

Исследование Функциональных Возможностей Пьезоэлектрических Преобразователей

Владимир Н. Хмелёв¹, д.т.н., *Senior Member*, IEEE, Денис С. Абраменко¹, Валерий В. Педдер²,
Сергей Н. Цыганок¹, к.т.н., Роман В. Барсуков¹, к.т.н.

¹ Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова
² ООО НПП «Метромед»

Аннотация – Статья посвящена сравнительным исследованиям полуволновых ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей, выполненных по различным конструктивным схемам. Для проведения сравнений использованы результаты измерения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик преобразователей при работе с полуволновыми и волновыми рабочими инструментами, предназначенными для эксплуатации в составе УЗ терапевтического аппарата.

Ключевые слова – Ультразвук, электроакустический преобразователь, АЧХ, ФЧХ.

I. ВВЕДЕНИЕ

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ ультразвуковые технологии находят все более широкое применение в медицине и косметологии. Ультразвуковые колебания применяются повсеместно, начиная с диагностики заболеваний внутренних органов (УЗ диагностика), ультразвуковой аэрозольной терапии, ультразвукового массажа и заканчивая обработкой живых тканей во время хирургических операций (коагуляция, разрезание тканей, санация и т.д.). Применение УЗ колебаний позволяет значительно снизить травматичность хирургических операций (липосакция, хирургия и лапароскопия), а в некоторых случаях обеспечить безоперационное лечение болезней, лечение которых ранее считалось невозможным без операционного вмешательства.

В тоже время широкое и эффективное применение УЗ медицинских технологий невозможно без широкого распространения и доступности УЗ аппаратов. В идеальном случае необходимо обеспечить УЗ медицинскими аппаратами поликлиники в крупных и небольших городах, а так же селах. Основная сложность заключается в высокой стоимости УЗ аппаратов. Это обусловлено рядом причин, немалую долю в которых занимает стоимость изготовления отдельных элементов УЗ аппарата. В большинстве случаев УЗ аппарат состоит из двух основных составляющих: электронного генератора и УЗ колеба-

тельной системы. Электронный генератор предназначен для преобразования электрических колебаний промышленной частоты в электрические колебания ультразвуковой частоты. Дополнительно электронный генератор производит непрерывное измерение и контроль электрических параметров УЗ колебательной системы. Это необходимо для автоматического управления работой генератора при обеспечении стабильных выходных параметров УЗ аппарата (амплитуды, частоты). В большинстве случаев УЗ колебательная система конструктивно состоит из электроакустического преобразователя (далее преобразователя) и сменного рабочего инструмента. Электроакустический преобразователь предназначен для трансформации электрических колебаний ультразвуковой частоты в механические колебания ультразвуковой частоты. Рабочий инструмент служит для усиления и передачи механических колебаний на поверхность обрабатываемой поверхности или излучения колебаний в обрабатываемую среду.

Следует отметить, что к характеристикам медицинских аппаратов предъявляются строгие требования. В случае несоответствия даже одному требованию использование аппарата может быть запрещено. Особое внимание уделяется надежности работы аппарата в целом и стабильности его выходных характеристик. Ошибка на любом этапе проектирования, сборки или настройки УЗ аппарата может привести к причинению вреда организму пациента. Поэтому, должен быть обеспечен выбор оптимальной конструктивной схемы и обоснованна конструкция выбранного преобразователя.

Основной целью исследований является сравнение параметров и функциональных возможностей полуволновых ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей, выполненных по различным конструктивным схемам, наиболее широко и часто используемых при создании ультразвуковых аппаратов медицинского назначения (терапевтических и хирургических).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время наибольшее распространение при проектировании терапевтических и хирургических аппаратов, получил полуволновой преобразователь, объединяющий в своей конструкции пьезоэлектрический преобразователь и ступенчато – радиальный концентратор колебательной системы (исходная конструкция) представлен на Рис. 1. Схема взаимного расположения отдельных элементов представлена на Рис. 2.



Рис. 1 – Внешний вид электроакустического преобразователя исходной конструкции.

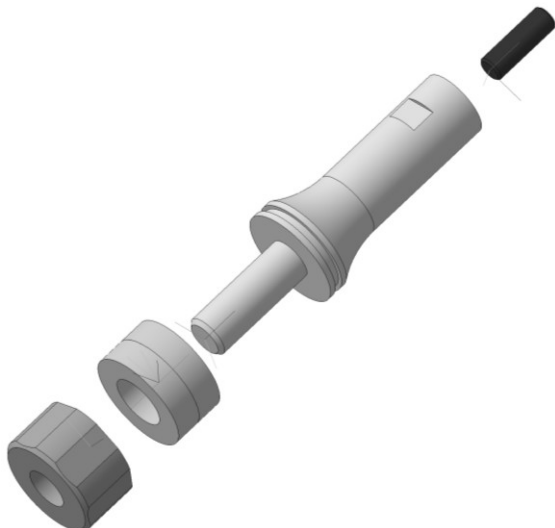


Рис. 2 – Схема расположения отдельных элементов электроакустического преобразователя исходной конструкции.

Основной элемент преобразователя изготавливается из титанового сплава. Длина преобразователя равна половине длины волны УЗ колебаний в материале преобразователя. Пьезоэлектрические элементы размещаются на шпильке. Два пьезоэлектрических элемента, в форме коль-

ца ($24 \times 13 \times 4$ мм, площадь излучающей поверхности $3,2 \text{ см}^2$), надеваются на шпильку, а затем притягиваются задней отражающей гайкой, изготовленной из стали. Для подведения питающего напряжения и обеспечения акустического контакта используются медные электроды. Один электрод располагается между пьезоэлементами. Еще два - между двумя пьезоэлементами и металлическими элементами конструкции. Разработанная конструкция электроакустического преобразователя имеет следующие преимущества: высокий КПД (более 60%), высокая надежность и долговечность, обеспечение амплитуды колебаний вплоть до 150 мкм, относительно малые габаритные размеры и вес. Основным недостатком является необходимость изготовления стягивающей шпильки в виде единой конструкции с концентратором. Это значительно увеличивает расход титанового сплава. Попытки выполнения стягивающей шпильки в виде отдельной конструкции, имеющей резьбовое соединение с концентратором, успехом не увенчались из-за возникающих в процессе работы разрушений на участке радиального перехода.

