

Исследование Влияния Акустического Контакта на Параметры Ультразвуковой Колебательной Системы

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., Максим В. Хмелёв¹

¹ Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ им И.И. Ползунова

²ООО НПП «Метромед»

Аннотация – В статье представлены результаты исследования влияния акустического контакта между сменным рабочим инструментом и электроакустическим преобразователем на механические и электрические параметры колебательной системы. Приведены измеренные амплитудно-частотные и фазочастотные зависимости колебательной системы с различными типами присоединенных рабочих инструментов. Производится анализ измеренных зависимостей и поиск критерия, позволяющего с высокой точностью определять акустический контакт недостаточный. Учет найденного критерия позволит предотвратить поломку УЗ технологического аппарата или его работы в неэффективном режиме, по причине недостаточного акустического контакта.

Ключевые слова – Ультразвук, усилие, рабочий инструмент.

I. ВВЕДЕНИЕ

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ являются эффективным, а в некоторых случаях единственным, способом решения множества технологических задач. Однако, одним из основных факторов сдерживающих распространение ультразвуковых технологий является высокая стоимость ультразвуковых технологических аппаратов. Это обусловлено тем, что практически все УЗ технологические аппараты проектируются для решения только одной отдельной задачи или ограниченного круга подобных задач. Это обусловлено принципом функционирования УЗ технологических аппаратов.

Наиболее остро эта проблема проявляется применительно к медицинским УЗ аппаратам. Во время проведения лечебной процедуры часто возникает необходимость последовательного проведения нескольких различных процедур с применением УЗ колебаний (например, санация, коагуляция, разрезание тканей и т.д.). Использование нескольких УЗ аппаратов, в подобной ситуации, является экономически не выгодным.

Одним из способов решения этой проблемы является расширение функциональных возможностей УЗ технологических аппаратов, посредством проектирования и настройки УЗ генератора

для работы с несколькими УЗ колебательными системами различного функционального назначения. Каждая колебательная система проектируется для эффективного решения отдельной задачи. В то же время такой подход, еще более увеличивает стоимость УЗ технологического аппарата. Все колебательные системы должны иметь максимально близкие электрические и механические характеристики. В противном случае возникает необходимость усложнения схемной и программной реализации УЗ генератора.

Вторым способом является использование одной колебательной системы, с возможностью быстрой смены рабочего инструмента. Каждый рабочий инструмент проектируется для эффективного решения отдельной задачи. Но возникает задача обеспечения необходимого и достаточного акустического контакта между торцевыми поверхностями электроакустического преобразователя и рабочего инструмента. Эту задачу усложняет способность ультразвуковых колебаний высокой амплитуды, в течение короткого промежутка времени, разрушать любые паянные и сварные соединения. Поэтому, в настоящее время, наибольшее распространение получил резьбовой способ соединения. Шпилька, выполненная отдельно или заодно с рабочим инструментом, вкручивается в глухую резьбу, выполненную в торцевой поверхности электроакустического преобразователя.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Практика использования УЗ медицинских аппаратов показала, что в процессе проведения одной операции необходимо использовать от двух и более сменных рабочих инструментов. Замена рабочего окончания производится непосредственно в процессе операции. В связи с этим, к вспомогательным средствам, применяемым для замены рабочего инструмента, помимо обеспечиваемой скорости замены, предъявляются дополнительные требования: малые массогабаритные размеры, простота использования и обеспечение стерильности. В результате следования этим требованиям появляются компо-

мисные варианты между скоростью замены, эргономикой и создаваемым усилием закручивания. Физические способности человека, производящего замену рабочего инструмента так же оказывают свое влияние. Были зафиксированы случаи, когда замена рабочих инструментов производилась вообще без вспомогательных средств.

Все эти обстоятельства, приводят к ситуации, когда акустический контакт, между рабочим инструментом и электроакустическим преобразователем, может оказаться недостаточным для обеспечения номинального режима работы УЗ колебательной системы.

В связи с этим возникла необходимость в проведении исследований, направленных на количественную и качественную оценку изменения электрических и механических параметров УЗ колебательной системы в зависимости от качества акустического контакта.

III. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований использовался ультразвуковой технологический аппарат, состоящий из электронного генератора, мощностью 100 ВА, и колебательной системы с набором сменных рабочих инструментов.

