



УДК 621.3.082.73: 621.313.13-133.32

К. С. Козько, аспирант,
С. Ф. Петренко, **Е. Н. Безвесильная**, доктора техн. наук
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
(Украина, 03056, г. Киев, пр. Победы, 37,
тел. (093) 7750679, e-mail: kostyakozko@yandex.ru)

Расчет кольцевого резонатора пьезоэлектрического двигателя и его моделирование в программном продукте ANSYS

Определена резонансная частота кольцевого пьезоэлемента (ПЭ) в условиях его эксплуатации во вращающемся пьезодвигателе на радиальных колебаниях. Создана трехмерная модель ПЭ, определены его частотные характеристики, входная и выходная деформации, их соотношение при приложении внешнего силового воздействия обратного пьезоэлектрического эффекта в программном продукте ANSYS с помощью компоненты ANSYS Workbench. Рассчитано увеличение амплитуды выходных колебаний по отношению к входным. Приведены результаты сравнения расчетных параметров ПЭ с результатами моделирования.

Визначено резонансну частоту кільцевого п'єзоелемента (ПЕ) в умовах його експлуатації у п'єзодвигуні на радіальних коливаннях, що обертається. Створено тривимірну модель ПЕ, визначено його частотні характеристики, вхідну і вихідну деформації, їхнє співвідношення при дії зовнішнього силового впливу зворотнього п'єзоелектричного ефекту у програмному середовищі ANSYS за допомогою компоненти ANSYS Workbench. Розраховано зростання амплітуди вихідних коливань по відношенню до вхідних. Наведено результати порівняння розрахункових параметрів ПЕ з результатами моделювання.

К л ю ч е в ы е с л о в а: кольцевой пьезоэлемент, трехмерная модель, пьезоэффект, пьезодвигатель, конечно-элементное моделирование.

Современные технические требования, предъявляемые к высокоточным системам, обуславливают необходимость углового разрешения (минимального углового разворота вала) исполнительных элементов таких систем при сравнительно большом моменте на валу (0,1 ... 1,0 Нм). Такие системы должны обеспечивать фиксацию углового положения вала значительным моментом и обладать высокими динамическими характеристиками (время разгона и торможения равно 1 мс при скорости до 1 об/с).

В настоящее время для таких задач весьма успешно применяют пьезоэлектрические двигатели, имеющие неоспоримые преимущества по срав-

нению с традиционными двигателями. В пьезоэлектрическом двигателе поступательное движение ротора осуществляется посредством преобразования электрической энергии в механическую в результате обратного пьезоэлектрического эффекта.

Базовым элементом любого пьезодвигателя является пьезоэлемент (ПЭ). Пьезоэлементы могут иметь различную конфигурацию, определяемую спецификой их использования. Будем использовать кольцевые ПЭ из пьезокерамики ЦТБС-3 [1]. В известной литературе [1—5] отсутствуют расчеты характеристик, необходимых для определения резонансной частоты работы кольцевого ПЭ, а также сведения о создании трехмерной модели данного элемента, о его частотных характеристиках, не приведены данные расчетов усиления амплитуды выходных колебаний по отношению к входным. Поэтому представляется целесообразным выполнить расчет кольцевого резонатора пьезодвигателя и провести моделирование его в программном продукте ANSYS.

Для решения этой задачи необходимо рассчитать характеристики резонансной частоты кольцевого ПЭ № 20 [2] из материала ЦТБС-3, создать трехмерную модель данного элемента, определить характеристики его входной и выходной деформации и их соотношения при приложении внешнего силового воздействия в результате обратного пьезоэлектрического эффекта в программном продукте ANSYS с помощью компоненты ANSYS Workbench.

Расчет характеристик ПЭ и его резонансной частоты. Резонансная частота — это частота, на которой амплитуда колебаний относительно выходной оси значительно превышает амплитуду колебаний относительно входной оси. Для кольцевого ПЭ это — соответственно радиальная ось и ось цилиндра. При радиальных колебаниях осевая линия остается круговой с периодически изменяющимся радиусом. Циклическая частота собственных колебаний (резонансная) составляет [3] $\omega_0 = \sqrt{E/(\rho R)^2} \text{ с}^{-1}$, где R — радиус осевой линии кольца, м; ρ — плотность материала.

