

# СОВРЕМЕННЫЕ ИЗДЕЛИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРОНИКИ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

А.Итальянцев, Ю.Шульга, Д.Чашин, О.Шарпинский

Структуры, в которых реализуется прямой и обратный пьезоэлектрический эффект, нашли широкое применение в устройствах различного назначения. К их числу относятся изгибные и пакетные актуаторы, а также преобразователи механических нагрузок в электрический сигнал. На основе этих структур можно создать достаточно сложные изделия, обладающие высокой функциональностью, т.е. способные решать комплексную задачу в составе какой-либо системы. Такие высокофункциональные изделия могут включать в себя не один, а несколько электрически связанных пьезоэлементов или структур на основе других активных материалов, а также микроэлектронные компоненты. Выходной электрический сигнал в таких устройствах формируется, проходя цепь разнородных физических преобразований первичного воздействия. Среди новых отечественных разработок в области пьезоэлектроники – генераторы и датчики магнитного поля. Познакомимся с некоторыми из этих устройств.

## ИМПУЛЬСНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

Импульсный пьезоэлектрический генератор (ИПГ) – прибор, предназначенный для генерации и накопления электрической энергии от единичного удара или одноразовой импульсной инерционной перегрузки при разгоне какого-либо высокодинамичного объекта, например, артиллерийского боеприпаса. В [1,2] описаны такие изделия, способные функционировать в условиях очень высоких импульсных перегрузок вплоть до 100 000 g. Характерные размеры этих устройств составляют 20 мм в диаметре и 30 мм в высоту. Генератор способен за один импульс инерционной перегрузки в зависимости от величины этой перегрузки генерировать и накопить электрическую энергию порядка 0,01–5 Дж, которая может быть использована для питания бортовой электроники носителя. Такие генераторы относятся к энергетическим гибридным системам, которые вместо химических

батарей или совместно с ними обеспечивают электрической энергией слаботочную бортовую электронику. По сравнению с традиционными электрическими батареями срок службы генераторов существенно выше (не менее 20 лет), поскольку, в отличие от батарей, они не хранят электрическую энергию, а вырабатывают ее в момент перегрузки. Причем, время, за которое импульсный генератор способен зарядить накопитель энергии и, следовательно, выйти на рабочий режим, составляет несколько миллисекунд.

По данным американских исследователей [1] использование импульсных пьезоэлектрических генераторов в составе бортовых артиллерийских систем позволяет существенно расширить возможности бортовой электроники за счет высокой степени готовности устройств и возможности быстрого энергообеспечения электроники.

Авторами статьи разработан ИПГ, в котором в качестве генерирующего элемента выступает

пьезоэлемент, зажатый между корпусом ИПГ и упругим элементом с присоединенной массой (рис.1). Аккумулятор электрической энергии ИПГ содержит выпрямитель электрического тока и накопитель (например, суперконденсатор – ионистор).

При импульсном ускорении  $a(t)$  на пьезоэлемент воздействуют силы инерции, порожденные его собственной массой  $m$ , а также суммарной массой  $M$  упругого и присоединенного элемента. За цикл деформации, включающий стадии сжатия и релаксации, пьезоэлемент генерирует вне зависимости от его конструкции электрическую энергию  $W$ :

$$W = \frac{d_{33}^2}{\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{\Omega_1}{S^2} \left( M + \frac{m}{2} \right)^2 a^2 = \frac{d_{33}^2}{\epsilon\epsilon_0} \sigma_0^2 \Omega_1, \quad (1)$$

где  $d_{33}$ ,  $\epsilon$  – пьезоэлектрический модуль и относительная диэлектрическая проницаемость материала пьезоэлектрического элемента в виде прямого цилиндра сечением  $S$  и объемом  $\Omega_1$ .

