

УДК 621.373.5:534.838.7

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗО- ВЫЕ СРЕДЫ

В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко, Д.В. Генне,
А.Д. Абрамов

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова
E-mail: vnh@bti.secna.ru

Статья посвящена решению вопросов проектирования и эксплуатации электронных генераторов для ультразвуковой интенсификации процессов в газовых средах. На основании анализа особенностей современных пьезоэлектрических колебательных систем с дисковыми излучателями, совершающими высокоамплитудные изгибные колебания (высокая добротность, многочастотность, многопакетность пьезоэлементов) сформулированы общие требования к электронным генераторам и предложены новые подходы и схемные решения непрерывного контроля параметров системы и установления оптимальных режимов работы электронного генератора.

Ключевые слова:

Ультразвук, электронный генератор, газовые среды, интенсификация.

Keywords:

Ultrasonic, electronic generator, gas mediums, intensification.

Ультразвуковое оборудование широко применяется для интенсификации различных физико-химических процессов, в твердых, жидких и газовых средах [1].

В настоящее время, благодаря созданию и применению ультразвуковых излучателей нового типа [2] переживают второе рождение технологии интенсификации процессов, протекающих в газовых средах. Наибольший интерес среди таких технологий представляет коагуляция природных и техногенных воздушно-капельных дисперсий [3], что обусловлено необходимостью обеспечения непрерывного функционирования взлетно-посадочных полос аэропортов, автомобильных дорог и портов в условиях туманов; исключения распространения воздушно-капельных отравляющих веществ при катастрофах и террористических актах; исключения условий образования опасных концентраций взрывоопасных пылей в угольных шахтах, на химических и мукомольных предприятиях.

Используемое для интенсификации процессов в газовых средах ультразвуковое оборудование (ультразвуковой аппарат) состоит из двух основных элементов, взаимодополняющих друг друга.

Основной элемент оборудования – ультразвуковая колебательная система, состоящая из пьезоэлектрического преобразователя, обеспечивающего преобразование энергии электрических колебаний, поступающих от электронного генератора, волноводной усилительной структуры и излучателя, осуществляющего введение ультразвуковых колебаний в газовую среду, подвергаемую УЗ воздействию.

Для питания ультразвуковой колебательной системы используется электронный генератор [3], обеспечивающий преобразование энергии электрической бытовой или промышленной сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты (более 20000 Гц), представляющих собой синусоидальные колебания с амплитудой в несколько сотен вольт.

Электронный генератор, УЗ колебательная система и технологическая среда, подвергаемая ультразвуковой обработке, представляют собой элементы единой системы, согласованные друг с другом и влияющие опосредованно или непосредственно друг на друга. Нарушение условий оптимального согласования любых из элементов этой цепи может привести к ухудшению процесса энергопереноса в системе «генератор-излучатель-обрабатываемая среда» и снижению эффективности ультразвукового воздействия. В связи с этим, при проектировании УЗ оборудования возникает необходимость обеспечения оптимального согласования параметров генератора и колебательной системы при любых изменениях физических свойств (волновое сопротивление) обрабатываемой среды в процессе УЗ воздействия.

Рассмотрим далее более подробно особенности проектирования УЗ электронных генераторов предназначенных для питания УЗ колебательных систем, используемых для воздействия на газовые среды.

Отличительной особенностью таких колебательных систем является способность генерировать ультразвуковые колебания с интенсивностью не менее 140 дБ, поскольку при меньших интенсивностях эффективность применения ультразвукового воздействия для интенсификации процессов в газовых средах падает практически до нуля. Возможность формирования колебаний такой интенсивности обеспечивается за счет применения в качестве излучателей изгибно-колеблющихся излучателей дискового типа [2]. Для формирования в газовых средах колебаний ультразвуковой частоты дисковый излучатель, при заданных размерах ультразвуковой колебательной системы, возбуждается на нечетной моде (пятой, седьмой, девятой и т.д.) основной резонансной частоты изгибных колебаний диска. Для обеспечения высоких мощностных характеристик в конструкции преобразователя использовано многопакетное расположение пар пьезоэлементов, как показано на рисунке 1. Такая конструктивная схема позволяет объединить параллельно установленные пакеты пьезоэлементов, улучшив теплоотвод от каждого из пакетов за счет увеличения массы рабочей излучающей накладки преобразователя, и обеспечить повышение потребляемой мощности даже в сравнении с простым суммированием отдельных преобразователей.

