

## Раздел I. Моделирование процессов, устройств и систем

УДК 534-13

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-6-16

**Е.С. Алексюнин**

### ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТРОЙСТВ ОХЛАЖДЕНИЯ

*Развитие современных систем подачи воздуха для охлаждения технических систем требует новых подходов, в которых приборостроение использует пьезокерамические технологии. При этом необходимо провести исследования как на уровне подбора новых перспективных пьезоматериалов, что и было сделано в работе, так и новых типов компоновки устройства с точки зрения конструкции. Традиционно используемые системы охлаждения имеют вращающиеся части, создают дополнительный акустический шум. Этих недостатков лишены устройства подачи воздуха, использующие пьезокерамические компоненты. Статья содержит материалы о разработке современных устройств охлаждения, основанных на использовании пьезокерамических пластин. Проведён анализ процессов, происходящих в воздушной среде в соответствии с современными представлениями о теории вещества. Приведены различные варианты проектирования такого рода устройств. Рассмотрен процесс проектирования от математического моделирования до воплощения в макетах. Моделированию были подвергнуты как сами пьезокерамические устройства, так и процессы распределения потоков в воздушной среде. В процессе моделирования исследованы наиболее простые в изготовлении и надёжные в эксплуатации конструкции. Все рассмотренные варианты относятся к пьезоэлектрическому биморфному типу, и являются пьезоэлектрическими актюаторами, преобразующими электрические сигналы в механические усилия. Приводятся различные схемы компоновки таких колебательных систем, демонстрируются варианты их математического моделирования, конечно-элементные модели воздушной среды, амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики моделируемых макетов. Проводится сравнительный анализ изделий, их электрофизических характеристик, исходя из перспектив дальнейшего применения. Для исследований применялись различные пьезокерамические материалы, как традиционные, так и новые перспективные материалы. Ряд изделий представлен в размерах с детальным описанием, приведены их сравнительные характеристики. В заключении сделаны выводы о перспективных вариантах дальнейшего проектирования таких устройств и направлениях исследования.*

*Пьезокерамический биморф; конечно-элементная модель; устройства охлаждения; актюатор.*

**E.S. Aleksyunin**

### RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SMALL-SIZED ULTRASONIC COOLING DEVICES

*The development of modern air supply systems for cooling technical systems requires new approaches in which instrumentation uses piezoceramic technologies. At the same time, it is necessary to conduct research both at the level of selection of new perspective piezomaterials, which was done in the work, and of new types of device layout from the point of view of design. Traditionally used cooling systems have rotating parts that create additional acoustic noise. These drawbacks are devoid of air supply devices using piezoceramic components. The article contains materials on the development of modern cooling devices based on the use of piezoceramic plates. The analysis of the processes occurring in the air in accordance with modern ideas about the theory of matter. Various design options for such devices are given. The design process from mathematical modeling to implementation in mock-ups*

*is considered. Both the piezoceramic devices themselves and the flow distribution processes in the air were subjected to modeling. In the process of modeling, the simplest to manufacture and reliable in operation structures were investigated. All considered variants belong to the piezoelectric bimorph type, and are piezoelectric actuators that convert electrical signals into mechanical forces. Various layout schemes for such oscillatory systems are presented, variants of their mathematical modeling, finite element models of the air environment, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the simulated models are shown. A comparative analysis of products, their electrophysical characteristics, based on the prospects for their further application is carried out. For research, various piezoceramic materials were used, both traditional and repeatedly tested, and new promising materials. A number of products are presented in sizes with a detailed description, their comparative characteristics are given. At the end of the work, conclusions were made about promising options for the further design of such devices and areas of research.*

*Piezoceramic bimorph; finite element model; cooling devices; actuator.*

**Введение.** В последнее время актуальной является разработка малогабаритных устройств подачи воздуха для целей охлаждения сложных технических систем. Устройства, основанные на использовании пьезоэффекта, постепенно завоевывают рынок ввиду более высокой надёжности из-за отсутствия движущихся частей, небольшого тепловыделения, отсутствия дополнительного акустического шума при работе. Следует отметить ещё ряд преимуществ, таких как малое потребление энергии, компактность конструкции, долговечность, широкий температурный диапазон (от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ ). Они не создают электромагнитных помех, стойки к агрессивным средам и радиации.