Очевидно, что снижение массогабаритных характеристик колебательной системы повысит эффективность и качество проведения длительных лечебных процедур.

По этой причине предпринимались и предпринимаются попытки создания новой конструктивной схемы для создания пьезоэлектрического преобразователя, способного упростить конструкцию, уменьшить его вес и стоимость при одновременном улучшении технических характеристик.

В качестве альтернативы рассмотренному преобразователю была рассмотрена конструктивная схема полуволнового преобразователя (модифицированная конструкция), представленного Рис. 3. Схема взаимного расположения отдельных элементов на Рис. 4.

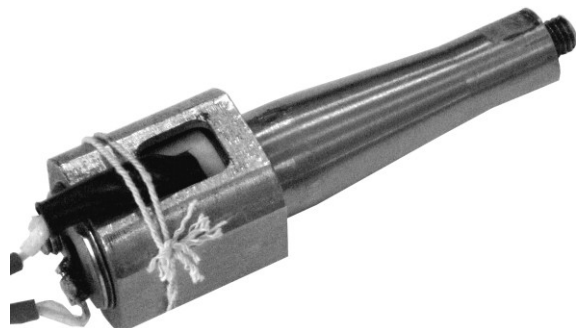


Рис. 3 – Внешний вид электроакустического преобразователя модифицированной конструкции.

Конструктивная схема была всесторонне исследована методами конечно-элементного моделирования. На основе результатов моделирова-

ния была выбрана оптимальная (по максимальному значению обеспечиваемой амплитуды колебаний, минимальным температурам и допустимым механическим напряжениям) конструкция преобразователя.

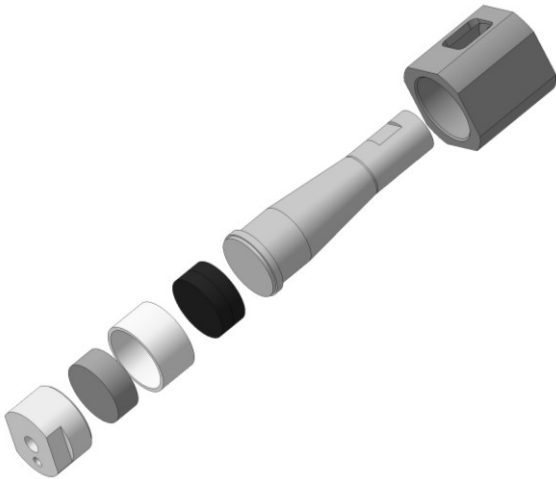


Рис. 4 – Схема расположения отдельных элементов электроакустического преобразователя модифицированной конструкции.

В конструкции используются пьезоэлектрические диски (20x4мм, площадь излучающей поверхности 3,15 см²). Их стягивание производится полым цилиндрическим элементом. На одном конце размещается концентратор. В противоположный конец вкручивается отражающий цилиндрический элемент. Концентратор изготавливается из титанового сплава. Стягивающий цилиндрический элемент и отражающий элемент изготавливается из стали. Подвод напряжения к электродам производится через боковые отверстия в стягивающем цилиндрическом элементе.

На основании проведенных расчетов и измерений массогабаритных характеристик установлено, что общая масса преобразователя снижена на 30%, габаритные размеры на 20%, расход титанового сплава в 2 раза, суммарная стоимость изготовления в 4 раза.

Было изготовлено по несколько преобразователей сравнимых конструкций для проверки эксплуатационных и электрических характеристик преобразователей.

Для подтверждения эксплуатационной эффективности возникла необходимость проведения сравнительных исследований электрических и механических характеристик преобразователей исходной и модифицированной конструкции.

Для проведения сравнительных исследований были исследованы зависимости тока механической ветви электроакустического преобразователя (далее - ток механической ветви) от частоты, а так же разности фаз между напряжением резонансного колебательного контура и током меха-

нической ветви (далее - разность фаз). Измерения производились штатными измерительными схемами блока управления электронного генератора.

Конечной целью исследований было выявление возможности обеспечения эффективной и надежной работы УЗ аппарата с преобразователем модифицированной конструкции.

Для контроля параметров УЗ колебательной системы электронный генератор производит непрерывное измерение величины тока механической ветви и значение разности фаз [3, 4, 5]. Зависимость тока механической ветви от частоты (АЧХ) отражает резонансные свойства УЗ колебательной системы. Максимальное значение соответствует собственной резонансной частоте системы. При отдалении от собственной резонансной частоты величина тока снижается вплоть до нулевого значения. Зависимость разности фаз (ФЧХ) от частоты пересекает ось абсцисс на частоте, соответствующей собственной резонансной частоте. Таким образом, величина тока механической ветви является критерием поиска собственной резонансной частоты при первоначальном запуске УЗ аппарата и дальнейшей эксплуатации. Разность фаз используется для определения изменения собственной резонансной частоты в процессе работы и поддержания оптимального резонансного режима работы генератора.