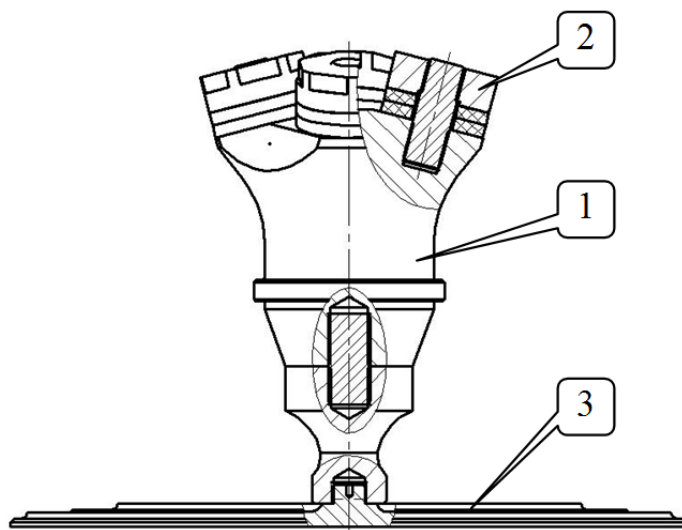


Рис. 1. Эскиз дискового излучателя

Стержневой волновод 1, возбуждается с одной стороны несколькими пьезокерамическими пакетами 2, с другой стороны к нему крепится диск 3. Число пьезокерами-

ческих пакетов может достигать до 4, при этом каждый пакет содержит до 4-х пьезокерамических элементов. Все пьезокерамические пьезоэлементы преобразователей электрически соединяются параллельно, таким образом, излучатель подобного типа имеет большую входную статическую электрическую емкость (до 60 нФ).

Кроме того, излучатели подобного типа характеризуются высокой добротностью, многочастотностью, а при несоблюдении условий частотного согласования и наличия гармоник в питающем напряжении высокой вероятностью возбуждения на паразитной гармонике.

При создании электронных генераторов необходимо учитывать также, что газовые среды характеризуются невысоким волновым сопротивлением (сопротивление газовых сред на порядки меньше, чем, например, жидкостей). Это обуславливает необходимость более мощной «раскачки» электронным генератором ультразвуковой колебательной системы.

Кроме того, малый коэффициент выхода акустической энергии из излучателя в газовую среду (коэффициент выхода составляет менее 0.01 от запасенной излучателем энергии) и применение для изготовления излучателя титанового сплава повышает добротность УЗ колебательной системы до 1000 и более, что обуславливает повышенные требования к качеству работы системы ФАПЧ электронного генератора, удерживающей резонансный режим работы УЗ излучателя и генератора.

Стабильность волнового сопротивления газовых сред к ультразвуковому воздействию широкого мощностного диапазона (до 140 дБ и более) обуславливает согласованный режим энергопереноса в системе «генератор-излучатель-обрабатываемая среда».

Однако, низкий коэффициент теплопередачи газовых сред, обуславливает существенный нагрев УЗ излучателей (до 100 и более градусов), что приводит к смещению резонансной частоты УЗ излучателей в область более низких частот (например, резонансная частота излучателя может изменяться от 20000 Гц до 18000 Гц при изменении температуры от 20 до 100 градусов).

Рассмотренные конструктивные и функциональные особенности используемых колебательных систем обуславливают определенные требования к электронным ультразвуковым генераторам, которые должны быть реализованы при создании УЗ оборудования для интенсификации процессов в газовых средах.

