

УДК 534.1

Конструкции и применение мощных магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей в ультразвуковых технологиях

Вьюгинова Алена Александровна^{1()}*

aavyuginova@etu.ru

SPIN-код: 6030-8272

Новик Александр Александрович²

novik.jr@gmail.com

Вьюгинов Сергей Николаевич²

inlab@utinlab.ru

Новик Александр Алексеевич²

new558@yandex.ru

Лбов Андрей Александрович²

inlab@utinlab.ru

Новик Алексей Александрович²

alexsei-newman@yandex.ru

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия²ООО «ИНЛАБ — Ультразвук», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Ультразвуковые технологии — область применения ультразвука высокой интенсивности — позволяют решать самые разнообразные задачи во всех существующих областях промышленности, внедрение ультразвуковых технологий в производственные процессы позволяет в ряде случаев существенно повысить их эффективность, а в некоторых случаях обеспечить решение задач, нерешаемых никакими другими способами. В перечень только наиболее распространенных ультразвуковых технологий входят: сварка пластмасс (термопластичных материалов), сварка металлов, резка, прошивка отверстий, пайка и лужение, просеивание порошков, экстракция, лизис, диспергирование, эмульгирование, гомогенизация, очистка и многие, многие другие. Эффективный электроакустический преобразователь, магнитострикционного или пьезоэлектрического типа, является основой ультразвуковой технологической системы. В работе рассмотрены конструкции и особенности проектирования мощных пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей для реализации различных ультразвуковых технологий.

Ключевые слова: ультразвуковая технология, мощный ультразвук, электроакустический преобразователь, пьезоэлектрический преобразователь, магнитострикционный преобразователь

Designs and applications of power magnetostrictive and piezoelectric transducers in ultrasonic technologies

Vjuginova Alena Aleksandrovna^{1(*)}

aavyuginova@etu.ru
SPIN-code: 6030-8272

*Novik Alexander Aleksandrovich*²

novik.jr@gmail.com

*Vjuginov Sergey Nikolaevich*²

inlab@utinlab.ru

Novik Alexander Alekseevich

new558@yandex.ru

Lbov Andrey Aleksandrovich

inlab@utinlab.ru

*Novik Alexey Aleksandrovich*²

alexsei-newman@yandex.ru

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

² LLC "INLAB — Ultrasonic", St. Petersburg, Russia

Abstract. Ultrasonic technologies, the field of application of high-intensity ultrasound, make it possible to solve a wide variety of tasks in all existing fields of industry, the introduction of ultrasonic technologies into production processes makes it possible in some cases to significantly increase their efficiency, and in some cases to provide solutions to problems that cannot be solved by any other means. The list of only the most common ultrasonic technologies includes: welding of plastics (thermoplastic materials), welding of metals, cutting, holes machining, soldering and tinning, sieving of powders, extraction, lysis, dispersion, emulsification, homogenization, purification and many, many others. An efficient electroacoustic transducer, magnetostrictive or piezoelectric type, is the basis of an ultrasonic technological system. The paper considers the designs and design features of power piezoelectric and magnetostrictive transducers for the implementation of various ultrasonic technologies.

Keywords: ultrasonic technology, power ultrasound, electroacoustic transducer, piezoelectric transducer, magnetostrictive transducer

Введение. В области современных ультразвуковых технологий термины «мощный ультразвук», «технологический ультразвук» и «высокоинтенсивный ультразвук» используются для ультразвуковых полей с интенсивностью свыше 0,1...1 Вт/см [1–3]. Такие мощные ультразвуковые поля используются для активного воздействия на обрабатываемую среду и служат физической основой реализации соответствующих ультразвуковых технологий.

Ультразвуковые технологии представляют собой обширное научно-практическое направление, находящее применение в различных отраслях промышленности. Их использование позволяет эффективно решать широкий спектр технологических задач, в том числе, но не только, обеспечивает реализацию следующих технологий: высокоэффективный раскрой и сварка термопластичных материалов (для бытовой и промышленной техники, автомобильных комплектующих и др.), включая пластмассы и нетканые материалы, резка пищевых и непищевых продуктов (кондитерские фабрики, производство автомобильных шин и др.), сварка металлических изделий (проводов, шин, контактов, фольги), пайка и лужение металлов, а также неметалличе-

ских материалов (керамики, стекла), просеивание порошков, обработка жидкостей (для реализации таких процессов как: ультразвуковая экстракция, лизис, диспергирование, эмульгирование, гомогенизация и др.), упрочняюще-чистовая обработка поверхности металлов, обеспечивающая снижение шероховатости и повышение твердости, снятие остаточных напряжений в сварных конструкциях, обработка расплавов металлов (с целью дегазации расплава, улучшения структуры слитка и др.) и многих других.