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к АЧХ и ФЧХ преобразователя для обеспечения условий идеального согласования генератора и колебательной системы:

1. Зависимость тока механической ветви от частоты должна отражает резонансные свойства колебательной системы. Поскольку АЧХ имеет только один ярко выраженный максимум во всем диапазоне перестройки частоты электронного генератора при любых условиях эксплуатации должно быть обеспечено соответствие собственной частоты системы рабочей частоте генератора;

2. Форма АЧХ должна быть симметричной относительно частоты основного резонанса, для исключения срывов генерации при изменении собственной резонансной частоты колебательной системы;

3. График зависимости разности фаз должен пересекать ось абсцисс только один раз на частоте основного резонанса. Появление вторичных нулевых значений в частотном диапазоне перестройки электронного генератора приводит к нарушению работы системы автоматической подстройки частоты и срыву генерации.

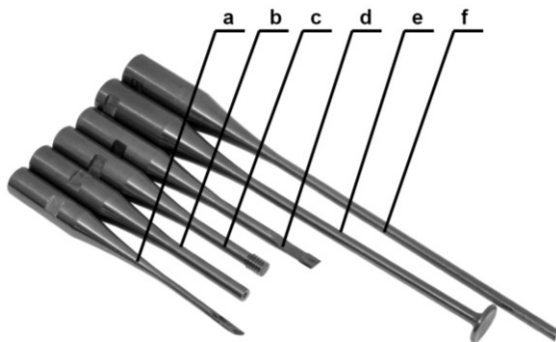
В случае если АЧХ и ФЧХ преобразователя удовлетворяют данным условиям согласования, то УЗ аппарат будет обеспечивать надежную,

безотказную работу и стабильные выходные характеристики.

Проведенные измерения АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции были направлены на выявление эксплуатационных преимуществ исходной и модифицированной конструкций.

Первоначально были исследованы АЧХ и ФЧХ преобразователей без сменного рабочего инструмента.

Затем измерения проводились с различными закрепленными сменными рабочими инструментами.



- a – рабочий инструмент полуволновой длины с окончание «скальпель»,
- b – рабочий инструмент полуволновой длины с окончанием «распылитель»,
- c – рабочий инструмент полуволновой длины с окончанием «резьба»,
- d – рабочий инструмент полуволновой длины с окончанием «долото»,
- e – рабочий инструмент волновой длины с окончанием «чаша»,
- f – рабочий инструмент волновой длины с окончанием «пика»,

Рис. 5 – Внешний вид сменных рабочих инструментов

Внешний вид рабочих инструментов представлен на Рис. 5. Все рабочие инструменты можно условно разделить на две группы, в зависимости от длины (полуволновые и волновые). Инструменты каждой из групп отличаются формой (площадью излучающей поверхности) рабочего окончания, определяющего назначение каждого из инструментов.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все измерения производились при фиксированном значении напряжения питания колебательной системы.

На Рис. 6 представлены АЧХ и ФЧХ электроакустического преобразователя исходной конструкции без рабочего инструмента. Форма АЧХ и ФЧХ практически полностью соответствуют условиям согласования.

Как следует из зависимостей, представленных Рис. 6 все АЧХ имеют идентичную форму. При увеличении напряжения питания колебательной системы увеличивается значение тока,

соответствующего частоте основного резонанса. Частота основного резонанса постепенно уменьшается на небольшую величину, при последовательном увеличении напряжения (около 20-30 Гц при изменении напряжения на 40 В).

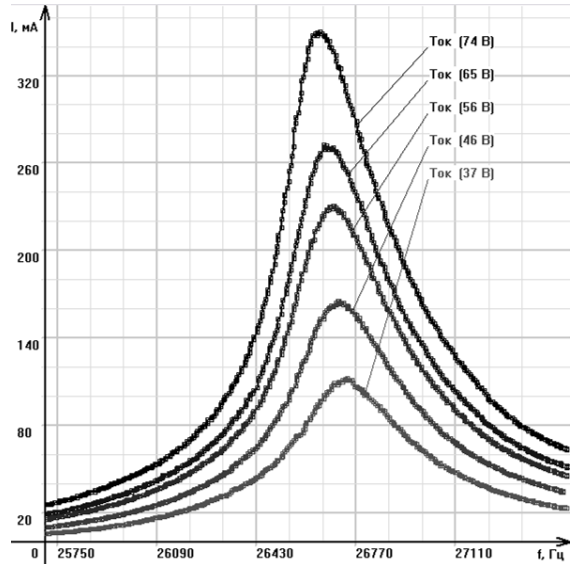
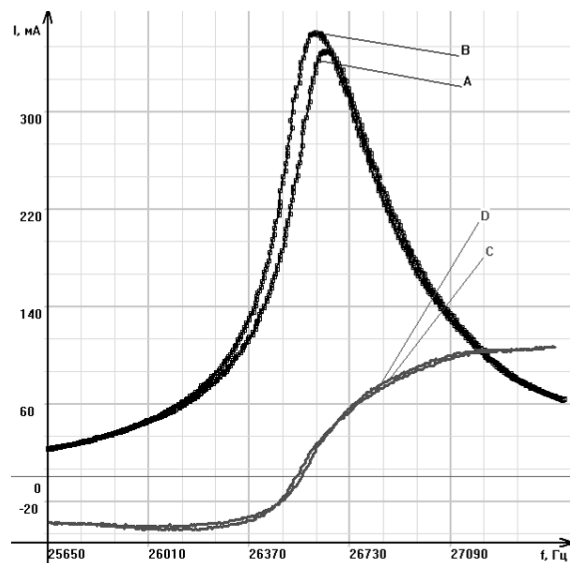


Рисунок 6 – Семейство АЧХ преобразователя исходной конструкции, без рабочего инструмента, при различных значениях напряжения питания колебательной системы.