На рисунке 2 представлена структура электронного генератора, разработанного для питания ультразвуковых колебательных систем, предназначенных для воздействия на газовые среды при интенсификации различных процессов.

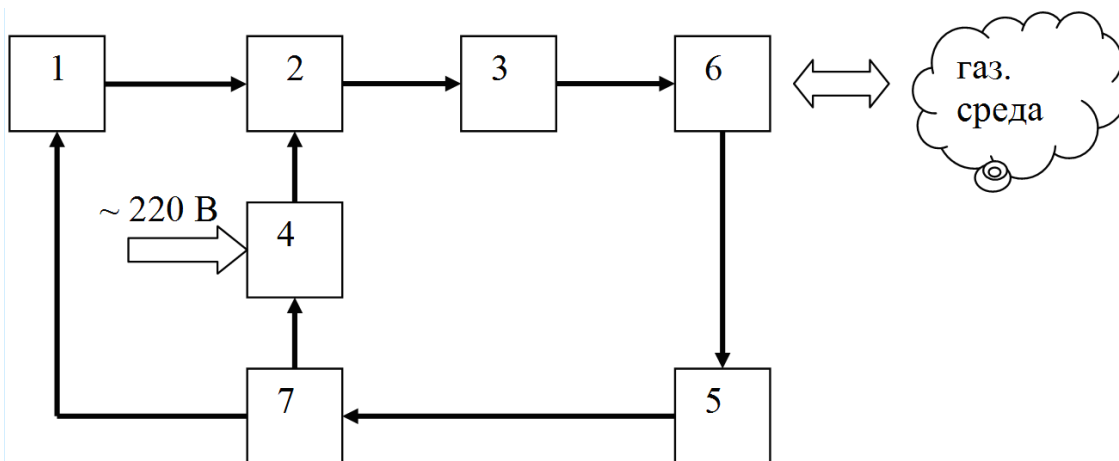


Рис. 2. Структура ультразвукового электронного генератора

Возможные изменения рабочей частоты системы и ее добротность приводят к тому, что задающий управляемый генератор 1, обеспечивает перестройку частоты в диапазоне от 18 до 20,1 кГц с шагом не более 2 Гц. Диапазон перестройки обусловлен смещением резонансной частоты УЗ излучателя за счет его разогрева в процессе работы. Малая дискретность перестройки по частоте обусловлена высокой добротностью УЗ излучателя и соответственно малой шириной амплитудно-частотной характеристики излучателя, около 50 Гц.

Усилитель мощности 2, в качестве которого выступает мостовой или полумостовой каскад, работающий в режиме D, обеспечивает импульсное возбуждение согласующей трансформаторно-дроссельной схемы 3.

Согласующий узел 3 обеспечивает электрическое согласование выходного сопротивления электронного генератора, которое является активным, с входным сопротивлением ультразвуковой колебательной системы 6, характер которого сильно зависит от частоты возбуждения и на резонансной частоте для случая системы с пьезоэлектрическим преобразователем, является активно-емкостным.

Резонансный электрический LC контур, входящий в состав схемы согласования 3, обеспечивает необходимый уровень напряжения на пьезокерамических элементах преобразователя (амплитуда переменного напряжения на электродах пьезоэлементов преобразователя может достигать 2500В), входящего в состав УЗ колебательной системы. Кроме всего, LC контур, входящий в состав схемы согласования, обеспечивает выделение первой гармоники из прямоугольного сигнала, который от ключевой схемы 2 генератора поступает на узел согласования 3.

Питание излучателя напряжением, форма которого близка к синусоидальной, при использовании излучателей с изгибно-колеблющимся диском, является важным моментом, поскольку наличие в питающем сигнале посторонних гармоник провоцирует возбуждение паразитных мод колебаний в излучателе, снижая при этом эффективность работы излучателя на основной моде.

Узел 4 обеспечивает возможность регулировки напряжения питания мостовой схемы 2, что в конечном итоге позволяет управлять мощностью УЗ воздействия в диапазоне от 0 до 100%.