Каждая из указанных технологий базируется на одном или нескольких физических эффектах, инициируемых мощным ультразвуком в обрабатываемой среде. Конкретный набор эффектов определяется свойствами среды. К числу наиболее значимых эффектов относятся: кавитация, возникновение акустических потоков, ускорение диффузионных процессов, снижение трения, усиление капиллярного эффекта, снятие остаточных напряжений, локальный нагрев и др.

В промышленной практике для генерации ультразвуковых колебаний, необходимых для реализации вышеуказанных технологий, наибольшее распространение получили два типа ультразвуковых преобразователей: магнитострикционные и пьезоэлектрические. В данной работе рассмотрены конструкции, особенности проектирования и ключевые характеристики пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей для реализации различных ультразвуковых технологий.

Материалы и методы. Анализ возможностей и преимуществ применения магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей для различных технологий и требований производственных процессов целесообразно начинать со сравнительной характеристики их ключевых особенностей. Они имеют определяющее значение для эксплуатации в промышленных условиях и систематизированы в табл. 1 [4].

Таблица 1

Сравнительная характеристика электроакустических преобразователей

Параметр	Магнитострикционные преобразователи на основе пермендюра	Пьезоэлектрические преобразователи на основе ЦТС
Стабильность свойств преобразователя с течением времени	Деградация свойств не происходит	Происходит деградация свойств с течением времени и при воздействии температур ниже температуры Кюри
Температура Кюри (потеря свойств)	980	330
Рекомендуемая рабочая температура	До нескольких сотен градусов, определяется стойкостью обмотки к температуре	60–70

Окончание табл. 1

Параметр	Магнитострикционные преобразователи на основе пермендюра	Пьезоэлектрические преобразователи на основе ЦТС
Мощность стандартного единичного преобразователя	До 5 кВт	Не превосходит нескольких сотен Вт
Чувствительность к механической нагрузке / Механическая прочность	Менее чувствительны к изменениям нагрузки: большая масса, меньшая добротность / Высокая	Чувствительны к изменениям нагрузки: меньшая масса, большая добротность / Низкая
Требования к охлаждению	Водяное (в общем случае, исключения обсуждаются ниже)	Воздушное (в общем случае, исключения обсуждаются ниже)
Технология изготовления / Напряжение питания	Сравнительно сложная (подготовка пластин, пайка, герметичный корпус) / Более низкое питающее напряжение	Сравнительно простая (сборка на резьбовых соединениях) / Высокое напряжение — до 1 кВ и выше
КПД	Современные образцы — 60–80 %	70–90 %

Выбор между магнитострикционными и пьезоэлектрическими преобразователями должен базироваться на комплексном анализе требований конкретного производственного процесса, включая параметры нагрузки, температурные условия, длительность циклов работы, требования к охлаждению и экономические соображения. В последние десятилетия наблюдается тенденция к вытеснению магнитострикционных преобразователей пьезоэлектрическими. Тем не менее сохраняются технологические ниши, в которых магнитострикционные преобразователи демонстрируют существенные преимущества [4].

Рассмотрим типовые конструкции ультразвуковых преобразователей пьезоэлектрического (рис. 1, а) и магнитострикционного (рис. 1, б) типов — на рисунке приведены преобразователи производства ООО «ИНЛАБ — Ультразвук» [5]. Типовой пьезоэлектрический преобразователь Ланжевена представляет собой полуволновую $\lambda/2$ конструкцию, состоящую из четного числа пьезоэлектрических колец, задней и передней накладок, выполняемых из металла, причем металл накладок может быть как одинаковым, так и различным, в зависимости от требований к преобразователю. Типовой магнитострикционный преобразователь представляет собой конструкцию волновой длины λ , состоящую из магнитострикционного пакета ($\lambda/2$) и так называемой первой ступени из металла ($\lambda/2$).