Как правило, биморфные системы состоят из склеенных между собой пластин, одна из которых изготовлена из металла, другая является пьезокерамической. В некоторых случаях металлическая пластина сопрягается с двумя пьезокерамическими элементами, по одной с каждой стороны. Металлическая пластина может представлять из себя латунь, нержавеющей сталь, бериллиевую бронзу, никелевую фольгу, алюминий, титан. В отдельных случаях эта пластина может состоять из полимерного композита.

Работа устройств подачи воздуха происходит за счёт нагнетания давления воздушной массы в локальном окружении устройства и, как следствие, создание стационарного воздушного потока. Устройство охлаждения, которое использует в качестве элемента нагнетания пьезобиморф, создаёт внутри своего корпуса зоны повышенного акустического давления, что, в свою очередь, обеспечивает ускоренное перемещение воздушного потока. Звуковые колебания биморфной пластины способствуют перемещению слоя высокого давления.

На молекулярном уровне процесс происходит следующим образом. Когда биморф начинает своё поступательное движение, он толкает воздух перед собой, тем самым, заставляет молекулы воздуха двигаться перпендикулярно своей поверхности. Согласно закону Бойля-Мариотта [1] давления одного и того же количества газа при неизменной температуре обратно пропорциональны объёмам занимаемым этим количеством газа. Например, если некоторое количество газа сжимается до половины своего первоначального объёма, то давление в газе увеличивается в два раза, и наоборот, если некоторому количеству газа предоставляется двойной объём, то давление уменьшается в два раза. Это выражается уравнением:

$$PV = P_1V_1, \quad (1)$$

где  $P_1$  – начальное давление;  $V_1$  – начальный объём;  $P$  и  $V$  – соответственные значения давления и объёма при любом другом состоянии газа.

То есть, согласно этому закону, создаётся область, где плотность молекул воздуха выше и, следовательно, давление тоже выше, так как происходит сжатие окружающей среды.

После того как искривление биморфа достигает своей максимальной амплитуды, пластина останавливается, чтобы потом начать движение обратно. При движении биморфа в обратном направлении, образуется зона разрежения, вследствие

чего, плотность и давление оказывается ниже давления окружающей среды. При колебании биморфа, сжатия и разрежения воздуха повторяются. В результате непрерывно генерируются звуковые волны, представляющие собой области высокого и низкого давления, движущиеся от биморфа.

Проработки динамики такого рода процессов велись давно [2–6], но лишь в последнее время они начали завершаться фундаментальными математическими моделями [7–12], позволяющими с помощью метода конечных элементов в рабочей среде ANSYS с достаточной точностью прогнозировать поведение, как отдельных частей устройства, так и всего макета в целом.

**Основная часть.** С целью оптимизации экспериментальных устройств было разработано несколько конструкций, которые прошли стадии от математического моделирования в рабочей среде ANSYS до воплощения в макетный образец, в котором изменялись как сами геометрические конструкции устройств, так и подбирались различные пьезоматериалы [13]. В данной работе представлены наиболее эффективные модели.

Одним из вариантов моделирования было устройство, состоящее из 4-х элементов представленных на рис. 1 (конструкция №1). Четвёртый элемент – «биморф» – состоит из двух склеенных между собой пластин из нержавеющей стали различной толщины и пьезокерамического диска. Такая конструкция позволяет вынести эффективную рабочую частоту за границу слышимого диапазона (представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) на рис. 4). Конструктивный эскиз и конечно-элементная сетка модели представлены на рис. 1 и 2.

В качестве пьезоэлемента при моделировании был использован известный промышленный материал ЦТС-19.

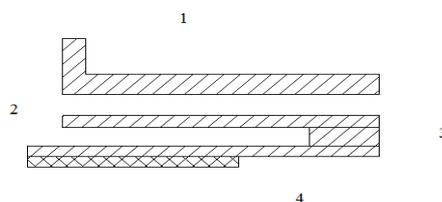


Рис. 1. Конструктивный эскиз (осесимметричная модель): 1 – корпус вентилятора с центральным отверстием (пластмасса); 2 – крышка рабочей камеры (нержавеющая сталь); 3 – разделительное кольцо (нержавеющая сталь); 4 – биморф

С целью анализа работы конструкции была применена система ANSYS для изучения колебаний биморфа, а, также, проведён гидродинамический анализ; на рис. 3 представлена конечно-элементная сетка воздушной среды.