Блок 5 обеспечивает получение сигналов обратной связи, позволяющих оптимизировать работу электронного генератора в целом.

Блок 7 является центральным узлом электронного генератора, обеспечивающим согласованное функционирование всех систем и блоков электронного генератора. По

сути это микропроцессорная система, работающая под управлением специальной программы.

В процессе работы электронного генератора одновременно работает несколько систем: это система сканирования частотного диапазона и поиска резонансной частоты излучателя; это система удержания резонансного режима работы излучателя и электронного генератора; система обнаружения «срывов» в работе генератора и его повторного перезапуска; система управления и стабилизации мощности ультразвукового излучения; система обнаружения низкочастотных модуляций (модуляций звукового диапазона) и аварийного отключения электронного генератора.

Большинство из перечисленных систем являются типовыми для электронных УЗ генераторов. Однако, при их работе в составе оборудования для интенсификации процессов в газовых средах проявляются некоторые особенности. Рассмотрим подробно функционирование некоторых из систем, учитывая особенности работы с излучателями, предназначенными для работы в газовых средах.

Ультразвуковые колебательные системы работают эффективно только в резонансном режиме, то есть на резонансной частоте дискового излучателя. Практически во всех системах автоматической подстройки частоты (АПЧ) электронных генераторов в качестве критерия настройки на резонансную частоту является равенство нулю его фазочастотной характеристики. Фазочастотную характеристику получают путем измерения сдвига фаз между током и напряжением на пьезокерамических элементах преобразователя, входящего в состав УЗ колебательной системы.

На рисунке 3 представлены амплитудно-частотная характеристика УЗ колебательной системы (кривая 3) в виде частотной зависимости тока потребляемого системой, реальная фазочастотная характеристика колебательной системы, как механической колебательной системы (кривая 1) и фазочастотные характеристики, полученные путем измерения сдвига фаз между током и напряжением на пьезоэлементах преобразователя, входящего в состав преобразователя при различных значениях электрической емкости пьезокерамических элементов (кривые 2).