- a – АЧХ при прохождении частотного диапазона от верхней границы к нижней;
 - b – АЧХ при прохождении частотного диапазона от нижней границы к верхней;
 - c – ФЧХ при прохождении частотного диапазона от верхней границы к нижней;
 - d – ФЧХ при прохождении частотного диапазона от нижней границы к верхней;
- Рисунок 7 – АЧХ и ФЧХ преобразователя исходной конструкции, без рабочего инструмента, при напряжении питания колебательной системы равном 74 В.

На Рис. 7 представлены АЧХ и ФЧХ электроакустического преобразователя исходной конст-

рукции при изменении частоты от нижней границы к верхней и в обратном направлении. Разница по частоте и максимальному значению тока составляет несколько процентов. Эффект гистерезиса проявляется только при напряжении питания колебательной системы выше 45 В.

ФЧХ преобразователя практически не зависит от направления прохождения частотного диапазона и напряжения питания колебательной системы. При любых значениях напряжения питания колебательной системы ФЧХ пересекает ось абсцисс на частоте основного резонанса.

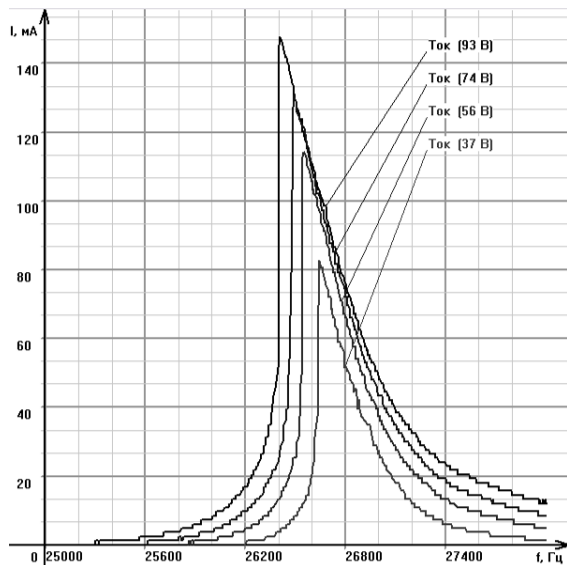


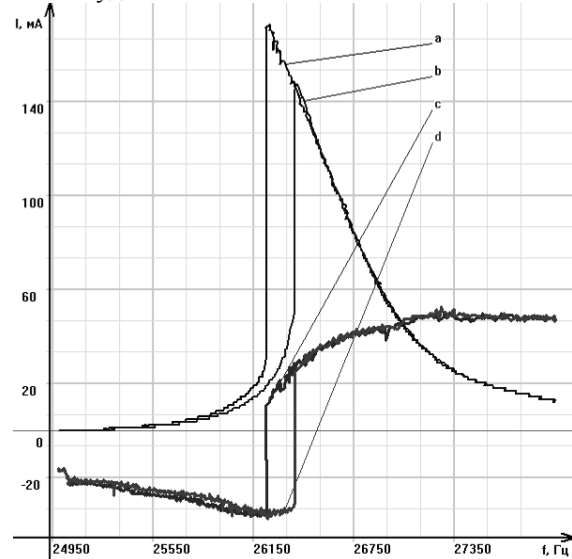
Рис. 8 – Семейство АЧХ преобразователя модифицированной конструкции, без рабочего инструмента, при различных значениях напряжения питания колебательной системы.

На Рис. 8 представлены АЧХ преобразователя модифицированной конструкции, без рабочего инструмента, при различных значениях напряжения питания колебательной системы. АЧХ имеет один ярко выраженный резонанс. В тоже время форма АЧХ является несимметричной. На частотах ниже частоты основного резонанса происходит постепенное увеличение амплитуды тока, а затем скачкообразное в 6 раз (с 25 до 144) при изменении частоты на 20 Гц. На частотах выше частоты основного резонанса происходит плавное, практически линейное, уменьшение амплитуды (с 144 до 25 за 1000Гц). ФЧХ так же претерпевает скачкообразное увеличение значения на частоте основного резонанса.

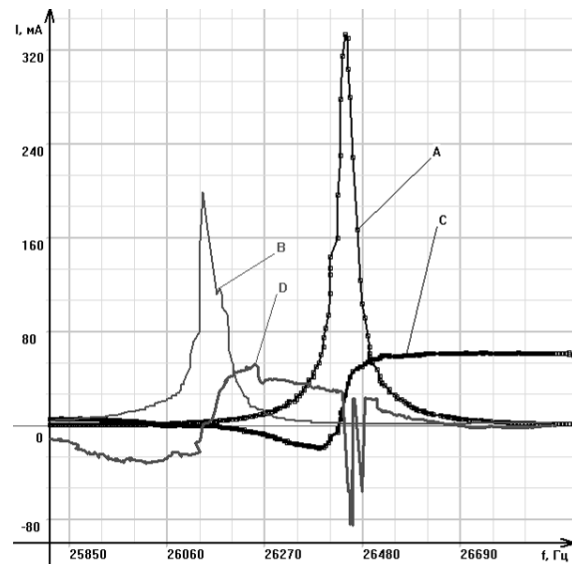
ФЧХ была подвергнута фильтрации, поскольку имела большое количество промахов измерения. Основная причина это искажение прямоугольной формы сигнала обратной связи.

На Рис. 9 представлены АЧХ и ФЧХ электроакустического преобразователя модифицированной конструкции, без рабочего инструмента, при прохождении частотного диапазона от верхней границы к нижней и в обратном направлении.

Гистерезис свойств является сильно выраженным. Разность по частоте составляет 180 Гц, по амплитуде 16%.



a – АЧХ при прохождении частотного диапазона от верхней границы к нижней;
b – АЧХ при прохождении частотного диапазона от нижней границы к верхней;
c – ФЧХ при прохождении частотного диапазона от верхней границы к нижней;
d – ФЧХ при прохождении частотного диапазона от нижней границы к верхней;
Рисунок 9 – АЧХ и ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции, без рабочего инструмента, при напряжении питания колебательной системы равном 93 В.