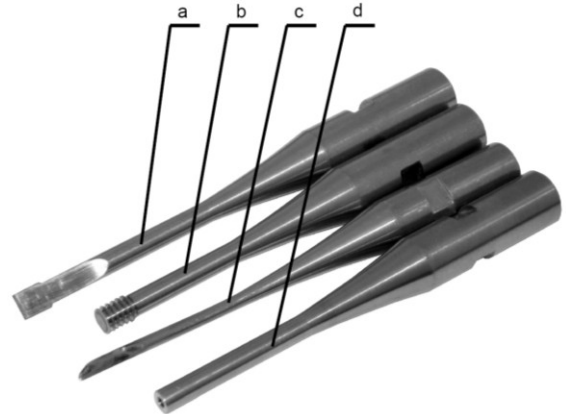
Схема управления электронного генератора содержит измерительные цепи, позволяющие в непрерывном режиме производить измерение следующих параметров: ток механической ветви колебательной системы (далее – ток механической ветви), текущая частота напряжения питания колебательной системы, а так же разность фаз между током механической ветви и напряжением резонансного колебательного контура (далее - разность фаз). Блок управления электронного генератора производит управление величиной и частотой напряжения питания колебательной системы.

Все измерения производились стандартными измерительными схемами, предусмотренными в электронном генераторе УЗ аппарата. Измерительная информация передавалась в ЭВМ, в виде потока цифровых данных, посредством последовательного протокола RS-232.

Нормирование величины акустического контакта производилось изменением угла поворота рабочего инструмента, от начального положения, с шагом 8°. В качестве начального положения принималось взаимное расположение рабочего инструмента и электроакустического преобразователя получаемое при их вращении до момента касания торцевых поверхностей, и последующим вращением усилием двух рук, без применения специальных средств. Это взаимное расположе-

ние элементов помечалось. Все дальнейшие углы поворота отмерялись относительно этого положения. Шаг изменения угла поворота рабочего инструмента обеспечивает два промежуточных положения между начальным положением и положением, при котором обеспечивается необходимый и достаточный акустический контакт.

В каждом положении производилось измерение зависимости тока механической ветви и разности фаз от величины и частоты напряжения питания ультразвуковой колебательной системы. Методика измерения АЧХ и ФЧХ заключалась в следующем. Устанавливалось фиксированное значение напряжения питания колебательной системы. Производилось последовательное изменение частоты этого напряжения в пределах частотного диапазона перестройки электронного генератора. Шаг изменения частоты составлял 5 Гц. Изменение частоты производилось как начиная от нижней границы частотного диапазона перестройки к верхней, так и в обратном направлении. На каждом шаге изменения частоты производилось измерение всех требуемых параметров и их передача в ЭВМ. Затем эти же процедуры производились при большем значении напряжения питания колебательной системы. Шаг изменения напряжения принят 9.3 В. Величина напряжения питания колебательной системы увеличивалась до тех пор, пока амплитудное значение тока механической ветви не превышало значения 170 мА. Такое значение тока обеспечивает амплитуду механических колебаний излучающей поверхности рабочего инструмента около 100 мкм. Дальнейшее увеличение величины напряжения является не целесообразным, поскольку может привести к поломке УЗКС.



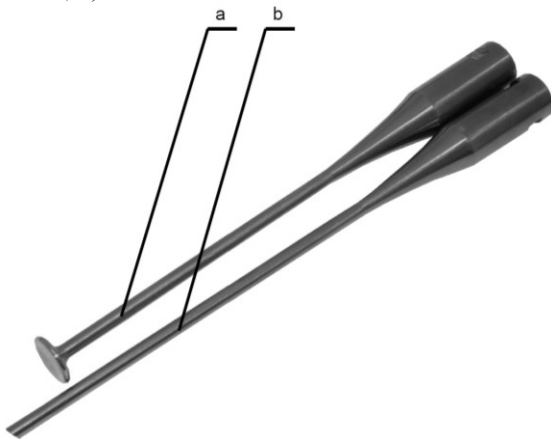
- a) рабочий инструмент с окончанием «долото»,
- b) рабочий инструмент с окончанием «шарошка»,
- c) рабочий инструмент с окончанием «скальпель»,
- d) рабочий инструмент с окончанием «распылитель»

Рис. 1 – Внешний вид рабочих инструментов первой группы (полуволновой длины)

Все рабочие инструменты, использовавшиеся в исследованиях, можно разделить на две группы. К первой относятся рабочие инструменты

имеющие длину, соответствующую половине длины волны УЗ колебаний в материале инструмента. К этой группе относятся четыре рабочих инструмента с окончаниями «долото» (см. Рис. 1, а), «распылитель» (см. Рис. 1, b), «шарошка» (см. Рис. 1, c) и «скальпель» (см. Рис. 1, d).