Определение параметров геометрии преобразователей может быть осуществлено аналитическими методами [6–8], которые успешно могут применяться для простейших конструкций с приемлемой ошибкой в определении

рабочих параметров, например, для определения собственной частоты преобразователя могут быть использованы уравнения Ланжевена (1) и уравнения составного полуволнового преобразователя (2):

$$\begin{aligned} Z_{ep} \operatorname{tg}(k_e l_e) \operatorname{tg}(k_p l_p) &= 1, & Z_{ep} &= \rho_e c_e S_e / (\rho_p c_p S_p), \\ Z_{rp} \operatorname{tg}(k_r l_r) \operatorname{tg}(k_p l_p) &= 1, & Z_{rp} &= \rho_r c_r S_r / (\rho_p c_p S_p), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \cos(k_r l_r) \sin(k_p l_p) \cos(k_e l_e) - Z_{rp} Z_{ep} \sin(k_r l_r) \sin(k_p l_p) \sin(k_e l_e) + \\ + Z_{rp} \sin(k_r l_r) \cos(k_p l_p) \cos(k_e l_e) + Z_{ep} \cos(k_r l_r) \cos(k_p l_p) \sin(k_e l_e) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ , c , S , l и k — плотность, скорость звука, площадь сечения, длина и волновое число соответственно, индексы e , r и p относятся к излучающей (передней) накладке, отражающей (задней) накладке и пьезокерамическому материалу соответственно.



а



б

Рис. 1. Типовые преобразователи:
а — пьезоэлектрический; б — магнитострикционный

Для магнитострикционного преобразователя уравнение, которое объединяет параметры пакета в условие резонанса выглядит следующим образом:

$$\operatorname{tg}(k d_y) \operatorname{tg}(k h_0 / 2) = S_0 / S_e, \quad (3)$$

где k — волновое число, h_0 — высота окна пакета, d_y — высота ярма пакета, S_0 и S_e — площадь поперечного сечения окна и площадь поперечного сечения пакета соответственно.

Аналитические методы позволяют прогнозировать свойства преобразователей в широком диапазоне вариантов и анализировать общие закономерности их свойств, однако усложнение конструкций приводит к росту ошибки, и конструкции преобразователей с геометрией, содержащей большее количество параметров, аналитически моделировать очень сложно, часто невозможно, для этого применяется зарекомендовавший себя метод конечных элементов (МКЭ), который широко применяется для таких задач [9, 10]. Известно, что при корректном задании свойств материалов результаты расчета собственных частот по МКЭ соответствуют экспериментальным с ошибкой, не превосходящей нескольких процентов.

Для анализа отличия результатов расчета собственной частоты пьезоэлектрического преобразователя на основе аналитических методов с использованием уравнения (2) и по МКЭ было проведено исследование зависимости частоты преобразователя простой конструкции общей длиной 102 мм, состоящего из двух пьезокерамических колец толщиной 5 мм и титановых накладок диаметром 50 мм, от диаметра внутреннего отверстия пьезокерамического кольца d , для вариантов со сквозными отверстиями в накладках и без них (в конструкциях реального преобразователя возможны как сквозные отверстия в обеих накладках, так и в одной). Для исследования результатов расчета собственной частоты магнитострикционного преобразователя на основе аналитических методов с использованием уравнения (3) и по МКЭ была проанализирована зависимость резонансной частоты от высоты ярма магнитострикционного пакета, имеющего высоту 100 мм, что соответствует рабочим частотам вблизи 22 кГц. Результаты представлены в следующем разделе.

Результаты. На рис. 2, а представлены кривые, полученные аналитически и по МКЭ для собственной частоты простейшего преобразователя, описанного в предыдущем разделе, в зависимости от диаметра отверстия в пьезокерамическом кольце. Видно, что при отсутствии различия в площадях поперечного сечения колец и накладок собственная частота остается неизменной, результат почти одинаков для расчета по формуле (2) и по МКЭ, согласно которому небольшое снижение резонансной частоты все же происходит с увеличением диаметра отверстия. Если площади различны, собственная частота снижается с увеличением диаметра внутреннего отверстия в кольце, причем результат по МКЭ показывает более существенное снижение частоты, превышающее в крайней точке ($d = 20$ мм) снижение, полученное аналитическим методом, более чем в 2 раза.