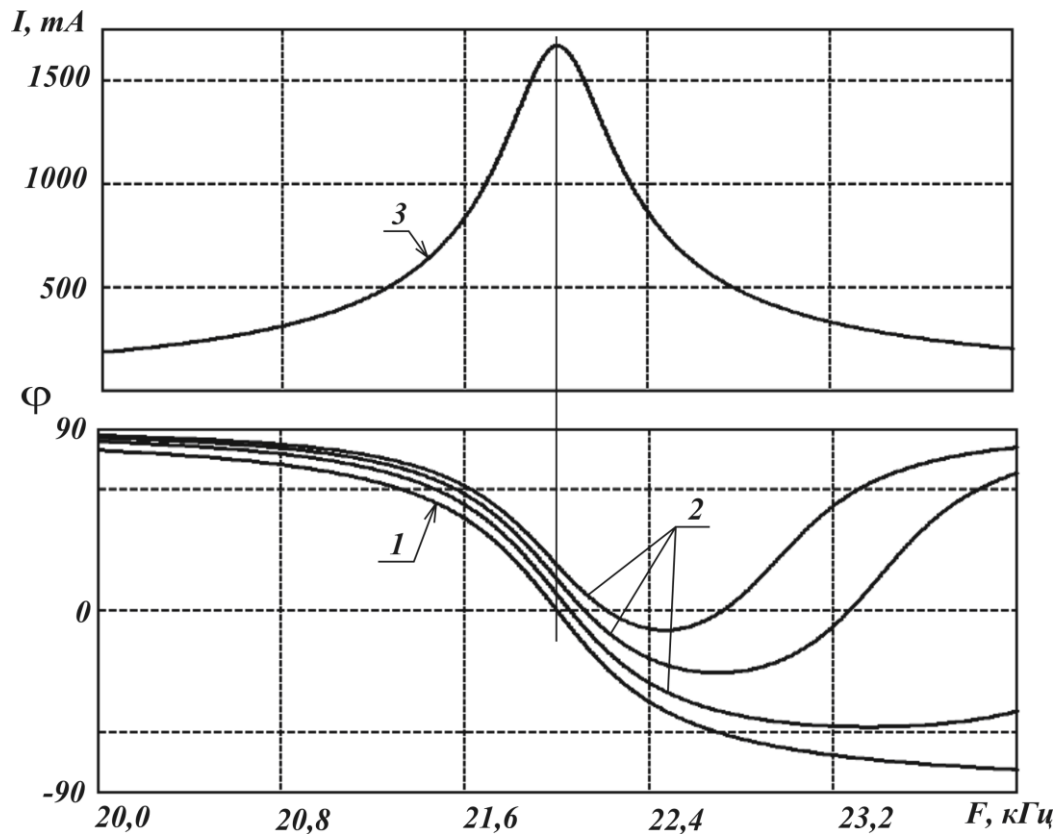


Рис. 3. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики в зависимости от изменения электрической емкости пьезокерамических элементов

Из представленных зависимостей следует, что изменение электрической емкости пьезокерамических элементов приводит к тому, что система АПЧ, удерживая параметр ϕ равным нулю, заставляет работать УЗ электронный генератор на частоте, не соответствующей резонансной частоте УЗ колебательной системы, а немного выше.

Как было отмечено ранее, работа излучателей в газовых средах сопровождается их сильным нагревом, что приводит не только к уменьшению резонансной частоты, но и увеличению более чем в два раза электрической емкости пьезокерамических элементов. При высокой добротности системы, из-за ошибок в работе системы АПЧ (обусловленных влиянием емкости пьезокерамических элементов), снижается интенсивность ультразвукового воздействия и эффективность реализуемых процессов.

Для исключения влияния электрической емкости пьезоэлементов на частотное согласование электронного генератора с УЗ колебательной системой предложена и разработана схема выделения тока механической ветви, свободного от влияния емкостного тока пьезокерамических элементов. Ее сущность поясняется далее.

На рисунке 4 представлена эквивалентная электрическая схема УЗ излучателя, справедливая вблизи резонансной частоты излучателя.

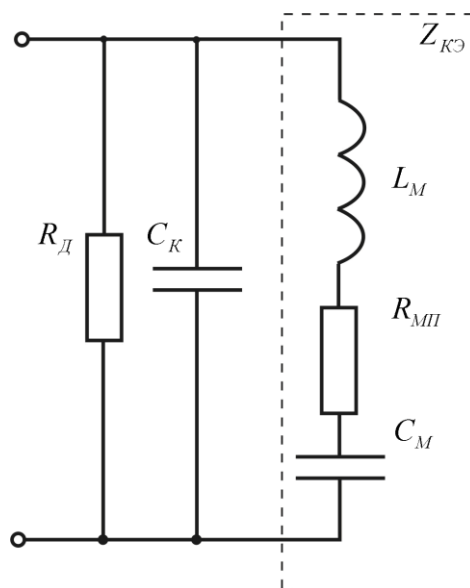


Рис. 4. Схема замещения УЗ излучателя с пьезоэлектрическим преобразователем

В этой схеме индуктивность L_M - эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_M - упругости материала системы, активное сопротивление $R_{МП}$ - сопротивлению механических потерь, C_K - электрической емкости пьезокерамических элементов, R_D - диэлектрическим потерям. Элементы L_M , C_M , $R_{МП}$ образуют так называемую механическую ветвь эквивалентной электрической схемы пьезоэлектрической колебательной системы с комплексным сопротивлением $Z_{кэ}$.

Ток, протекающий по элементам L_M , C_M , $R_{МП}$, и является током механической ветви, частотная характеристика которого (амплитудная и фазовая) полностью повторяет частотную характеристику УЗ излучателя, если его рассматривать как механическую колебательную систему. Таким образом, новым критерием настройки электронного генератора на резонансную частоту колебательной системы является равенство нулю фазочастотной характеристики тока механической ветви.