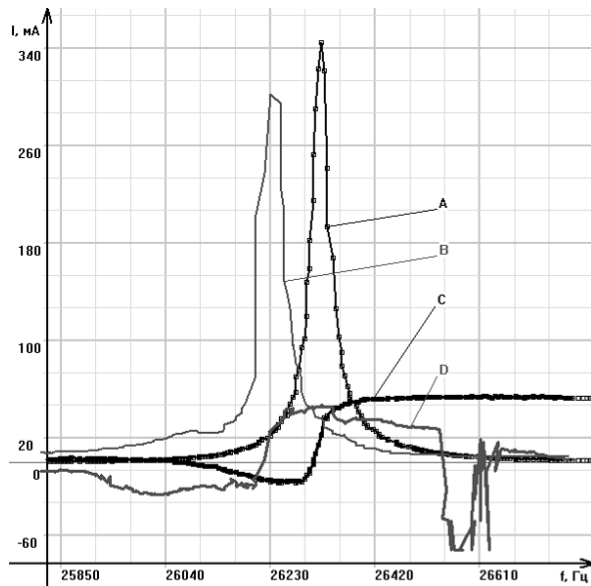


a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
Рис. 10 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «чаша» при излучении УЗ колебаний в воздушную среду.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. АЧХ и ФЧХ электроакустического преобразователя исходной конструкции практически полностью удовлетворяют условиям согласования;

2. АЧХ и ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции не полностью соответствует условиям согласования. Таким образом, при создании УЗ аппарата с таким преобразователем требуется более сложный алгоритм управления, в противном случае стабильность выходных характеристик может снижаться.



a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
Рис. 11 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «пика» при излучении УЗ колебаний в воздушную среду.

На Рис. 10 и Рис. 11 представлены АЧХ и ФЧХ преобразователей с присоединенными рабочими инструментами волновой длины с окончаниями «пика» и «чаша». Напряжение питания колебательной системы равно 93 В.

В процессе измерения УЗ колебания излучались в воздушную среду.

АЧХ и ФЧХ исходного и модифицированного электроакустического преобразователя практически идентичны, и полностью соответствуют условиям согласования. ФЧХ преобразователей имеют некоторые различия. ФЧХ исходного преобразователя пересекает ось абсцисс на частоте основного резонанса, ниже которого расположен участок, где ФЧХ совпадает с осью абсцисс. ФЧХ модифицированного преобразователя так же пресекает ось абсцисс на частоте основного резонанса. Участок, где ФЧХ совпадает с осью абсцисс, соответствует частотам выше частоты собственного резонанса.

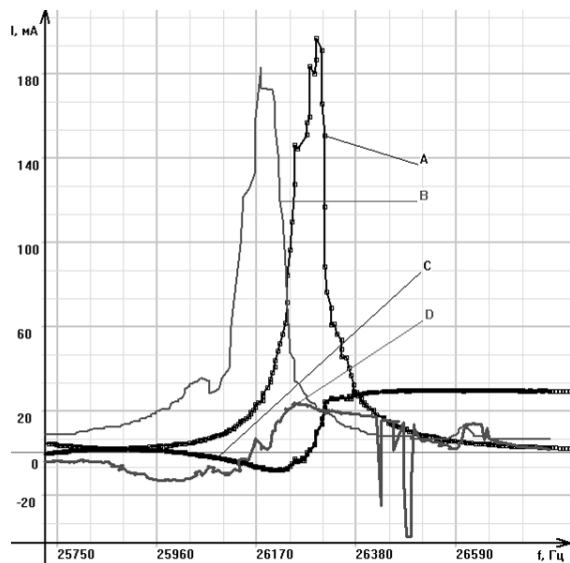
Далее исследования проводились при введении УЗ колебаний в водную среду (рабочий инструмент с окончанием «пика» помещался в воду). Появление акустической нагрузки, практически не изменяет форму АЧХ и ФЧХ. Меняется только резонансная частота и амплитуда на частоте основного резонанса. Измеренные зависимости представлены на Рис. 12.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. При эксплуатации сравниваемых преобразователей с рабочими инструментами волновой длины АЧХ и ФЧХ соответствуют условиям согласования в случае исходной и модифицированной конструкции. Причем в случае модифицированной конструкции АЧХ приобретает симметричный вид;

2. Участок ФЧХ, на котором график зависимости совпадает с осью абсцисс может снизить надежность поиска и удержания резонансной частоты, но с другой стороны данная ситуация может быть эффективно распознана при контроле уровня амплитуды тока механической ветви;

3. Появление акустической нагрузки (водной среды) не приводит к искажению формы АЧХ и ФЧХ.

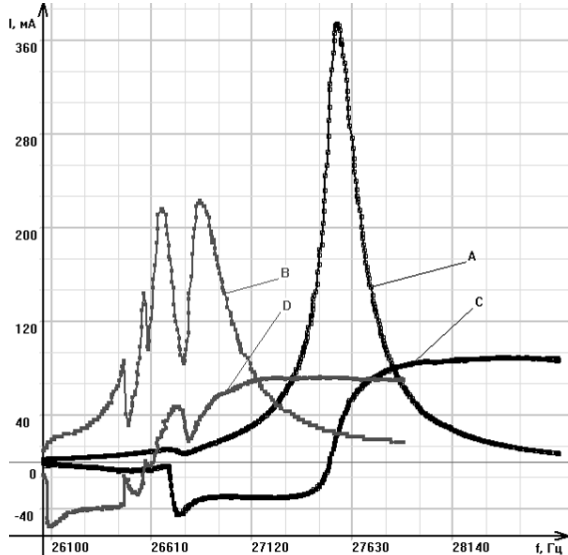


a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
Рис. 12 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции, с присоединенным рабочим инструментом, с окончанием «пика» при излучении УЗ колебаний в водную среду.