Уточненная с учетом конструктивных характеристик формула для вычисления резонансной частоты кольцевого ПЭ имеет вид [2]

$$F_r = \frac{2V_1^\varepsilon t}{\pi(D+d)} \text{ (Гц)},$$

где V_1^ε — скорость звука в ПЭ, м/с; t — поправка, вводимая в зависимости от соотношения d/D ; D и d — наружный и внутренний диаметры, м; ε — относительная диэлектрическая проницаемость.

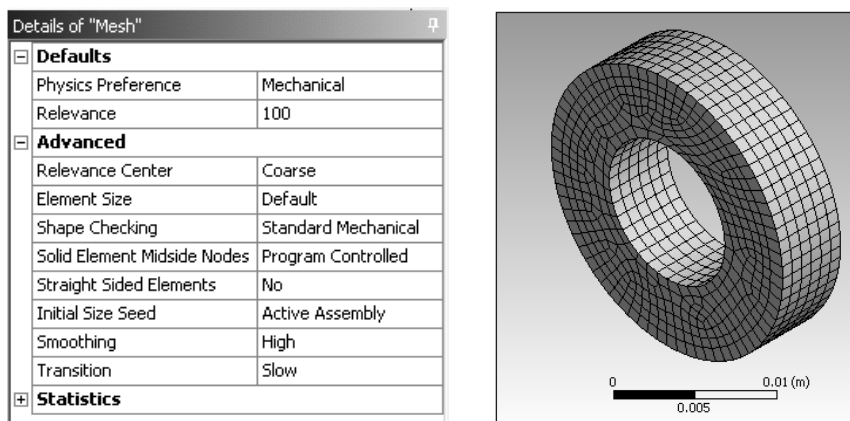


Рис. 1. Сетка, нанесенная на исследуемую модель (экранный форма)

Согласно условиям поставленной задачи используем кольцевой элемент № 20 из пьезокерамики ЦТБС-3. Значения параметров, необходимые для вычисления, следующие: $D = 0,02$ м, $d = 0,01$ м, $V_1^e = 3,47 \cdot 10^3$ м/с. Поскольку $d/D = 0,01/0,02 = 0,5$, согласно[2] $t \approx 1,04$. Резонансная частота

$$F_r = \frac{2 \cdot 3470 \cdot 1,04}{\pi (20 + 10)} = 76581 \text{ Гц.}$$

Определение характеристик кольцевого ПЭ методом конечных элементов. Для решения данной задачи с учетом необходимых условий задана сетка типа Mechanical и точные параметры Coarse. Экранный форма полученной сетки, имеющей 12285 узлов и 2490 элементов, показана на рис. 1. После подготовки сетки необходимо создать вручную в компоненте Engineering Data материал ЦТБС-3, из которого изготовлен кольцевой ПЭ, так как в стандартной базе ANSYS этот материал отсутствует. Для выбранных типов анализа необходимы следующие параметры:

модуль Юнга $E = 7,1942 \cdot 10^{10}$ Па;

коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;

плотность вещества $\rho = 7200$ кг/м³;

предел механической прочности при растяжении $\sigma_p = 2,16 \cdot 10^7$ Па и сжатии $\sigma_{сж} = 3,92 \cdot 10^8$ Па.

Созданный материал необходимо задать в свойстве Material геометрии модели, после чего можно переходить к первому анализу — модальному. Для этого необходимо добавить тип анализа Modal, задать его условия и ограничения для модели. В качестве условий анализа задаются нижний и верхний пределы поиска «локальных резонансов», а также их максимальное количество.