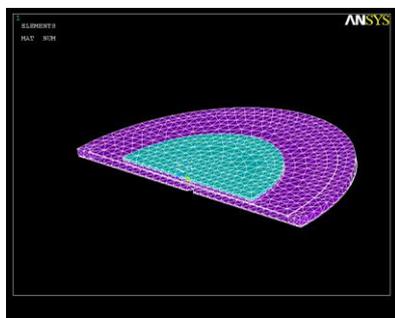


Рис. 2. Конечно-элементная модель конструкции №1

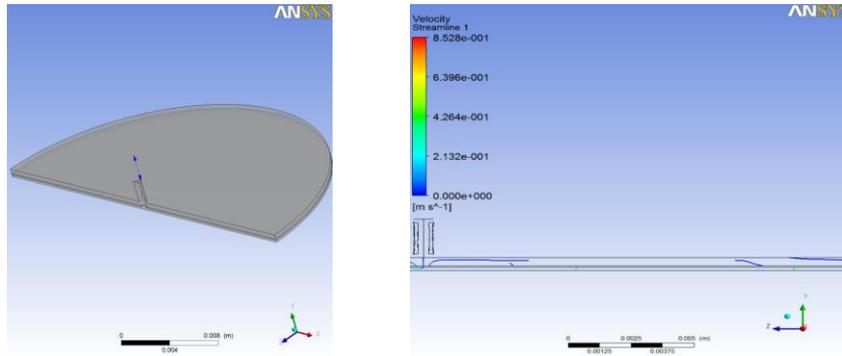


Рис. 3. Конечно-элементная модель воздушной среды

Параметры исследуемой конструкции задавались следующие:

- ◆ высота пьезокерамического диска 0,3 мм;
- ◆ высота диска из нержавеющей стали 0,1 мм;
- ◆ диаметр диска нержавеющей стали 19 мм;
- ◆ диаметр диска пьезокерамики 11 мм;
- ◆ радиус рабочей камеры 17 мм;
- ◆ высота разделительного кольца (высота рабочей камеры) 0,4мм;
- ◆ расстояние между крышкой и корпусом 0,4 мм;
- ◆ диаметр входного отверстия рабочей камеры 0,6 мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия корпуса 0,8 мм.

На рис. 4 и 5 представлены расчётные частотные зависимости модуля и фазы импеданса устройства.

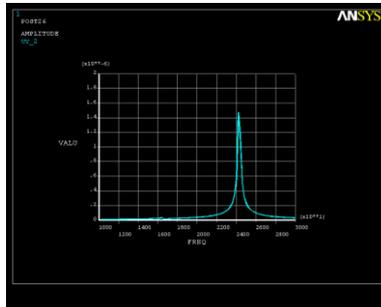


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика пластины биморфа (АЧХ)



Рис. 5. Фазово-частотная характеристика пластины биморфа (ФЧХ)

На рис. 6 приведена форма деформации конструкции №1 на частоте резонанса.

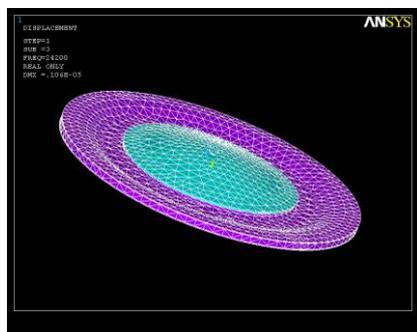


Рис. 6. Относительная деформация устройства на резонансной частоте (вид со стороны керамики)

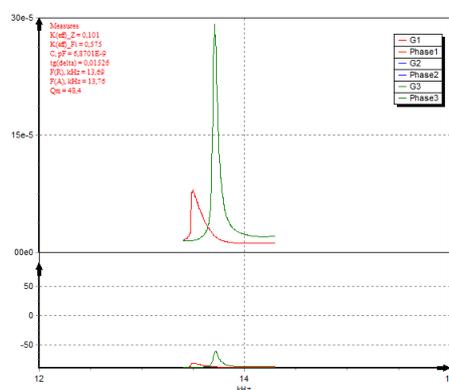


Рис. 7. Электрофизические параметры конструкции №1 в рабочей среде программного продукта для анализа электрофизических параметров

Первые конструкции имели рабочие частоты от 13 до 18 кГц и производительность порядка 0,43 л/мин, что потребовало продолжения поиска новых конструктивных решений для повышения частоты и производительности.