Ко второй относятся рабочие инструменты, длина которых соответствует длине волны УЗ колебаний в материале инструмента. К этой группе относятся два рабочих инструмента с окончаниями «пика» (см. Рис. 2, а) и «чаша» (см. Рис. 2, b).



а) рабочий инструмент с окончанием «пика»,
b) рабочий инструмент с окончанием «чаша»,
Рис. 2 – Внешний вид рабочих инструментов второй группы (волновой длины)

Для каждого рабочего инструмента были измерены АЧХ и ФЧХ для каждого угла поворота при различных значениях величины напряжения питания колебательной системы.

Далее приводятся графики полученных зависимостей, а так же производится их анализ.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измеренные данные представлены в виде зависимости тока механической ветви и разности фаз от частоты напряжения питания колебательной системы, при различных значениях величины этого напряжения.

Первичный анализ зависимостей показал, что во всех измерительных ситуациях, начиная с определенного значения напряжения питания колебательной системы (более 45 В), начинает проявляться гистерезис свойств. В результате амплитудное значения тока, частота основного резонанса и форма АЧХ и ФЧХ различаются при увеличении изменении частоты от нижней границы частотного диапазона к верхней от тех же зависимостей полученных при уменьшении частоты от верхней границы к нижней. Сравнение полученных зависимостей показало, что разность амплитудного значения не превышает несколь-

ких процентов, а разность частот составляет 20 - 30 Гц. По причине незначительности этих различий все представленные зависимости полученные при увеличении частоты.

Анализ ФЧХ показал, что в большинстве случаев, ее форма не зависит от величины напряжения питания колебательной системы. В таких случаях на графиках отображается только ФЧХ при максимальном значении напряжения.

Если характер АЧХ и ФЧХ не претерпевает значительных изменений при увеличении угла поворота рабочего инструмента, то такие зависимости не представляются в данной статье.

На Рис. 3 - 7 представлены зависимости АЧХ и ФЧХ, полученные с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «пика». Рабочее окончание инструмента погружено в воду на 4 см.

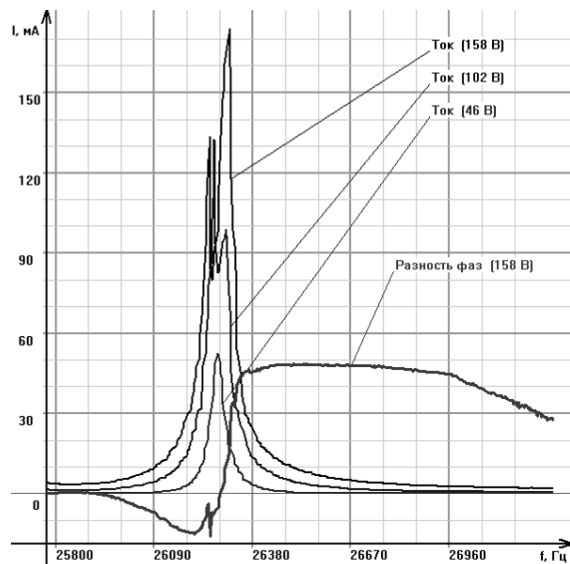


Рис. 3 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 46 В до 158 В), и ФЧХ при напряжении равном 158 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» погружен в воду. Угол поворота рабочего инструмента 24°.

Как можно видеть из Рис. 3 и Рис. 4, различие между максимальными значениями тока составляет 10 мА (около 6%), при этом форма АЧХ и ФЧХ имеет практически идентичный вид. При всех значениях напряжения АЧХ имеют один ярко выраженный основной резонанс. ФЧХ пересекает ось абсцисс только один раз, на частоте максимального значения основного резонанса. АЧХ имеет практически симметричную форму относительно частоты основного резонанса.