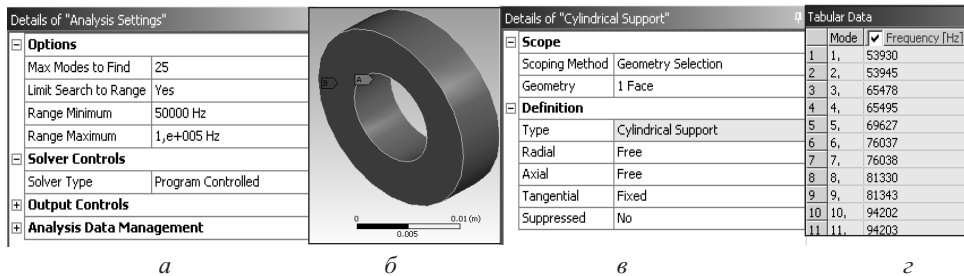


Рис. 2. Определение «локальных резонансов» с помощью Modal Analysis (экранная форма)

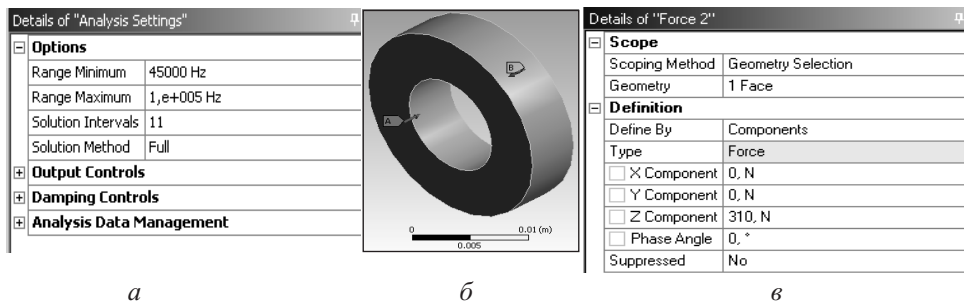


Рис. 3. Условия для поиска резонансной частоты (экранная форма)

Для данной модели в соответствии с полученной математическим способом резонансной частотой поиск выполняется при частоте от 50 до 100 кГц и с максимальным числом значений локальных резонансов, равным 25 (рис. 2, а). Ограничения накладываются на внешнюю и внутреннюю цилиндрические поверхности: ограничения Cylindrical Support (рис. 2, б) и запрет вращения с помощью свойства Tangential (рис. 2, в). После задания всех условий для выполнения моделирования нажимаем кнопку Solve. Результаты анализа показаны на рис. 2, г.

Определив частоты локальных резонансов, переходим к следующему этапу — поиску резонансной частоты с помощью Harmonic Response. Для первоначальной оценки резонансной частоты достаточен диапазон от 50 до 100 кГц с шагом 5 кГц. Однако, поскольку ANSYS Workbench не учитывает нулевой шаг, т.е. значение нижней границы, в условиях анализа задаем нижнюю и верхнюю границы частоты соответственно 45 и 100 кГц и число шагов расчета, равное 11 (рис. 3, а).

Кроме ограничений, задаваемых так же, как на рис. 2, б, в, для определения резонансной частоты необходимо задать величину силы, воздействующей на ПЭ вдоль поперечной оси вследствие обратного пьезо-

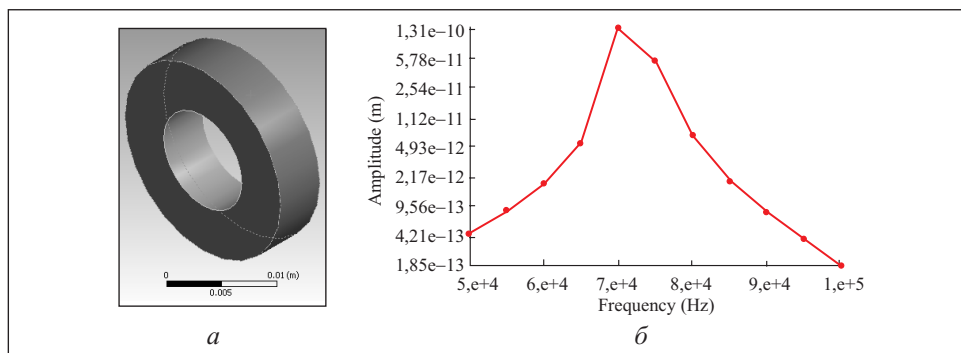


Рис. 4. Результаты частотного анализа в диапазоне 50—100 кГц (экранная форма)

электрического эффекта и создающую деформацию, которая усиливается при резонансной частоте на радиальной оси (рис. 3, б). Величину этой силы рассчитываем, исходя из величины входного напряжения $U_{\text{вх}}$.