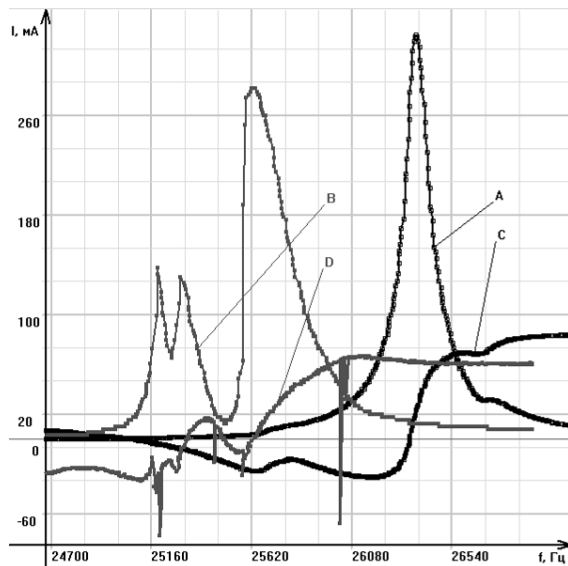
На Рис. 13 – Рис. 16 представлены АЧХ и ФЧХ преобразователей с присоединенными рабочими инструментами полуволновой длины с окончаниями «скальпель», «долото», «резьба» и «распылитель». Напряжение питания колебательной системы равно 93 В.

Рабочий инструмент использовался для излучения УЗ колебаний в воздушную среду.

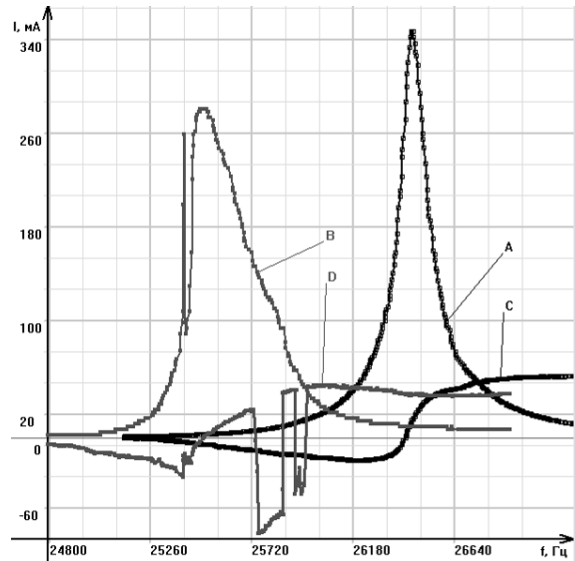
Для всех случаев АЧХ и ФЧХ электроакустического преобразователя исходной конструкции полностью соответствуют условиям согласования.



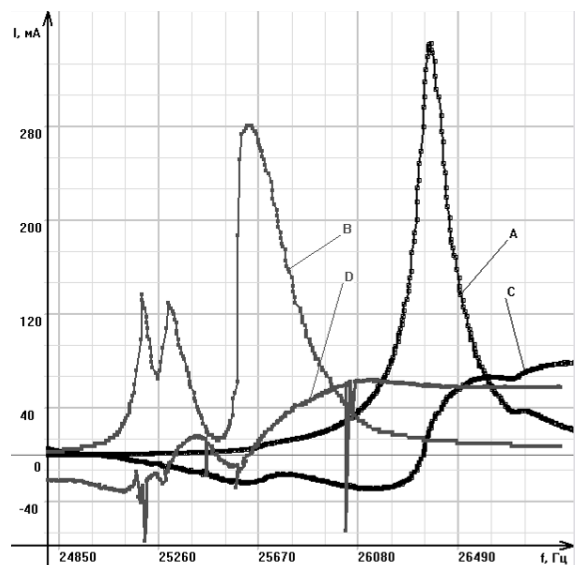
a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
 b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
 d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 Рис. 13 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «скальпель» при излучении УЗ колебаний в воздушную среду.



a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
 b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
 d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 Рис. 14 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «распылитель» при излучении УЗ колебаний в воздушную среду.



a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
 b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
 d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 Рис. 15 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «долото» при излучении УЗ колебаний в воздушную среду.



a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
 b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
 d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
 Рис. 16 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «резьба» при излучении УЗ колебаний в воздушную среду.

В случае использования преобразователя модифицированной конструкции происходит значительные искажения формы АЧХ и ФЧХ. Появляется несколько последовательных пиков АЧХ. Причем амплитудное значение практически всех пиков имеют близкие значения. В некоторых случаях наблюдается два последовательных пересечения ФЧХ оси абсцисс на частотах, соот-

ветствующих отдельным максимумам (см. Рис. 14 и Рис. 16). Таким образом, во всех случаях АЧХ не соответствует требованиям оптимального согласования. Единственный приемлемый случай реализуется при использовании рабочего инструмента с окончанием «долото» (см. Рис. 15). АЧХ имеет минимальные искажения.

В случае рабочих инструментов с окончанием «скальпель» (см. Рис. 13) и «долото» (см. Рис. 15) ФЧХ соответствует условиям согласования.