Подобный характер АЧХ и ФЧХ колебательной системы обеспечивает эффективную, надежную и стабильную работу УЗ аппарата.

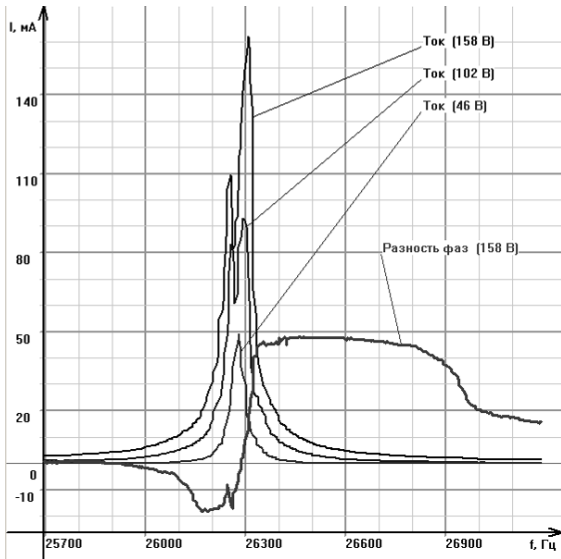


Рис. 4 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 46 В до 158 В), и ФЧХ при напряжении равном 158 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» погружен в воду. Угол поворота рабочего инструмента 16°.

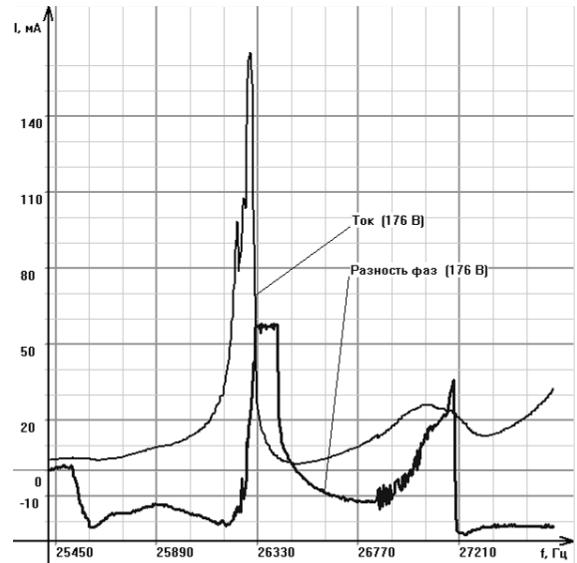


Рис. 6 – АЧХ и ФЧХ колебательной системы при напряжении питания колебательной системы равном 176 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» погружен в воду. Угол поворота рабочего инструмента 8°.

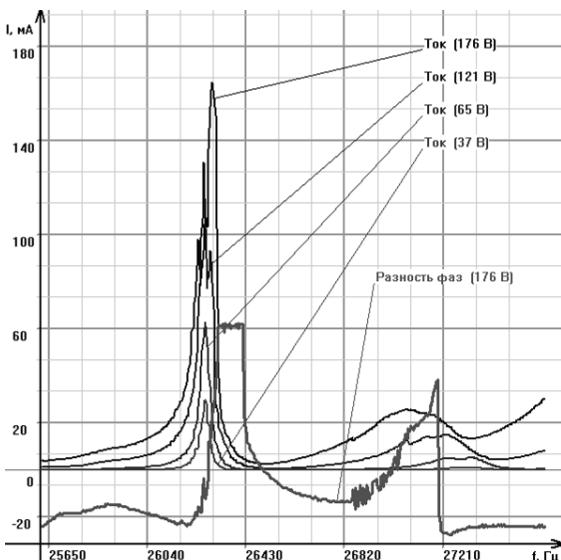


Рис. 5 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 176 В). Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» погружен в воду. Угол поворота рабочего инструмента 8°.