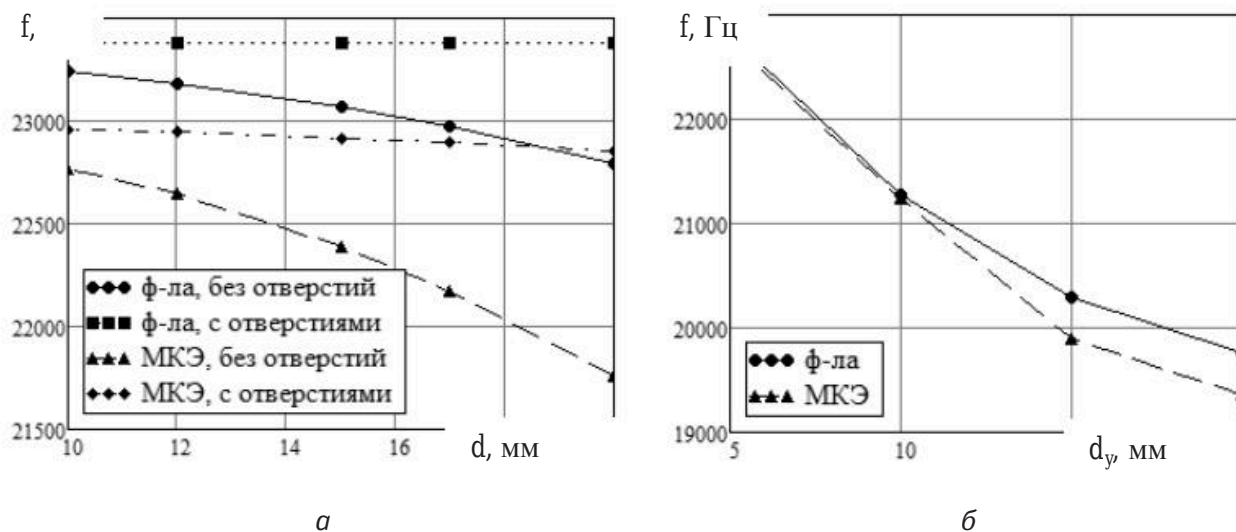


Рис. 2. Зависимости резонансной частоты преобразователя, полученные аналитически и по МКЭ: а — пьезоэлектрического в зависимости от диаметра отверстия; б — магнитострикционного пакета в зависимости от высоты ярма

На рис. 2, б представлены зависимости собственной частоты магнито-стрикционного пакета от высоты ярма — на начальном участке кривые почти совпадают, а далее расходятся, причем результат, полученный по МКЭ, показывает более существенное снижение собственной частоты для двух крайних точек ($d = 15$ мм, 20 мм).

Преимуществом МКЭ также является возможность анализировать паразитные моды колебаний и их влияние на основную рабочую моду, что трудно достижимо аналитическими методами. На рис. 3, а, б, в представлены основная и паразитные моды рассматриваемого простейшего пьезоэлектрического преобразователя, на рис. 3, г — основная мода магнито-стрикционного пакета, являющаяся комбинированной продольно-изгибной.