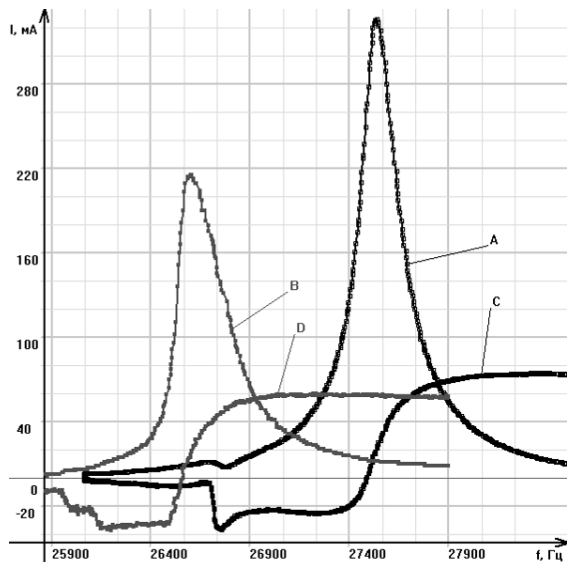
В случае рабочих инструментов с окончанием «распылитель» (см. Рис. 14) и «резьба» (см. Рис. 16) ФЧХ пересекает ось абсцисс два раза. В то же время значения частот, при которых ФЧХ пересекает ось абсцисс, соответствуют отдельным пикам АЧХ.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

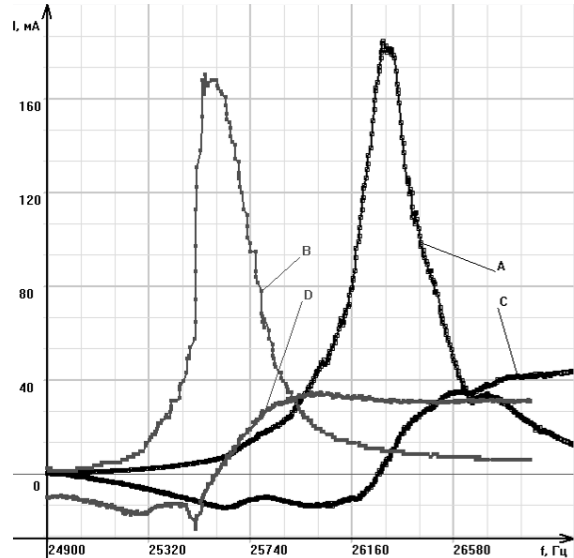
1. Преобразователь исходной конструкции, при использовании всех четырех рабочих инструментов полуволновой длины, имеет АЧХ и ФЧХ соответствующие условиям согласования;

2. Преобразователь модифицированной конструкции, при использовании любого рабочего инструмента полуволновой длины имеет АЧХ и ФЧХ не соответствующие требованиям;

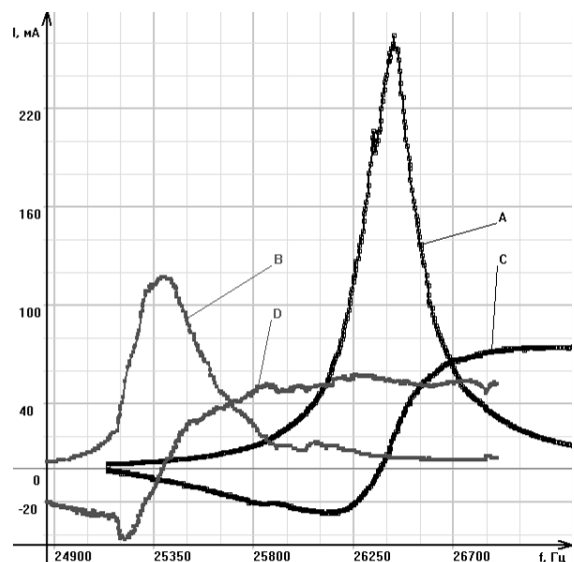
3. Искажение формы АЧХ преобразователя модифицированной конструкции происходит из-за возникновения паразитных изгибных колебаний на частоте, отличной от частоты основного резонанса.



a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
Рис. 17 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «скальпель» при излучении УЗ колебаний в водную среду.



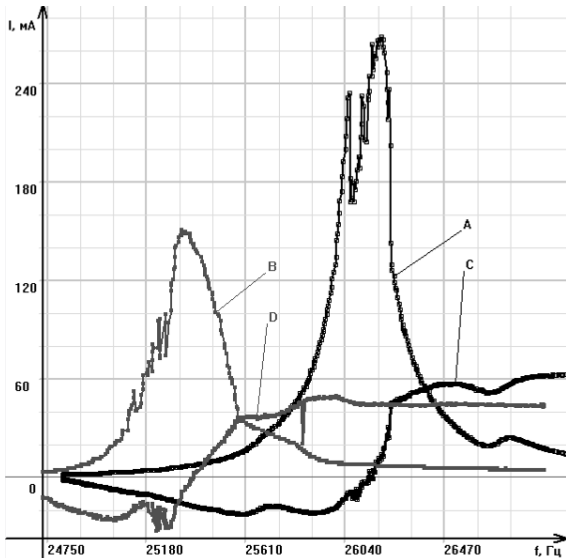
a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
Рис. 18 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «распылитель» при излучении УЗ колебаний в водную среду.



a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
Рис. 19 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «долото» при излучении УЗ колебаний в водную среду.

На Рис. 17 - Рис. 20 представлены АЧХ и ФЧХ преобразователей с присоединенными рабочими инструментами полуволновой длины при излучении УЗ колебаний в водную среду. Напряжение питания колебательной системы равно 93 В.

Появление акустической нагрузки не искажает формы АЧХ и ФЧХ преобразователя исходной конструкции. АЧХ преобразователя модифицированной конструкции приобретают один ярко выраженный пик. ФЧХ пересекают ось абсцисс один раз на частоте основного резонанса.



a – АЧХ преобразователя исходной конструкции;
b – АЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
c – ФЧХ преобразователя исходной конструкции;
d – ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции;
Рис. 20 – АЧХ и ФЧХ преобразователей исходной и модифицированной конструкции с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «резьба» при излучении УЗ колебаний в водную среду.