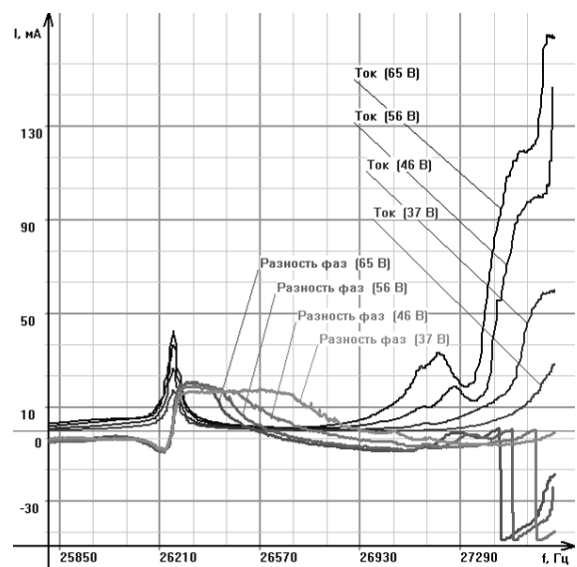


Рис. 7 – АЧХ и ФЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 65 В). Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» погружен в воду. Угол поворота рабочего инструмента 0°.

Но при изменении угла поворота рабочего инструмента до 8° (Рис. 5 и Рис. 6) возникает паразитный резонанс, на частоте, отстоящей от частоты основного резонанса, на 700 Гц. При дальнейшем увеличении частоты происходит увеличение величины тока механической ветви. Симметрия формы АЧХ нарушается, спад амплитуды тока происходит значительно быстрее. Следует отметить, что на частоте паразитного резонанса ФЧХ пересекает ось абсцисс, что отрицательно влияет на надежность работы системы управления электронного генератора.

При изменении угла поворота до 0° происходят сильные искажения АЧХ и ФЧХ. Амплитуда тока на частоте основного резонанса значительно снижается (при напряжении равном 176 В амплитуда тока не превышает 100 мА). При этом паразитный резонанс отодвинулся выше по частоте, а амплитуда тока соответствующая ему более чем в 4 раза превышает амплитуду тока на частоте основного резонанса. ФЧХ пересекает ось абсцисс в двух точках. Причем на частоте паразитного резонанса наблюдается резкое уменьшение значения разности фаз. Это проис-

ходит из-за искажения (распадение прямоугольного сигнала на несколько прямоугольных сигналов меньшей длительности) сигнала обратной связи. На частоте паразитного резонанса рабочий инструмент излучает звуковые волны, лежащие в слышимом диапазоне частот. Это обусловлено возникновением изгибных колебаний рабочего инструмента.

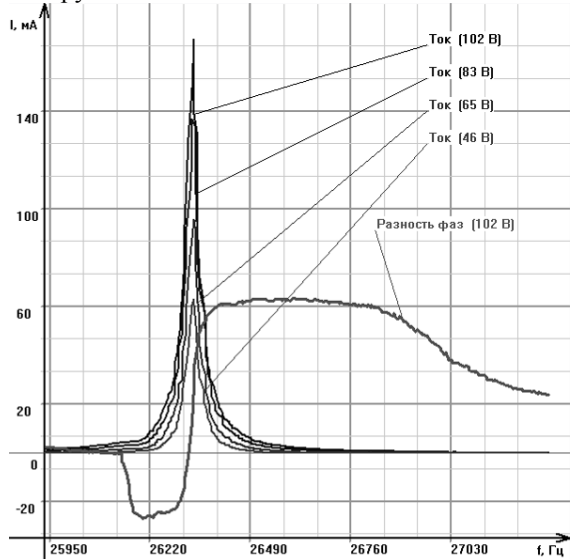


Рис. 8 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательных систем (от 46 В до 102 В), и ФЧХ при напряжении равном 102 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 24° .

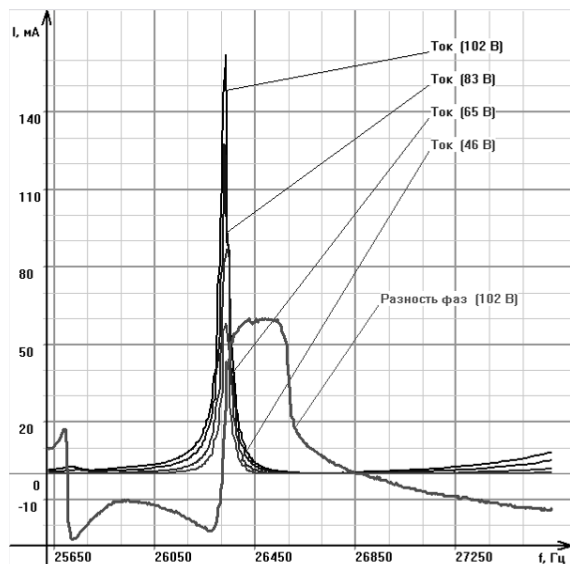


Рис. 9 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательных систем (от 46 В до 102 В), и ФЧХ при напряжении равном 102 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 8° .