Если учесть, что на практике в ИПГ не удастся разместить пьезоэлемент объемом больше  $1 \text{ см}^3$ , то в соответствии с (1) для пьезоэлемента, например, на основе цирконата-титаната-свинца (ЦТС-керамики), получим оценку максимальной величины энергии  $W_1 \approx 0,1 \text{ Дж/см}^3$ . Это предельная величина, ограниченная максимально возможным

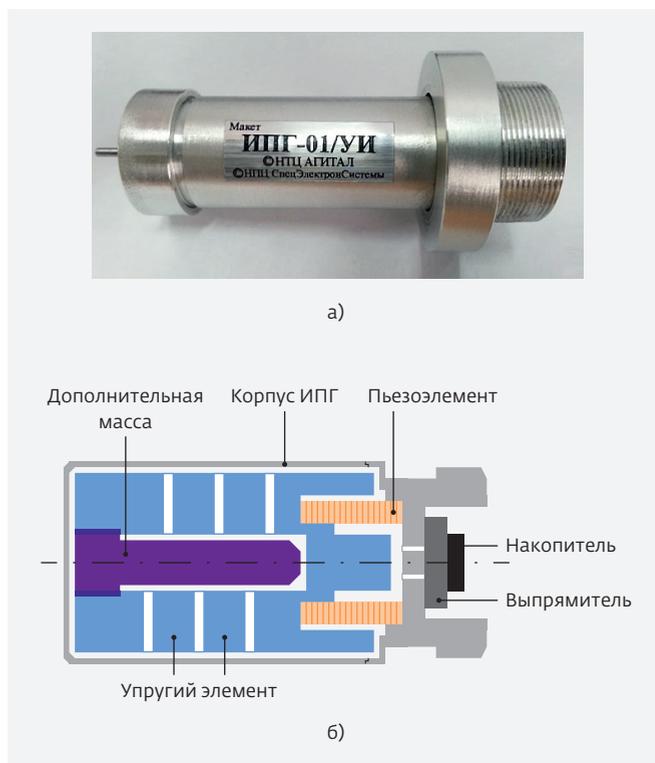
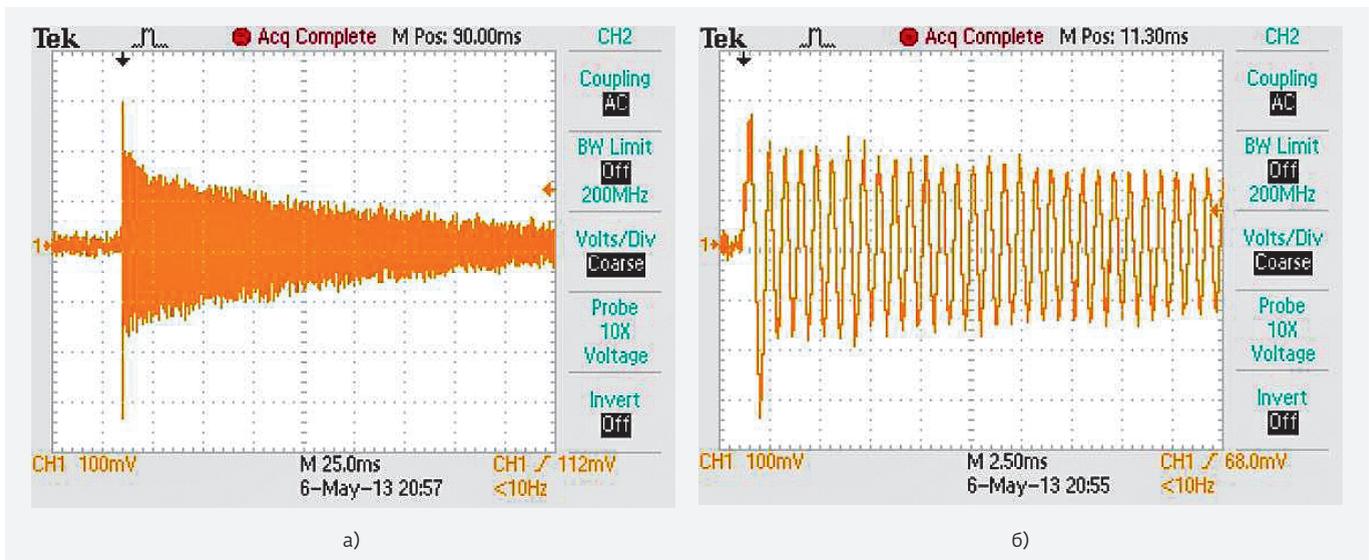


Рис.1. Общий вид (а) и схема (б) ИПГ с колебательной системой и присоединенной массой



**Рис. 2.** Характерный электрический отклик первичного преобразователя ИПГ на короткий единичный импульс в области низких инерционных перегрузок (75g) длительностью  $\tau < 1/f_{рез}$  при  $f_{рез} = 1280$  Гц,  $Q \approx 120$  (развертка по горизонтали: слева 25 мс/деление, справа 2,5 мс/деление)