Слабое влияние параметров газовых сред на параметры колебательной системы (в отличие, например, от жидких сред, волновое сопротивление которых на порядки изменяется при наложении УЗ полей высокой интенсивности), позволяет сделать работу систем АПЧ и систем стабилизации амплитуды колебаний излучателя более инерционными.

Предложенные новые технические решения были реализованы при создании электронных генераторов, предназначенных для питания ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах. При мощности УЗ генератора 300 Вт и диаметре излучающего диска в 350 мм были получены ультразвуковые колебания с интенсивностью до 165 Вт. Полученные практические результаты по коагуляции туманов [5], твердых частиц в воздухе, гашению пены в процессе розлива пива [6], сушке продуктов [7] подтвердили высокую эффективность разработанных электронных генераторов в составе оборудования.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлены особенности работы ультразвуковых колебательных систем в газовых средах. Выявлены недостатки существующих

ших электронных генераторов, выработаны новые требования к электронным генераторам. Найдены новые критерии управления работой многоэлементных преобразователей с дисковым, изгибно-колеблющимся, излучателем. С учетом особенностей работы излучателей в газовых средах были разработаны ультразвуковые электронные генераторы нового типа.

Результаты исследований были реализованы в практических конструкциях ультразвуковых акустических установок, предназначенных для интенсификации процессов, протекающих в газовых средах.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы и Совета по грантам Президента Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. [Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве](#). – Алтайский гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400с.
2. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука, том III. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.:Наука, 1970. – 688с.
3. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнологические установки. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. 1982. – 208 с.
4. Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Shalunov A.V., Lebedev A.N., Galahov A.N., Shalunova K.V.. [Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk](#). – International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.250-253.
5. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Shalunova K.V. [Development and investigation of the ultrasonic coagulation tank](#). – International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.271-274.
6. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V., Khmelev M.V. [Ultrasonic device for foam destruction](#). – International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2007: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.252-254.
7. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Abramenko D.S., Genne D.V. [Research and Development of Ultrasonic Device Prototype for Intensification of Drying Process](#). – International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2008: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – P.235-240.

Сведения об авторах:

Хмелев Владимир Николаевич, 1957 г.р., д.т.н., профессор, доцент кафедры Методов и средств измерений и автоматизации АлтГТУ. Р.т. 43-25-70. vnh@bti.secna.ru. Область научных интересов: ультразвуковые технологии, ультразвуковое оборудование, интенсификация физико-химических процессов.

Барсуков Роман Владиславович, 1975 г.р., к.т.н., доцент кафедры Методов и средств измерений и автоматизации АлтГТУ. Р.т. 43-25-70. roman@bti.secna.ru. Область науч-

ных интересов: ультразвуковые электронные генераторы, системы и способы управления ультразвуковыми технологическими процессами.

Шалунов Андрей Викторович, 1980 г.р., к.т.н., доцент кафедры Методов и средств измерений и автоматизации АлтГТУ. Р.т. 43-25-70. shalunov@bti.secna.ru. Область научных интересов: процессы, протекающие в газовых средах под действием ультразвуковых полей высокой интенсивности.

Генне Дмитрий Владимирович, 1982 г.р., инженер лаборатории акустических процессов и аппаратов АлтГТУ. Р.т. 43-25-70. gdv@bti.secna.ru. Область научных интересов: системы согласования электронных ультразвуковых генераторов с ультразвуковыми излучателями.

Абраменко Денис Сергеевич, 1982 г.р., инженер лаборатории акустических процессов и аппаратов АлтГТУ. Р.т. 43-25-70. ades@bti.secna.ru. Область научных интересов: измерения в области ультразвуковой техники и технологий.

Абрамов Алексей Дмитриевич, 1984 г.р., инженер лаборатории акустических процессов и аппаратов АлтГТУ. Р.т. 43-25-70. abramov@bti.secna.ru. Область научных интересов: ультразвуковая сварка, проектирование источников ультразвуковой энергии различного назначения.