На Рис. 8 - 11 представлены зависимости, полученные с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «пика». Рабочий инструмент использовался для излучения УЗ колебаний

в воздух. АЧХ и ФЧХ при углах поворота 24° и 16° практически идентичны. При всех значениях напряжения АЧХ имеют один ярко выраженный резонанс. ФЧХ пересекает ось абсцисс в одной точке соответствующей частоте основного резонанса. АЧХ имеет практически симметричную форму относительно частоты основного резонанса.

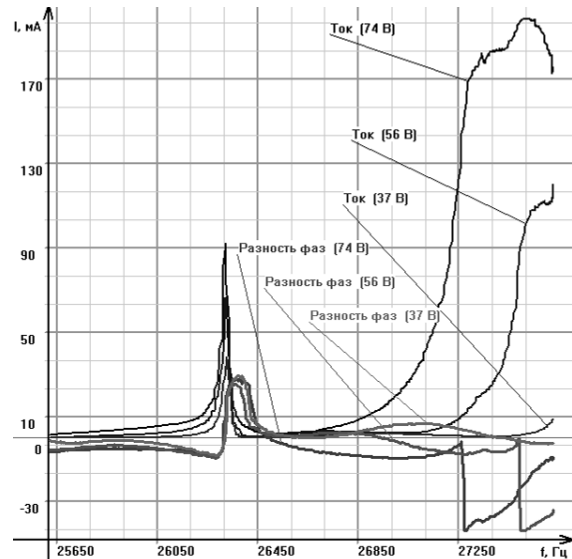


Рис. 10 – АЧХ и ФЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 74 В). Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 0° .

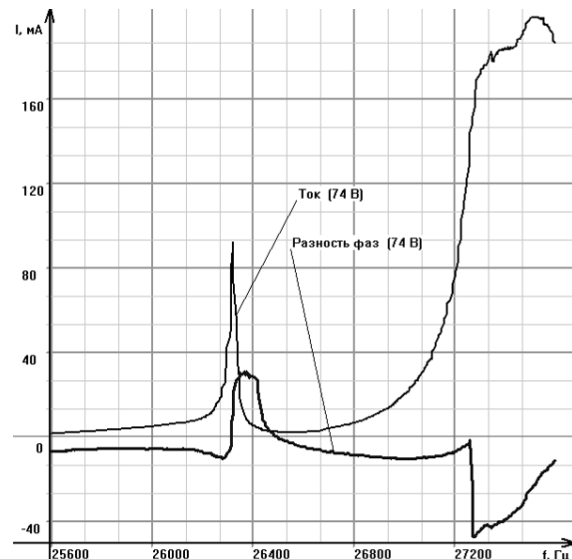


Рис. 11 – АЧХ и ФЧХ колебательной системы при значении напряжения питания колебательной системы равном 74 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «пика» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 0° .

Но при изменении угла поворота рабочего инструмента до 8° (см. Рис. 9) форма АЧХ искажается и становится не симметричной относи-

тельно частоты основного резонанса. С увеличением частоты происходит постепенное увеличение амплитуды тока, поскольку за пределами частотного диапазона перестройки генератора появляется паразитный резонанс.

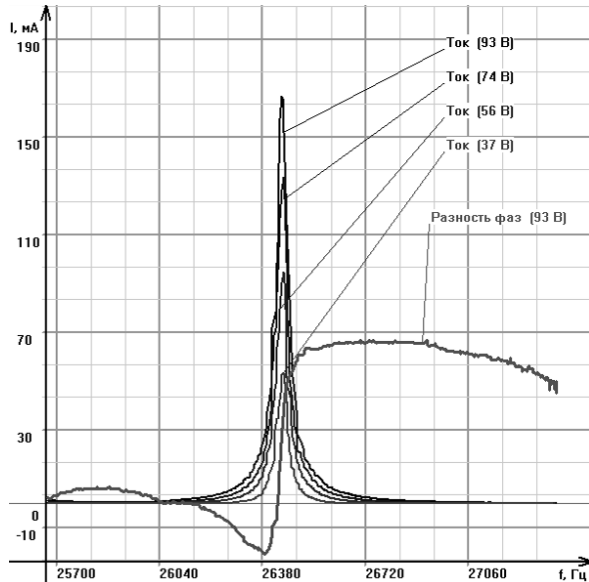


Рис. 12 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 93 В), и ФЧХ при напряжении равном 93 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «чаша» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 24°.