Используя формулы, приведенные в [4, 5], запишем выражение для определения силы, приложенной к кольцевому ПЭ вдоль входной оси:

$$F_{\text{вх}} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0LU_{\text{вх}}}{k_1 \ln\left(\frac{D}{d}\right)},$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\varepsilon = 2325$; k_1 — пьезоэлектрический модуль, $k_1 = 360 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; $U_{\text{вх}}$ — входное напряжение в рабочем режиме пьезодвигателя, $U_{\text{вх}} = 120$ В.

В результате расчетов получаем

$$F_{\text{вх}} = \frac{2\pi \cdot 2325 \cdot 8,87 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 120}{360 \cdot 10^{-12} \ln\left(\frac{20 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}}\right)} = 310 \text{ Н.}$$

Следовательно, силу, действующую на ПЭ, задаем равной 310 Н (рис. 3, в).

После проведения моделирования, необходимо узнать, в каком диапазоне частот находится резонанс. Для этого воспользуемся инструментом Frequency Response. Будем исследовать колебания наружной цилиндрической поверхности относительно продольной оси (рис. 4, а). Результаты вычисления частотного анализа показана на рис. 4, б.

При оценке полученных результатов вычисления создается впечатление, что резонансная частота найдена, так как вблизи самой высокой точки находится только одна частота. Однако следует помнить, что первый анализ

является оценочным и имеет достаточно большой шаг расчета — 5 кГц. Поэтому необходимо проверить диапазон частот 70 ± 5 кГц. Поскольку вблизи границ этого диапазона находятся еще несколько частот локальных резонансов, а также с учетом того, что в данный диапазон не входит значение резонансной частоты, полученное математически, целесообразно расширить диапазон проверки так, чтобы он покрывал соседние частоты локальных резонансов, включая величину расчетной резонансной частоты, и задать его в пределах от 60 до 80 кГц при числе шагов 10, т.е. с шагом 2 кГц.

Результаты анализа в данном диапазоне частот представлены на рис. 5, из которого видно, что амплитуда колебаний на частоте 70 кГц действительно значительно больше, чем амплитуды на соседних частотах. Однако повышение амплитуды на частоте приблизительно 76 кГц, незамеченное в предыдущем анализе, значительно превышает значение на частоте 70 кГц. Следовательно, расширение диапазона проверки вполне оправдано.

На частоте 76 кГц имеются два локальных резонанса: 76037 и 76038 Гц. Проведем анализ этих частот в диапазоне от 76030 до 76040 Гц при числе шагов 10, т.е. с шагом в 1 Гц. Результаты такого анализа приведены на рис. 6, а, из которого видно, что резонансной частотой является частота 76037 Гц. Для более эффективной оценки резонанса необходимо построить график Frequency Response вдоль оси цилиндра и использовать табличные данные (рис. 6, б, в).

Анализ полученных результатов. Определив резонансную частоту, необходимо рассчитать усиление амплитуды колебаний в кольцевом ПЭ, определяемое отношением амплитуды A_x (см. рис. 6, б) к амплитуде поперечной оси A_z (см. рис. 6, в) на частоте 76037 Гц:

$$\frac{A_x}{A_z} = \frac{1,46 \cdot 10^{-6}}{2,02 \cdot 10^{-8}} = 72,277.$$

Полученный результат свидетельствует о том, что выходной сигнал интенсивнее в 72 раза по сравнению с входным, что является достаточным для использования кольцевого ПЭ в пьезоэлектрическом двигателе.

Зная амплитуду выходных колебаний, можно оценить максимальную скорость вращения пьезоэлектрического двигателя. Как известно, в пьезоэлектрическом двигателе колебания резонатора передаются толкателям, которые, в свою очередь, вращают ротор двигателя. Амплитуда колебаний при этом сохраняется по абсолютной величине, но при движении ротора раскладывается на две составляющие: $A_k = \sqrt{A_n^2 + A_t^2}$, где A_n — нормальная составляющая; A_t — тангенциальная составляющая. Поскольку при работе