значением  $\sigma_{max} \approx 90$  МПа, после которого наступает деполяризация ЦТС-керамики. Такой величины энергии часто недостаточно для решения практических задач. Для увеличения энергетики в конструкции ИПГ используется колебательная система в виде упругого элемента (см. рис.1). Этот элемент во время перегрузки сжимается, накапливая энергию упругой деформации. Затем, если длительность инерционной перегрузки  $\tau$  меньше периода резонансных колебаний первичного преобразователя ИПГ  $T_{рез}$  ( $\tau < T_{рез} = f_{рез}^{-1}$ ), возникает так называемый баллистический режим колебаний упругого элемента с присоединенной массой вблизи собственной частоты. В процессе таких колебаний пьезоэлемент многократно подвергается силовому воздействию с резонансной частотой  $f_{рез}$ , каждый раз "накачивая" в накопитель порцию энергии в соответствии с (1). При этом число затухающих колебаний системы  $N_e$  по уровню  $e^{-1}$  и, следовательно, число силовых воздействий на пьезоэлемент, будет определяться собственной частотой  $\omega_0$  и добротностью конструкции  $Q$ , связанных между собой соотношением  $Q = \pi N_e$ . Выделяемая пьезоэлементом энергия за период времени  $t$ , как сумма энергий от всех колебаний за этот период времени, с учетом их затухания определяется выражением:

$$W_n = Q \frac{d_{33}^2}{\epsilon \epsilon_0} \sigma_0^2 \Omega \frac{1 - \exp\left(-\frac{\omega_0 t}{2Q}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{Q}\right)}. \quad (2)$$

При вполне реальном значении добротности  $Q = 100$  за время падения амплитуды затухающих колебаний в  $e$  раз, то есть за время  $t = 2Q/\omega_0$ , при колебаниях вблизи собственной частоты 1 кГц выделенная энергия составит  $W_n \approx 2,9$  Дж/см<sup>3</sup>.

Как было отмечено выше, чтобы запустить баллистический режим колебаний необходимо, чтобы период резонансных колебаний упругой системы генератора  $T_0 = 2\pi/\omega_0$ , который определяется ее конструкцией и материалами, был соизмерим или превышал время  $\tau$  импульсного инерционного воздействия на ИПГ. Это означает, что ИПГ, описанные в [1, 2], каждый раз требуется перенастраивать под параметры импульсной перегрузки или использовать достаточно "мягкие" упругие системы с низкой резонансной частотой. Но в таком случае в соответствии с (2) энергетическая эффективность генератора падает. Реализация оригинальных конструктивных решений в модифицированных версиях ИПГ позволила избежать этого недостатка и не допустить снижения эффективности генератора в условиях импульсных перегрузок различной длительности. Выходной сигнал с преобразователя генератора при воздействии на него небольшой импульсной перегрузки порядка 75g представляет собой свободные затухающие колебания с частотой 1280 Гц в системе первичного преобразователя с добротностью  $Q = 120$  (рис.2).

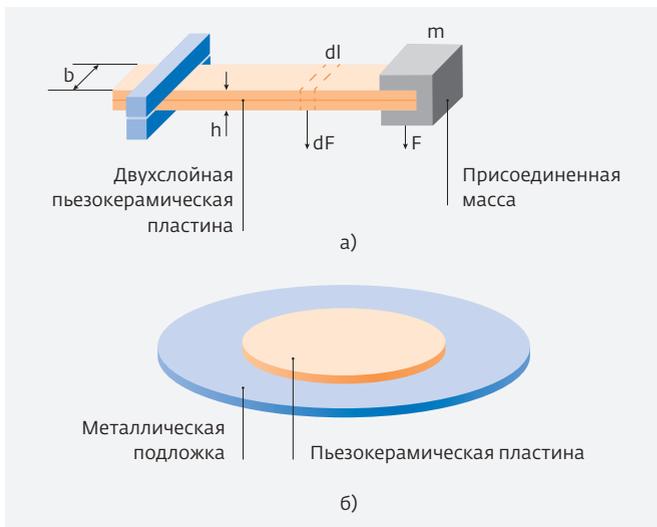
Ожидается, что при номинальных пиковых перегрузках 20 000g энергия, выделяемая разработанным авторами генератором, составит 2-3 Дж.

## ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР

Широкополосный пьезоэлектрический генератор (ШПГ) также относится к альтернативным системам генерации электрической энергии, в которых отсутствуют роторные элементы. Он предназначен для преобразования энергии механических вибраций в широком спектре частот в электрическую энергию. К таким типам вибраций относятся колебания как техногенного, так и природного характера, например, вибрации авто – и железнодорожных магистралей, мостов, плотин, зданий, а также колебания морских волн. Существующие сегодня ШПГ объемом порядка 1 дм<sup>3</sup> имеют относительно невысокую мощность – в диапазоне от единиц до сотен мкВт. Однако поскольку преобразуемые вибрации, как правило, носят непрерывный характер, то за время 10–100 секунд удается накопить несколько единиц или даже десятков мДж. Это означает, что на основе ШПГ могут быть созданы энергонезависимые системы мониторинга, в которых по каким-либо причинам, например, из-за их удаленности, неудобства доступа

или по соображениям обеспечения скрытности, не целесообразно устанавливать электрохимические батареи. К таким системам могут относиться системы сейсмической паспортизации мостов, плотин и других сооружений, а также системы мониторинга океанских акваторий. В состав систем, как минимум должны входить ШПГ, система датчиков, АЦП с памятью и радиоканал связи. Накопленная в ШПГ энергия расходуется на кратковременный запуск системы, при котором производятся измерения и запоминание контролируемых параметров. Время от времени включается радиоканал передачи накопленных данных на ближайший пункт сбора и обработки информации.

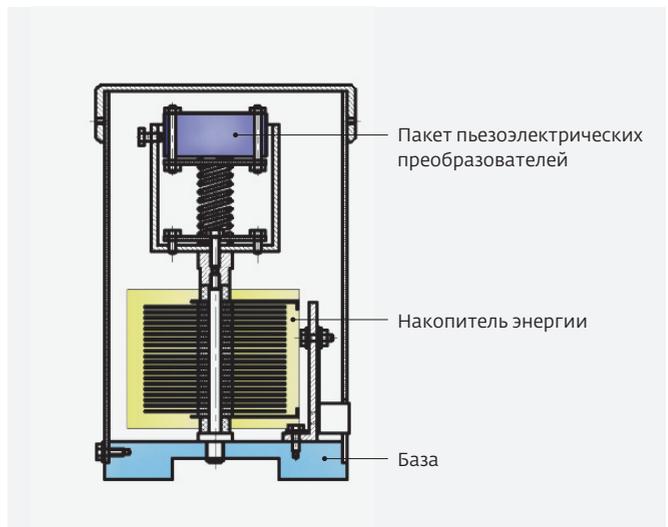
ШПГ в отличие от ИПГ преобразует относительно слабые механические воздействия в электрическую энергию, характеризующиеся перегрузками, измеряемыми не тысячами, а долями или единицами g. В связи с этим в их конструкции используются не осевые, а изгибные пьезоэлектрические преобразователи, эффективность генерирования энергии которыми в области слабых силовых воздействий существенно выше. Как правило, в качестве таких



**Рис.3.** Две разновидности пьезоэлектрических преобразователей изгибного типа: а) двухслойная пьезокерамическая пластина с внутренними и внешними электродами (в консольном креплении) с присоединенной массой; б) двухслойная структура в виде упругой металлической подложки и наклеенной на нее гомогенной пьезокерамической пластиной.

преобразователей используют биморфные структуры, состоящие из двух жестко соединенных слоев пьезоэлектрика с электродами или из одного слоя пьезоэлектрика, прикрепленного к гибкой металлической мембране (рис.3).

Важнейшим фактором, влияющим на работу ШПГ, является способ передачи энергии колебаний среды к изгибным пьезоэлектрическим преобразователям. Можно выделить три механизма такой передачи. Во-первых, вместе со средой может колебаться корпус ШПГ с биморфными структурами, которые, обладая собственной массой, и, возможно, присоединенной массой, будут прогибаться с частотой внешнего воздействия под действием инерционных перегрузок. Второй механизм запуска колебаний изгибных преобразователей обусловлен прохождением упругой волны по корпусу и внутренней арматуре, на которой закреплены преобразователи. И, наконец, третий вариант, как и в случае ИПГ, связан не с прямой передачей, а с предварительным накоплением энергии внешних колебаний в виде кинетической или потенциальной энергии в какой-либо массивной колебательной системе ШПГ, а затем порционной отдаче энергии, как правило, в виде прямого или косвенного дозированного удара по изгибному преобразователю. В этом случае удастся возбудить колебания в преобразователе на его резонансной