В качестве второй исходной модели была выбрана конструкция для биморфа на основе перспективного состава пьезокерамики ЦТС-ЦНН и латунного диска со следующими размерами:

- ◆ толщина пьезокерамического диска 0,21 мм;
- ◆ толщина диска из латуни 0,37 мм;
- ◆ диаметр латунного диска 20 мм;
- ◆ диаметр пьезокерамического диска 11 мм;

Конструктивный эскиз и конечно-элементная сетка данной модели выглядят таким же образом, как представлено на рисунке 1 и 2.

Параметры конструкции №2:

- ◆ высота разделительного кольца 0,3мм;
- ◆ расстояние между крышкой и корпусом 0,9 мм;
- ◆ диаметр входного отверстия рабочей камеры 0,6 мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия корпуса 0,8 мм.
- ◆ диаметр рабочей камеры 13 мм;
- ◆ высота разделительного кольца (высота рабочей камеры) 0,4мм;

- ◆ расстояние между крышкой и корпусом 0,4 мм;
- ◆ диаметр входного отверстия рабочей камеры 0,6 мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия корпуса 0,8 мм.

На рис. 8 и 9 представлены расчётные частотные зависимости модуля и фазы импеданса конструкции №2.

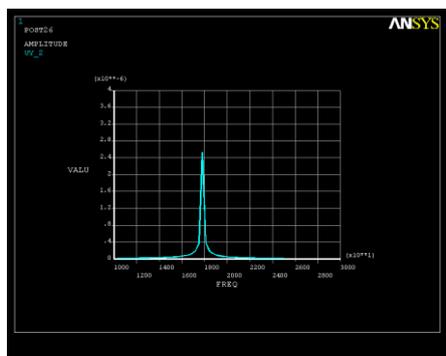


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пластины биморфа конструкции №2

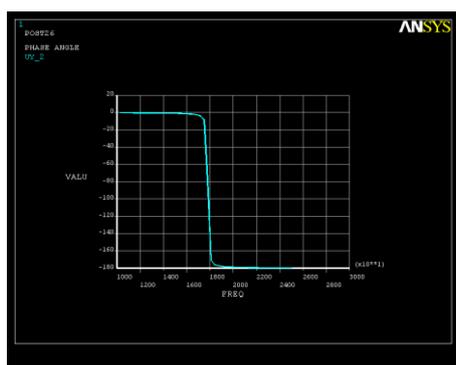


Рис. 9. Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) пластины биморфа конструкции №2

Для измерения электрофизических параметров макетных образцов были разработаны специальные пакеты программных продуктов [14–20] и новый пьезоматериал ЦТС-ЦНН. Результаты измерений электрофизических параметров конструкции №2, приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Результаты измерений электрофизических параметров образца № 2**

Наименование	Значение
С (pF):	6,7208E-9
tg(delta):	0,01384
Qm:	192,71
K(eff) Z:	0,166
K(eff) Fi:	0,123
F(R): Гц	17 001,000
F(A): Гц	17250,000

В ходе анализа конструкции №2 стало очевидным, что замена нержавеющей стали латунью и применение нового пьезоматериала не принесли существенных изменений в эффективности устройства, поэтому решено было полностью переработать саму конструкцию изделия, в результате чего перешли к моделированию конструкции №3. Образец №3 реализует идею «кузнечных мехов», при которой воздушный поток движется перпендикулярно колебаниям биморфов.

В конструкции №3 также применялась пьезокерамика из материала ЦТС-ЦНН и латунный диск с размерами, описанными в конструкции №2, а именно:

- ◆ толщина пьезокерамического диска 0,21 мм;
- ◆ толщина диска из латуни 0,37 мм;
- ◆ диаметр латунного диска 20 мм;
- ◆ диаметр пьезокерамического диска 11 мм;

Конструктивный эскиз модели представлен на рис. 10. Элемент «биморф» состоит из двух склеенных между собой дисков – из латуни и пьезокерамики. Для проведения анализа конструкции на рис. 11 представлена конечно-элементная сетка воздушной среды.