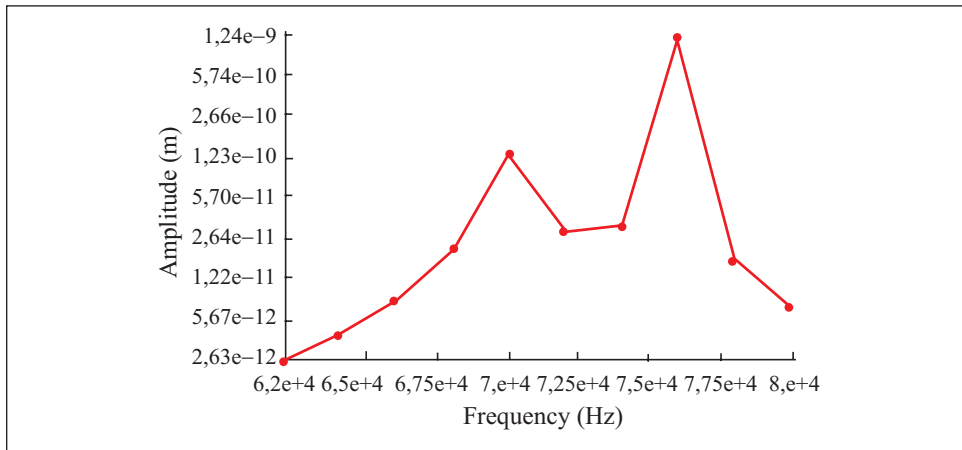


Рис. 5. Результаты частотного анализа в диапазоне 60—80 кГц (экранная форма)

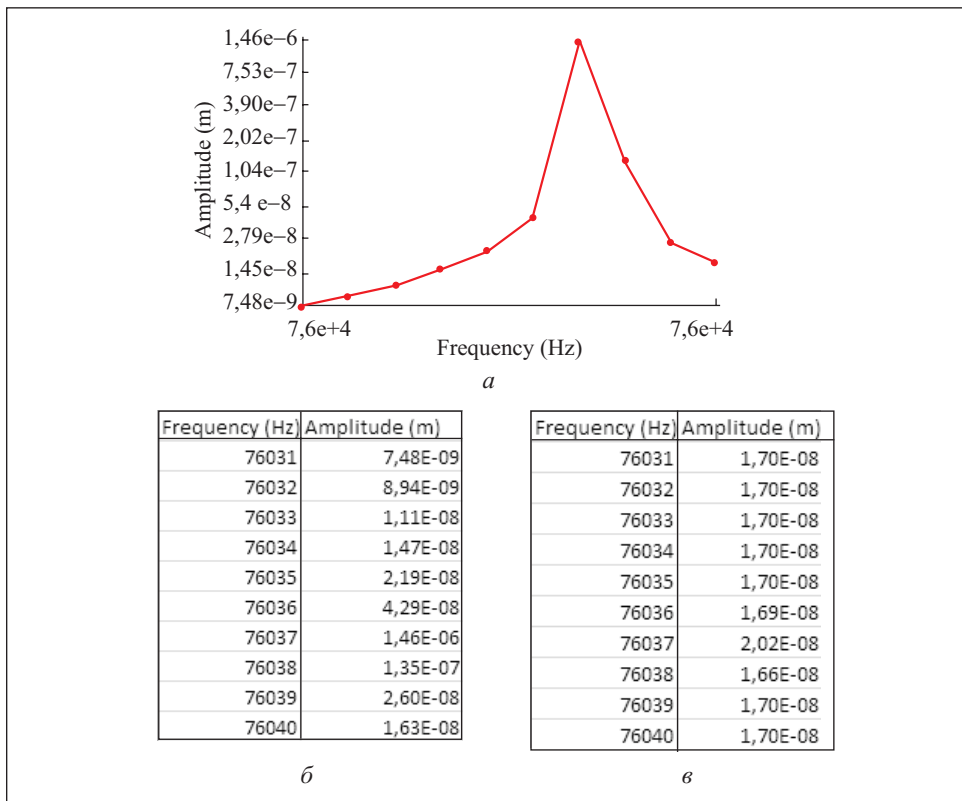


Рис. 6. Результаты частотного анализа в диапазоне 76030 — 76040 Гц (экранная форма)

пьезоэлектрического двигателя рабочей составляющей является A_τ ($A_\tau \gg A_n$), нормальной составляющей можно пренебречь. Тогда $A_x = A_\tau$.