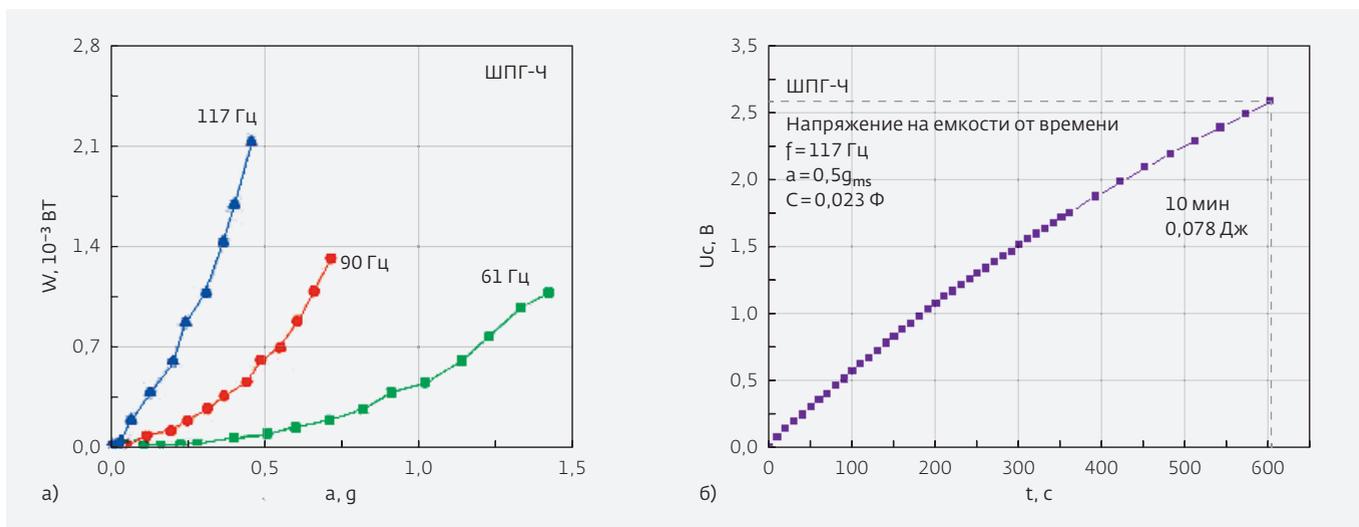


**Рис.4.** Конструкция ШПГ

частоте, что гораздо эффективнее с энергетической точки зрения.

Имеется множество вариантов конструкций ШПГ, описанных, например, в патентах [3-5]. Мощность генерации этих конструкций, как правило, лежит в области микроваттных значений. Тем не менее, в [4] отмечается, что мощность генерации может составлять милливатты, если длина ленты преобразователей в ШПГ превысит один метр. Авторами данной статьи предложен ШПГ, в котором используется комплексный канал возбуждения изгибных элементов. Его конструкция включает базу и пакет пьезоэлектрических преобразователей, возбуждаемых в режиме баллистических колебаний на резонансной частоте ударным элементом накопителя энергии (рис.4). Благодаря комбинированному возбуждению пьезопреобразователей обеспечивается широкополосная частотная характеристика и достаточно высокая эффективность ШПГ компактной конструкции с мощностью генерации, лежащей в микро- и милливаттном диапазоне в зависимости от интенсивности преобразуемых колебаний.

Характерные зависимости выделяемой генератором мощности на нагрузку 100 Ом от ускорения в полосе частот 60-120 Гц показывают, что разработанный ШПГ объемом 1 дм<sup>3</sup> способен обеспечивать мощность на уровне мВт (рис.5). В ШПГ объемом 1 дм<sup>3</sup> может быть размещено несколько десятков элементов преобразователей. Это означает, что такой генератор или генерирующий блок из нескольких ШПГ способен обеспечить запуск АЦП с памятью с периодичностью от нескольких единиц до десятков секунд.