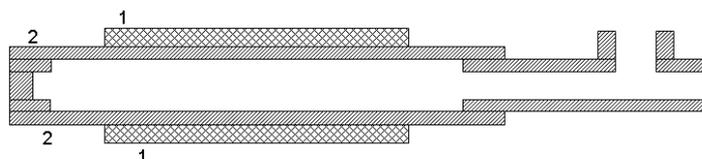


Рис. 10. Конструктивный эскиз (модель в разрезе): 1 – биморф; 2 – разделительные прокладки

Параметры конструкции №3:

- ◆ высота рабочей камеры 0,3мм;
- ◆ диаметр выходного отверстия 0,6–0,7 мм (на эскизе вверху);
- ◆ сечение входного отверстия 0,6х0,6 мм (на эскизе горизонтально справа);
- ◆ диаметр рабочей камеры 13 мм.
- ◆ расстояние между входным и выходным отверстиями 1,9 мм;
- ◆ расстояние между стенкой рабочей камеры и входным отверстием 2,0 мм;

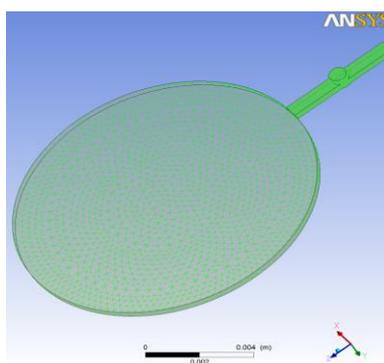


Рис. 11. Конечно-элементная модель воздушной среды

На рис. 12 и 13 представлены расчётные частотные зависимости модуля и фазы импеданса биморфов устройства.

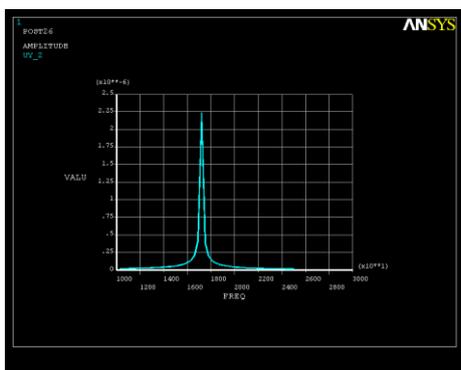


Рис. 12. АЧХ пластины биморфа

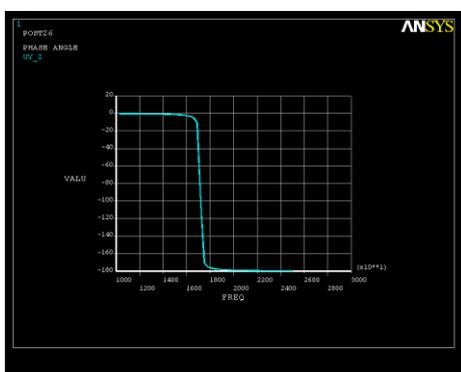


Рис. 13. ФЧХ пластины биморфа

Таблица 2

**Результаты измерений электрофизических параметров образца № 3**

Наименование электрофизической величины	Значение
C (pF):	7,25E-09
tg(delta):	0,0231
Qm:	137,5
K(eff) Z:	0,0584
K(eff) Fi:	0,3419
F(R): Гц	25 795,000
F(A): Гц	27 449,000

На основании данных, полученных в результате измерения электрофизических параметров устройств, изготовленных по расчётным моделям, наиболее перспективной оказалась конфигурация образца №3.

**Заключение.** По результатам проведения математического моделирования изготовлен ряд макетов, подтверждающих возможность создания малогабаритных устройств подачи воздуха для целей охлаждения технических систем без движущихся частей. Сформированы общие подходы к проектированию подобных устройств. По результатам макетирования можно констатировать, что наиболее перспективный образец показал лучшие результаты, а именно более высокую производительность 0,57 л/мин.

