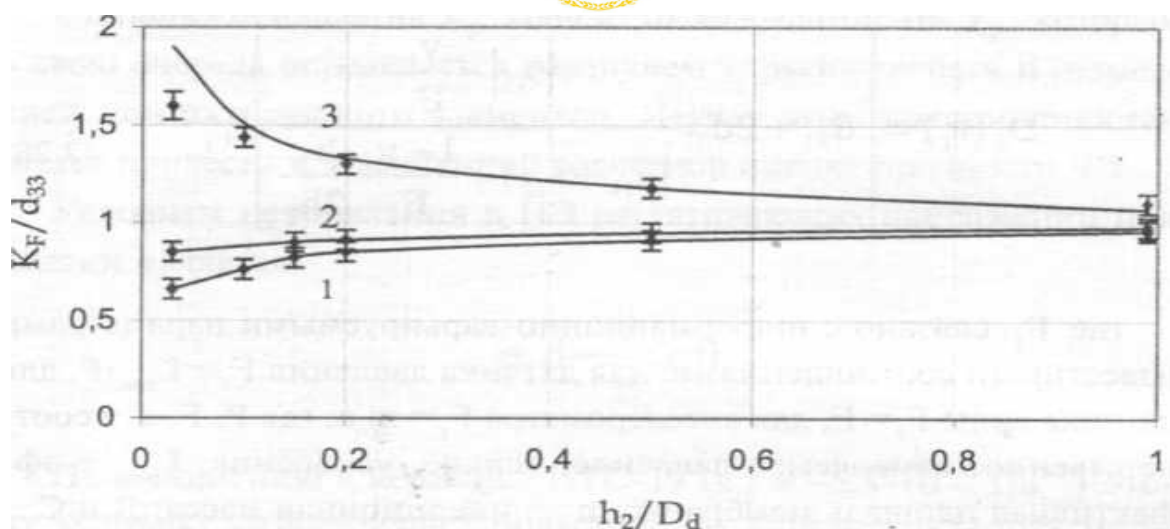


Рис. 2. Изменение коэффициента преобразования чувствительных элементов из керамики ЦТС–19 от относительной толщины к диаметру пьезоэлемента для прокладок из стали (1), латуни (2), графита (3)

Из рис. 2 видно, что по мере уменьшения толщины ПЭ отклонения коэффициента преобразования чувствительного элемента от номинального значения увеличиваются. Для накладок из стали и латуни коэффициент преобразования чувствительного элемента уменьшается, для накладок из графита — увеличивается. Погрешность расчета по сравнению с экспериментом не превышает 10 % как для «тонких», так и для «толстых» пьезоэлементов с отношением диаметр/толщина приблизительно равным единице.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что величина коэффициента преобразования чувствительного элемента может изменяться в широких пределах в зависимости от упругих свойств материалов силопередающих элементов. Однако этот эффект зависит от соотношения пьезомодулей d_{31}/d_{33} . Поэтому он будет проявляться в различной степени для различных пьезокерамических материалов. Для керамики с малым отношением пьезомодулей d_{31}/d_{33} , например, титаната свинца, влияние упругих свойств силопередающих элементов на величину коэффициента преобразования будет незначительным.

Представленный теоретико-экспериментальный анализ доказывает, что предложенный авторами пьезоэлектрический датчик детонации с улучшенными эксплуатационными характеристиками имеет широкую полосу частот для детектирования детонации в двигателе автомобиля. А также будет генерировать сигнал, обеспечивающий его высокую чувствительность к изменению давления в цилиндре.

Заключение. В работе описывается конструкция пьезоэлектрического датчика давления, приведены результаты испытаний пьезоэлектрического преобразователя для измерения детонации в автомобиле. Представлен алгоритм повышения чувствительности предлагаемого датчика детонации на основе совершенствования конструкции и пьезотехнологии.

На основании анализа модели датчика детонации в виде пространственного неоднородного электроупругого пакета, представленного в работе, был разработан ряд технических решений, полезных для практического применения. К ним относятся критерии для конструирования пьезоэлектрического датчика детонации с улучшенными эксплуатационными характеристиками:

- предложено использовать пьезоэлектрический материал с повышенными пьезомодулями;
- толщина чувствительного пьезоэлектрического слоя должна быть меньше, чем толщина упругих слоев датчика;
- должно выполняться условие для модулей керамики и металла $(|s_{13}| - \nu/E) < 0$.

Доказано, что данный преобразователь дает возможность замечать зарождающую детонацию по связанным с ней колебаниям давления в цилиндре.

Предлагаемый преобразователь обладает следующими свойствами:

- генерирует сигнал большой амплитуды, ясно различимый над уровнем помех;
- имеет рабочую полосу частот не менее 5 кГц, чтобы можно было обнаружить характерные черты детонации;
- его температура не влияет на определяемый момент максимального давления в цилиндре;
- имеет конструкцию, обеспечивающую низкую стоимость изготовления при массовом автоматизированном производстве;
- имеет максимально простую электронную схему преобразования сигнала.

Библиографический список.

1. Дентон, Т. Автомобильная электроника / Т. Дентон. — Москва : НТ Пресс, 2008. — 576 с.
2. Холдерман, Д. Д. Автомобильные двигатели: теория и техническое обслуживание / Д. Д. Холдерман, Ч. Д. Митчелл. — Москва : Вильямс, 2006. — 664 с.
3. Датчик детонации. Принцип работы и проверка [Электронный ресурс] / *FB.ru*. — Режим доступа: <http://fb.ru/article/68412/datchik-detonatsii-printsip-raboty-i-proverka>_(дата обращения : 18.11.17).
4. Пьезоэлектрические преобразователи / В. В. Ганопольский [и др.]. — Москва : Судостроение, 1984. — 266 с.
5. Яффе, Б. Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У. Кук, Г. Яффе. — Москва : Мир, 1974. — 289 с.
6. Tiersten, H.F. Linear piezoelectric plate vibration. / H.F. Tiersten. - New York : Plenum press, 1969. — 211 p.
7. Holland, R. Design of resonant piezoelectric devices / R. Holland, E. Eer Nisse. - Cambridge: MIT Press, 1969. — 257 p.
8. Васильев, А. Н. *MATLAB*. Практический подход / А. Н. Васильев. — Москва : Наука и техника, 2015. — 448 с.