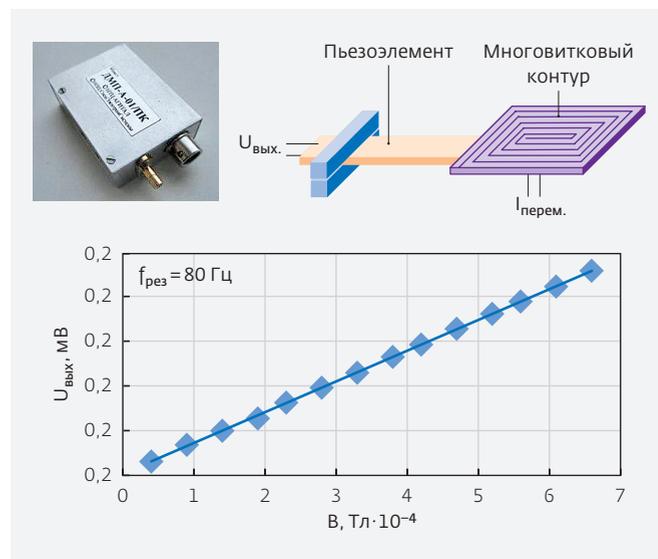
**Рис.5.** Зависимость мощности, выделяемой ШПГ, от ускорения при колебаниях на различных частотах (а) и скорость заряда накопителя емкостью 0,023 Ф в пересчете на один элемент пакета преобразователей (б)

### ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

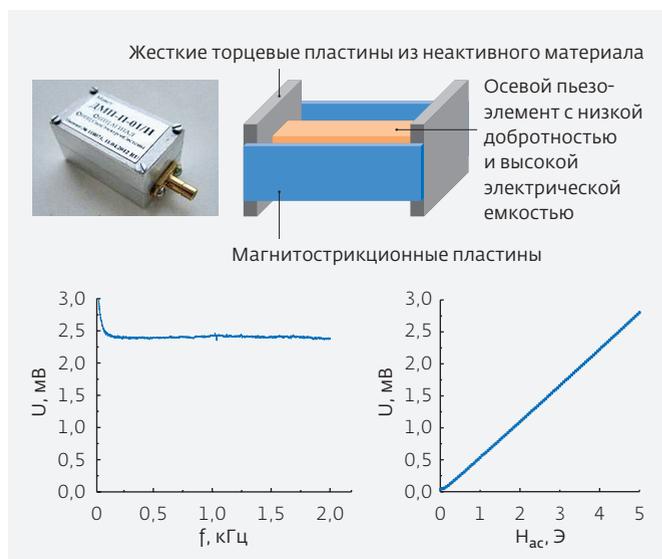
подавляющее большинство пьезоэлектрических датчиков магнитного поля по принципу их действия можно разделить на две группы: датчики на комбинации эффекта от силы Ампера и прямого пьезоэлектрического эффекта [6–13] и датчики на комбинации магнитострикционного и пьезоэлектрического эффектов [14–16]. Датчики первой группы относятся к активным устройствам, т.е. в процессе работы они потребляют электрическую энергию. Эти датчики способны контролировать как постоянные, так и переменные магнитные поля очень низкой частоты, которые характеризуются магнитной индукцией от  $10^{-9}$  Тл и выше. Датчики второй группы – пассивные, т.е. относятся к категории энергонезависимых устройств и предназначены для контроля только переменных магнитных полей. Оба этих вида датчиков выгодно отличаются от широко известных датчиков Холла тем, что в их конструкции не используются полупроводниковые материалы и, следовательно, они потенциально более устойчивы к радиационному воздействию и обладают повышенной рабочей температурой. Кроме того, один из этих типов датчиков, в отличие от датчиков Холла, является энергонезависимым.

Для конструкций датчиков первого типа, описанных в [6–9, 12,13], характерная чувствительность составляет 10–100 В/Тл. В [10, 11] достигнута, пожалуй, рекордная крутизна преобразования для датчиков такого типа – более 330 В/Тл. Относительная чувствительность, с учетом величины тока питания 55 мА, составляет порядка 6000 В/Тл·А. Такая чувствительность достигнута благодаря использованию

многовиткового контура в качестве первичного преобразователя магнитной индукции в силовое воздействие (рис.6). Первичное силовое воздействие проявляется в виде пары сил Ампера  $F_A = NI\mu_0\mu_0HS/A$ , приложенной к свободному концу и точке А биморфного пьезоэлектрического преобразователя, закрепленного консольно.