Показано, что дальнейшую модернизацию устройств охлаждения целесообразно проводить, как модифицируя саму геометрическую конструкцию, так и применяя новые пьезоматериалы с более высокими электрофизическими параметрами. Всё это позволит повысить рабочую частоту устройств до 30-40 кГц, что увеличит производительность системы охлаждения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
2. *Матаушек И.* Ультразвуковая техника: монография. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 278 с.
3. *Геригал Д.А., Фридман В.М.* Ультразвуковая технологическая аппаратура. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.
4. *Харкевич А.А.* Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы: монография. – М.: Наука, 1973. – 398 с.
5. *Каневский И.Н.* Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн: монография. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
6. *Мезон У.* Физическая акустика: монография. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
7. *Сильвестер П., Феррари Р.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
8. *Галлагер Р.* Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
9. *Vatulian A.O., Kublikov V.L.* Boundary element method in electroelasticity // Boundary Elem. Commun. – 1995. – Vol. 6. – P. 59-61.
10. *Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.* ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. – М.: УРСС, 2003. – 269 с.
11. *Басов К.А.* ANSYS в примерах и задачах / под общ. ред. Красковского Д.Г. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.
12. *Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А.* Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2009. – 168 с.
13. *Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В.* Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (доступ свободный). – Загл. с экрана. Яз. рус.
14. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613572 «Система управления измерениями и расчёта параметров Hioki ZKeff (коэффициент электромеханической связи) Hioki ZKeff v. 1.0» 06.05.2011.
15. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613567.
16. «Система управления измерениями и расчёта параметров Hioki B (реактивная составляющая проводимости пьезоэлемента) Hioki B v. 1.0» 06.05.2011.
17. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613570 «Система управления измерениями и расчёта параметров Hioki Y (полная проводимость пьезоэлемента) Hioki Y v. 1.0» 06.05.2011.
18. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613569 «Система анализа данных и управления измерениями Hioki Manager» «Hioki Manager v. 1.0» 06.05.2011.
19. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613568 «Система управления измерениями и расчёта параметров Hioki G (активная составляющая проводимости пьезоэлемента) Hioki G v. 1.0» 06.05.2011.
20. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613571 «Система управления измерениями и расчёта параметров Hioki ZC (полное сопротивление и ёмкость пьезоэлемента) Hioki ZC v. 1.0» 06.05.2011.

## REFERENCES

1. *Prandtl' L.* Hidroaeromehanika [Hydroaeromechanics]. Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2000, 576 p.
2. *Mataushek I.* Ul'trazvukovaya tekhnika: monografiya [Ultrasonic technology: monograph]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 278 p.

3. *Gershgal D.A., Fridman V.M.* Ul'trazvukovaya tekhnologicheskaya apparatura [Ultrasonic technological equipment]. 3 rd ed. Moscow: Energiya, 1976, 320 p.
4. *Kharkevich A.A.* Teoriya elektroakusticheskikh preobrazovateley. Volnovye protsessy: monografiya [The theory of electroacoustic transducers. Wave processes: monography]. Moscow: Nauka, 1973, 398 p.
5. *Kanevskiy I.N.* Fokusirovanie zvukovykh i ul'trazvukovykh voln: monografiya [Focusing sound and ultrasonic waves: monograph]. Moscow: Nauka, 1977, 336 p.
6. *Mezon U.* Fizicheskaya akustika: monografiya [Physical acoustics: monograph]. Moscow: Mir, 1966, 592 p.
7. *Sil'vester P., Ferrari R.* Metod konechnykh elementov dlya radioinzhenerov i inzhenerov-elektrikov [Finite element method for radio engineers and electrical engineers]. Moscow: Mir, 1986, 229 p.
8. *Gallager R.* Metod konechnykh elementov. Osnovy [Finite element method. The basics: transl. from engl. МЩЫЩЩЩ: Mir, 1984, 428 p.
9. *Vatulian A.O., Kublikov V.L.* Boundary element method in electroelasticity, *Boundary Elem. Commun.*, 1995, Vol. 6, pp. 59-61.
10. *Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A.* ANSYS v rukakh inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo [ANSYS in the hands of an engineer. Practical guide]. Moscow: URSS, 2003, 269 p.
11. *Basov K.A.* ANSYS v primerakh i zadachakh [ANSYS in examples and problems], under the general ed. of Kraskovskogo D.G. Moscow: Komp'yuterPress, 2002, 224 p.
12. *Mit'ko V.N., Kramarov Yu.A., Panich A.A.* Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v p'ezoelektricheskom priborostroenii: monografiya [Mathematical modeling of physical processes in piezoelectric instrumentation: monograph]. Rostov-on-Don: YuFU, 2009, 168 p.
13. *Panich A.A., Marakhovskiy M.A., Motin D.V.* Kristallicheskie i keramicheskie p'ezoelektriki [Crystal and ceramic piezoelectrics], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2011, No. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325> (dostup svobodnyy).
14. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613572 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki ZKeff (koeffitsient elektromekhanicheskoy svyazi) Hioki ZKeff v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613572 "hioki ZKeff measurement control and parameter calculation System (Electromechanical coupling coefficient) Hioki ZKeff V. 1.0" 06.05.2011].
15. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613567 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613567].
16. «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki V (reaktivnaya sostavlyayushchaya provodimosti p'ezoelementa) Hioki V v. 1.0» 06.05.2011 ["Hioki measurement control and parameter calculation system in (reactive component of piezoelectric element conductivity) Hioki in V. 1.0" 06.05.2011].
17. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613570 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki Y (polnaya provodimost' p'ezoelementa) Hioki Y v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613570 "hioki Y measurement control and parameter calculation System (full piezoelectric conductivity) Hioki Y V. 1.0" 06.05.2011].
18. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613569 «Sistema analiza dannykh i upravleniya izmereniyami Hioki Manager» «Hioki Manager v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613569 "Hioki Manager data analysis and measurement management System" "Hioki Manager V. 1.0" 06.05.2011].
19. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613568 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki G (aktivnaya sostavlyayushchaya provodimosti p'ezoelementa) Hioki G v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613568 "hioki G measurement control and parameter calculation System (active component of piezoelectric element conductivity) Hioki G V. 1.0" 06.05.2011].

20. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613571 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki ZC (polnoe soprotivlenie i emkost' p'ezoelementa) Hioki ZC v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613571 "hioki ZC measurement control and parameter calculation System (total resistance and piezoelectric element capacity) Hioki ZC V. 1.0" 06.05.2011].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.А. Строщев.

**Алексунин Евгений Сергеевич** – Научное конструкторско-технологическое бюро пьезоэлектрического приборостроения ЮФУ; e-mail: aleksunin@gmail.com; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10, оф. 406; тел.: +79289098093; инженер по информационной безопасности.

**Aleksunin Evgeniy Sergeevich** – Science design and technology bureau "Piezopribor" Southern Federal University; e-mail: aleksunin@gmail.com; 10, Mil`chakov street, of. 406, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79289098093; information security engineer.

УДК 621.311.24

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-16-29

**А.С. Болдырев, А.Л. Веревкин, К.В. Пшихопова, Л.С. Веревкина**  
**МЕТОДИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ**  
**ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ**  
**ПЛАТФОРМАМИ**

*Одним из актуальных направлений развития робототехники являются проектирование систем группового управления. В предложенной структуре группа из пяти роботизированных платформ (РП) управляется с носимого или стационарного пультов. Такой состав группы предопределяет схемы с перестраиваемыми связями между составными частями и изменением принципов функционирования. В статье приведены экспериментальные исследования вычислительной эффективности методов планирования траекторий РП в пространстве и определены оптимальный метод и требуемые параметры вычислителя РП. Рассмотрены варианты схем с разным числом РП и модели холодного резервирования РП, пультов и общего всей системы. При таком многообразии конфигураций возникают проблемы, обоснования и выбора методов расчета, и однозначного, обобщенного представления параметров надежности системы группового управления. Повышенные требования к надежности компонент системы группового управления, требуют точной оценки надежности и продиктованы значительной стоимостью оборудования и функциональным назначением. Разработанная методика предназначена для моделирования надежности разработанной системы группового управления роботизированными платформами РП. В предложенной методике показано использование структурного, вероятностного и матричного методов для расчета моделей надежности системы группового управления. А также предложен подход к моделированию надежности целочисленного, избыточного, скользящего, холодного резервирования РП и пультов управления. Полученные результаты численных расчетов параметров надежности системы группового управления, позволяют оценить риски и выбрать режимы, в зависимости от требуемой эффективности выполнения миссии.*

*Система группового управления; роботизированные платформы; наработка на отказ; надежность; резервирование; алгоритм; моделирование.*

**A.S. Boldyrev, A.L. Verevkin, K.V. Prihodova, L.S. Verevkin**  
**METHODOLOGY AND RELIABILITY MODELING OF THE GROUP**  
**CONTROL SYSTEM FOR ROBOTIC PLATFORMS**

*One of the most relevant areas of robotics development is the design of group control systems. In the proposed structure, a group of five robotic platforms (RP) is controlled from a wearable or stationary remote control. This composition of the group determines schemes*