Угловую скорость вращения ротора пьезоэлектрического двигателя определяем по формуле

$$\omega = \frac{A_\kappa F_r}{\pi D_p},$$

где D_p — диаметр ротора, $D_p = 35 \cdot 10^{-3}$ м для двигателя с кольцевым ПЭ № 20 [2]. В результате расчетов получаем

$$\omega = \frac{1,46 \cdot 10^{-6} \cdot 76037}{\pi 35 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ об/с} = 60 \text{ об/мин},$$

что соответствует скорости вращения двигателя, приведенной в [2].

Поскольку расчет резонансной частоты выполнен двумя способами, необходимо проанализировать соответствие результатов, полученных с помощью моделирования методом конечных элементов и математических расчетов. Относительная погрешность составляет

$$\frac{f_p - f_{\text{мод}}}{f_p} 100\% = \frac{76851 - 76037}{76851} 100\% = 0,7\%,$$

где f_p — расчетная резонансная частота; $f_{\text{мод}}$ — резонансная частота, полученная при моделировании методом конечных элементов.

Из [2] известно, что диапазон резонансных частот колеблется в пределах 76 — 82 кГц. Соответственно величины расчетной и смоделированной резонансных частот находятся в допустимом диапазоне. При этом погрешность 0,7% не является большой относительно ширины диапазона.

Уменьшая влияние факторов, влияющих на результат, можно уменьшить расхождение между моделью и результатами расчетов. Но даже при рассмотренных условиях можно сделать вывод о том, что использование метода конечных элементов дает достаточно хорошие результаты, позволяющие уменьшить число сложных и дорогостоящих натуральных экспериментов при создании пьезоэлектрических двигателей.

Выводы

Проведенный анализ кольцевого ПЭ показал, что расчетная резонансная частота для кольцевого ПЭ № 20 составляет 76581 Гц, резонансная частота, полученная конечно-элементным моделированием, — 76037 Гц. Разница между частотами, полученными двумя способами, составила 0,7%.

Коэффициент усиления амплитуды выходных колебаний по сравнению с входными равен 72. Скорость вращения ротора пьезоэлектрического двигателя равна 60 об/мин. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими сведениями, приведенными в литературе. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности моделирования кольцевых ПЭ методом конечных элементов для сокращения материалоемкости и стоимости, а также повышения эффективности исследований при проектировании пьезоэлектрических двигателей.

Resonance frequency of ring piezoelement (PE) when it is used in rotary piezomotor with radial oscillations is determined. Three-dimensional model of PE is created, its frequency parameters, input and output strains and their ratio under action of external force caused by the inverse piezoelectric effect are determined in ANSYS software environment using the ANSYS Workbench component. Output oscillations amplitude gain relative to input ones is calculated. Calculated parameters are compared with results of modeling.

1. Смажневская Е. Г., Фельдман Л. Б. Пьезоэлектрическая керамика. — М. : Сов. радио, 1971. — 200 с.
2. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. — Киев: «Корнійчук», 2002. — 96 с.
3. Справочник машиностроителя: в 6 т. Т.3. / Под ред. С. В. Серенсена. — М. : Машгиз, 1962. — 652 с.
4. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. — М. : Наука, 1964. — 848 с.
5. Безвесільна О. М. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: Підручник. — Житомир: ЖДТУ, 2008. — 700 с.

Поступила 19.12.11

КОЗЬКО Константин Сергеевич, аспирант кафедры приборостроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т», который окончил в 2012 г. Область научных исследований — пьезоэлектрические преобразователи и двигатели; численные методы и программное обеспечение; системы и средства управления.

ПЕТРЕНКО Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т». В 1975 г. окончил Московский инженерно-физический ин-т. Область научных исследований — пьезоэлектрические преобразователи и двигатели.

БЕЗВЕСИЛЬНАЯ Елена Николаевна, д-р техн. наук, профессор кафедры приборостроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т», который окончила 1972 г. Область научных исследований — пьезоэлектрические преобразователи и двигатели; численные методы и программное обеспечение; системы и средства управления, методы измерения механических величин, гравиметрические системы.