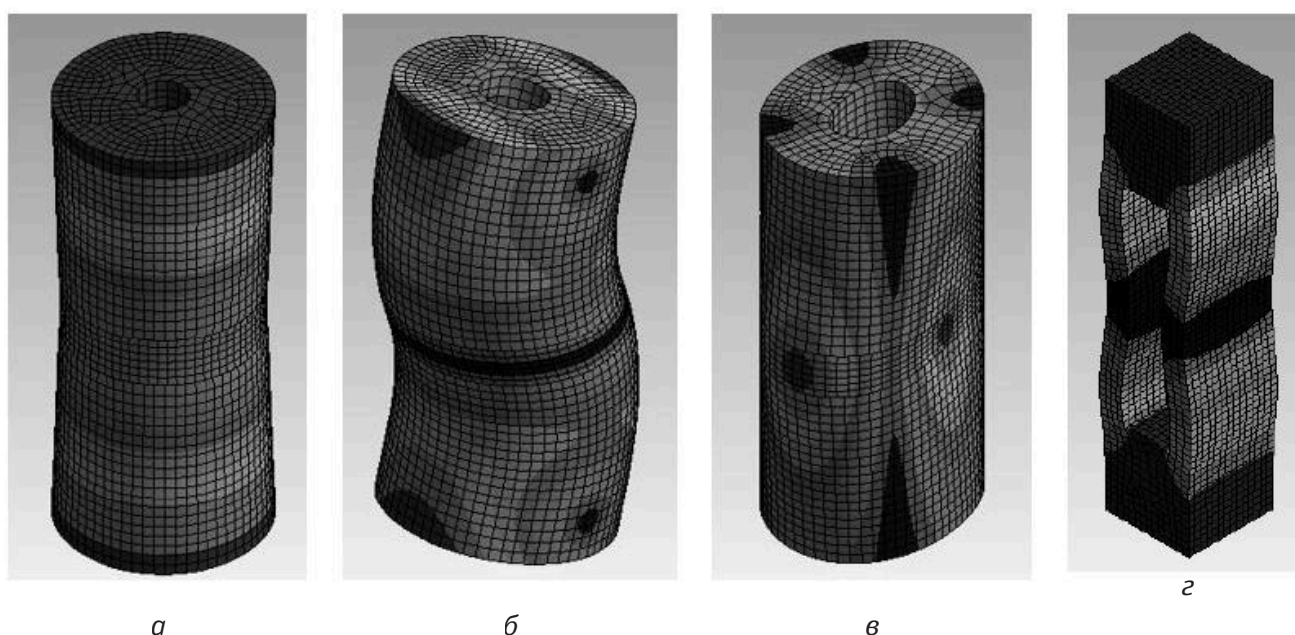


Рис. 3. Моды преобразователей:

а — основная пьезоэлектрического; б, в — паразитные пьезоэлектрического; г — основная магнито-стрикционного пакета

Обсуждение. В области мощного ультразвука и ультразвуковых технологий наибольшее распространение получили электроакустические преобразователи двух типов — пьезоэлектрические и магнито-стрикционные, причем в последние десятилетия наметилась тенденция к вытеснению магнито-стрикционных преобразователей — для этого есть ряд причин, основные — это более сложная технология производства и более высокая стоимость, однако существует ряд направлений, где применение магнито-стрикционных преобразователей имеет ряд существенных преимуществ — это, в частности, технологии, предусматривающие высокие температуры обрабатываемой среды, технологии непрерывной обработки среды, технологии, требующие высокой удельной мощности и связанные с высокими механическими нагрузками на акустическую систему. Пьезоэлектрические преобразователи обеспечива-

ют неоспоримые преимущества для систем, в которых затруднено водяное охлаждение, важен вес, габариты и максимально достижимый КПД. Выбор типа преобразователя должен базироваться на комплексном анализе требований конкретного производственного процесса.

В работе приведено сравнение результатов расчета зависимостей резонансной частоты преобразователей от диаметра отверстия для пьезоэлектрического и от высоты ярма для магнитострикционного пакета. Показано, что общие тенденции для кривых, полученных разными методами, одинаковы, однако расчеты по МКЭ показывают более существенное изменение анализируемых параметров. Проектирование преобразователей осуществляется с учетом особенностей геометрии и используемых материалов, аналитические методы определения рабочих параметров преобразователей позволяют анализировать общие закономерности их свойств с приемлемой ошибкой, однако имеют ограничения при усложнении геометрии конструкций, МКЭ позволяет получать более точные результаты расчета параметров преобразователей.

Заключение. В работе рассмотрены сравнительная характеристика ключевых особенностей, преимущества, конструкции и особенности проектирования мощных пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей для реализации различных ультразвуковых технологий.

Список источников

- [1] Розенберг Л.Д., ред. *Физические основы ультразвуковой технологии*. Москва, Наука, 1970.
- [2] Розенберг Л.Д., ред. *Источники мощного ультразвука*. Москва, Наука, 1967.
- [3] Gallego-Juarez J.A., Graff K.F., Lucas M. *Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound*. Elsevier, Woodhead Publishing, 2023, 1166 p.
- [4] Вьюгинова А.А., Новик А.А., Вьюгинов С.Н., Новик А.А., Лбов А.А., Новик А.А. Применение магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей в ультразвуковых технологических системах. XXXVII сессия Российского акустического общества: сб. тр. Москва, ГЕОС, 2025, с. 954–964.
- [5] *Ультразвуковое технологическое оборудование*. URL: <http://utinlab.ru> (дата обращения 25.03.2026).
- [6] Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. *Ультразвуковые электротехнические установки*. Ленинград, Энергия, 1968.
- [7] Dominguez R., Ranz C. Sandwich transducer, simplified mathematical model. I, II. *Acustica*, 1973, vol. 29, pp. 156–167.
- [8] Черпак В.А. К расчету динамических сосредоточенных параметров составных пьезоэлектрических преобразователей. *Акустический журнал*, 1977, т. 23, с. 443–449.
- [9] Вьюгинова А.А. Многочастотный ультразвуковой преобразователь Ланжевена. *Дефектоскопия*, 2019, т. 4, с. 3–7.
- [10] Khmelev V.N., Shalunov A.V., Nesterov V.A. Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power. *Ultrasonics*, 2021, vol. 114, art. no. 106413.