Таким образом, из полученных зависимостей следует, что при наличии нагрузки форма АЧХ и ФЧХ преобразователя модифицированной конструкции приближается к форме АЧХ и ФЧХ преобразователя исходной конструкции.

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. При наличии акустической нагрузки (излучение в воду) преобразователь исходной конструкции обеспечивает стабильные результаты и полное соответствие условиям согласования;

2. Паразитные изгибные колебания, возникающие при работе преобразователя модифицированной конструкции, полностью демпфируются акустической нагрузкой (водной средой). По этой причине АЧХ приобретает только один ярко выраженный пик, а ФЧХ пересекает ось абсцисс только один раз, на частоте основного резонанса. Таким образом, этот преобразователь соответствует условиям согласования только при условии демпфирования паразитных изгибных колебаний.

Дополнительно были проведены измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности рабочего окончания на обоих преобразователях. Измерения производились стробоскопическим

методом. Было установлено, что преобразователь исходной конструкции обеспечивает амплитуду механических колебаний, со всеми рабочими инструментами полуволновой и волновой длины, более 100 мкм. При использовании рабочего инструмента волновой длины с окончанием «чаша» до 150 мкм.

Преобразователь модифицированной конструкции обеспечивал амплитуду механических колебаний, с присоединенными рабочими инструментами волновой длины не более 30 мкм. При дальнейшем увеличении напряжения питания колебательной системы возникали паразитные изгибные колебания. Следствием чего было резкое снижение в 2-3 раза величины амплитуды продольных колебаний, на частоте основного резонанса. С рабочими инструментами полуволновой длины амплитуда продольных колебаний не превышала 15 мкм.

Кроме того, в процессе проведения исследований был выявлен значительный нагрев преобразователя модифицированной конструкции при подаче напряжения питания колебательной системы, соответствующего максимальной амплитуде механических продольных колебаний. Температура пьезоэлектрических элементов модифицированного преобразователя увеличивалась с 20°C до 80°C за 40 секунд. В тоже время преобразователь исходной конструкции нагревался до такой же температуры за интервал времени 360-420 секунд.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Преобразователь исходной конструкции имеет АЧХ и ФЧХ полностью, или практически полностью, соответствующие условиям идеального согласования при любых присоединенных рабочих инструментах. Таким образом, преобразователь обеспечивает надежную работу УЗ аппарата и стабильные выходные характеристики;

2. Преобразователь модифицированной конструкции обеспечивает надежную и стабильную работу УЗ аппарата только при использовании рабочих инструментов волновой длины, а также рабочих инструментов полуволновой длины, но при акустической нагрузке, достаточной для полного демпфирования паразитных изгибных колебаний;

3. Преобразователь модифицированной конструкции не способен обеспечить амплитуды колебаний, необходимые для реализации хирургических операций и нагревается до высоких температур за короткий промежуток времени;

4. Преобразователь модифицированной конструкции, в текущем состоянии, не может быть

использован в серийном производстве УЗ терапевтических и хирургических аппаратов, поскольку не обеспечивает необходимых и достаточных электрических и эксплуатационных характеристик. Необходимо проведение дополнительных исследований с целью предотвращения возникновения паразитных изгибных колебаний;

5. Преобразователь модифицированной конструкции может использоваться в УЗ аппаратах, где требуется малая интенсивность УЗ колебаний при непродолжительном времени работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Лебедев, "Полуволновые пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы", Техническая акустика, vol. 26: Восточноевропейская ассоциация акустиков, 2005
- [2] В.Н. Хмелев, А.Н. Лебедев, С.Н. Цыганок, И.И. Савин, В.Н. Штыр, М.В.Хмелев, "Конструирование ультразвуковых колебательных систем для ультразвуковых аппаратов", Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003, Новосибирск, НГТУ, 2003
- [3] Леонов Г.В., Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Хмелев М.В., Цыганок С.Н. Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе ультразвукового воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды/ Электронный журнал «Исследовано в России». - 2005. - 135. - С.1359-1367. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/135.pdf>
- [4] Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Шалунов А.В. Управление работой электронного генератора при ультразвуковом воздействии на кавитирующие технологические среды/ Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая системотехника». Выпуск 2. - Тула: ТулГУ, 2004. - С.32-40.
- [5] В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.С. Абраменко, Д.В. Генне, "Контроль параметров ультразвуковых генераторов для определения оптимальных режимов ультразвукового воздействия на различные среды", Intrnational Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007, Новосибирск, НГТУ, 2007



Владимир Н. Хмелёв (М'00, SM'04)— заместитель директора Бийского технологического института по НИР, профессор, доктор технических наук. Заслуженный изобретатель России. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Область научных интересов – ультразвуковая техника и технологии, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов.



Денис С. Абраменко родился в 1982 году, в г. Бийске. В 2005 закончил БТИ по специальности «Информационно-измерительная техника и технологии». Инженер БТИ. Область научных интересов: контроль, управление и измерение параметров ультразвукового оборудования.



Валерий В. Педдер - генеральный директор ООО НПП «Метромед» (г.Омск), заслуженный изобретатель РФ, академик РАМТН. Автор около 500 научных трудов, включая 120 изобретений. Научные интересы связаны с разработкой технологических основ использования концентрированных источников энергии для создания новых медицинских технологий лечения заболеваний.



Сергей Н. Цыганок родился в Новосибирске, Россия, 1975. Кандидат технических наук, доцент. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Областью научных интересов является разработка высокоэффективных пьезоэлектрических колебательных систем для ультразвуковых технологических аппаратов.



Роман В. Барсуков, к.т.н., доцент, БТИ. Родился в 1975 году в г. Бийске. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. Областью научных интересов является: разработка высоко мощных ультразвуковых генераторов.