**Рис.6.** Схема первичного преобразователя, общий вид макетного образца и выходная характеристика активного датчика постоянного магнитного поля на основе комбинации изгибного пьезоэлектрического преобразователя и плоского многовиткового контура с током на резонансной частоте [11]



**Рис.7.** Схема первичного преобразователя, общий вид макетного образца, частотная и выходная характеристики энергонезависимого радиационно-стойкого датчика магнитного поля на основе комбинации пьезоэлектрического и магнитострикционного эффектов [16]

Для энергонезависимых датчиков, т.е. датчиков второго типа, высокая чувствительность обычно достигается лишь в узкой полосе частот вблизи резонансной частоты конструкции, что существенно снижает их функциональную значимость [14–16]. В датчиках второго типа, описанных в [16], удалось избежать такого недостатка и за счет использования низкодобротного многослойного пьезоэлектрического элемента с высокой электрической емкостью достигнуть чрезвычайно широкой полосы частот (от 0,3 кГц до 2 кГц), в которой его чувствительность (20–30 В/Тл) практически неизменна, а выходная характеристика линейна (рис.7).

Чувствительность таких датчиков примерно на порядок выше кремниевых преобразователей Холла, они энергонезависимы и обладают высокой радиационной стойкостью. Разработанные макетные образцы могут быть миниатюризированы до размеров, позволяющих помещать их в стандартные корпуса приборов микроэлектроники и использовать при монтаже печатных плат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Jahangir S.Rategar, Stony Brook, Carlos M.Pereira, Tannersville, Richard Dratler, Montville.** Energy harvesting power sources for validating firing; determining the beginning of the free flight and validating booster firing and duration – Патент США № 7762192 В2, июль, 27, 2010.

2. **Jahangir Rastegar, Richard Murray.** Energy harvesting power sources for a wide range of applications – SPIE, 2007
3. **Zheng Yi-Daniel Xu.** Micromachined, piezoelectric vibration-induced energy harvesting device and its fabrication – Патент США № 7687977 от 10.04.2006/30.03.2010
4. **Rastegar, Jahangir S.** Electrical generators for low-frequency and time-varying rocking and rotary motion – Патент США № 7821183 от 19.06.2008/26.10.2010
5. **В.Самойлов, В.Черняев.** Пьезоэлектрический генератор постоянного тока – Патент РФ RU2113757 от 19.03.1993
6. **Ю.Фетисов, Д.Чашин.** Датчик постоянного магнитного поля – Патент на полезную модель № 102812 от 05.10.2010/10.03.2011.
7. **Ю.Фетисов, Д.Чашин, С.Лебедев и др.** Пьезоэлектрический датчик магнитного поля на основе планарной биморфной структуры с током – Нано – и микросистемная техника, № 4 (129), 2011
8. **Ю.Шульга, А.Итальянцев, Ю.Фетисов и др.** Магниточувствительные структуры на основе пьезокерамических преобразователей изгибного типа – Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, 2011, с.279.
9. **А.Итальянцев, Ю.Шульга, Н.Мамкина и др.** Магниточувствительные твердотельные гетероструктуры на основе пьезокерамических и магнитострикционных элементов – Вестник ТвГУ, серия "Физика", 2011, вып.15, с.34–43
10. **А.Итальянцев, Ю.Шульга, Н.Мамкина.** Эскизные проекты магнитоэлектрических преобразователей постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей – Вестник ТвГУ, серия "Физика", 2012, вып. 16, с. 4–14
11. **А.Итальянцев, Ю.Фетисов, Д.Чашин, Ю.Шульга.** Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического преобразователя и многовиткового контура с током – Нано – и микросистемная техника, № 6 (143), 2012
12. **Givens, Robert, etc.** Lorentz force magnetometer having a resonator – Патент № 5959452 от 3.10.1997/28.09.1999
13. **Chen, Bo Su.** Method and apparatus for generating an output voltage by detecting magnetic field – Патент № 6426621 от 1.09.2000/30.07.2002
14. **Yi-Qun Li, Robert C. O'Handley, Gerald F.Dionne, Chun Zhang.** Passive magnetic field sensors having magnetostrictive and piezoelectric materials – Патент США № 6809516 от 05.04.2000/26.10.2004
15. **Dwight Viehland, Shu-Xiang Dong, Jie-Fang Li.** Magnetoelectric magnetic field sensor with longitudinally biased – Патент США № 7023206 от 20.10.2003/04.04.2006
16. **А.Итальянцев, Ю.Шульга, Ю.Фетисов, Д.Чашин.** Широкополосный низкочастотный датчик магнитного поля – Патент на полезную модель № 118071 от 11.04.2012