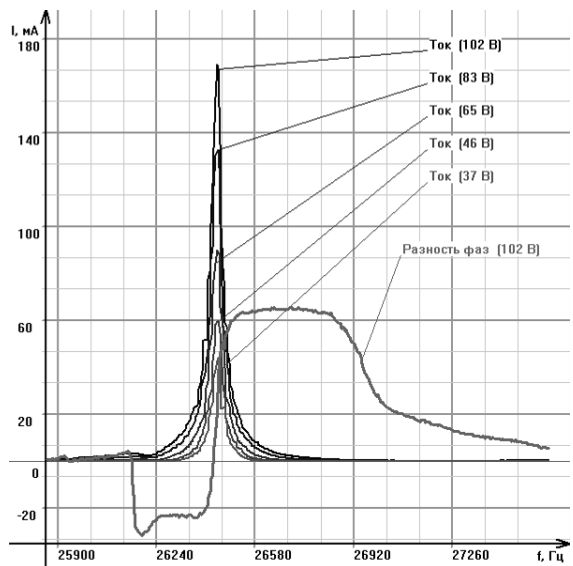


Рис. 13 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 102 В), и ФЧХ при напряжении равном 102 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «чаша» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 8°.

При изменении угла поворота рабочего инструмента до 0° (см. Рис. 10 и Рис. 11) наблюдается ситуация аналогичная Рис. 7. Наличие паразитного резонанса значительно снижает амплитуду тока механической ветви на частоте основного резонанса.

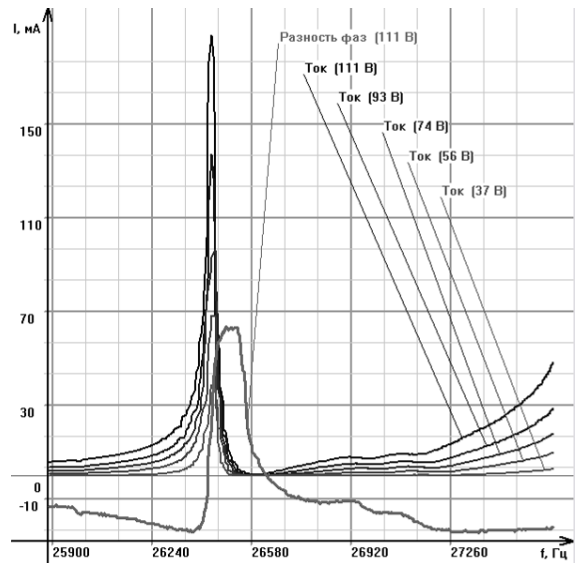


Рис. 14 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 111 В), и ФЧХ при напряжении равном 111 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «чаша» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 0°.

На Рис. 12-14 представлены зависимости, полученные с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «чаша». Рабочий инструмент использовался для излучения в воздух. АЧХ и ФЧХ при углах поворота 24° и 16° практически идентичны. При всех значениях напряжения АЧХ имеют один ярко выраженный резонанс. ФЧХ претерпевает только один переход через нулевое значение. АЧХ имеет практически симметричную форму относительно частоты основного резонанса.

При изменении угла поворота рабочего инструмента до 8° (Рис. 13) возникает незначительное нарушение симметричности АЧХ относительно частоты основного резонанса, а так же наблюдается небольшое снижение амплитудного значения АЧХ. Наличие паразитного резонанса не наблюдается. Значение тока механической ветви принимает нулевое значение и с увеличением частоты не меняется.

При изменении угла поворота рабочего инструмента до 0° (Рис. 14) нарушается симметричность АЧХ относительно частоты основного резонанса. Возникает паразитный резонанс, в результате чего происходит увеличение амплитуды тока, механической ветви, выше по частоте относительно частоты основного резонанса. Вероятней всего ФЧХ имеет еще одно пересечение с осью абсцисс на частоте паразитного резонанса (аналогично зависимости с рабочим инструментом «Пика»).

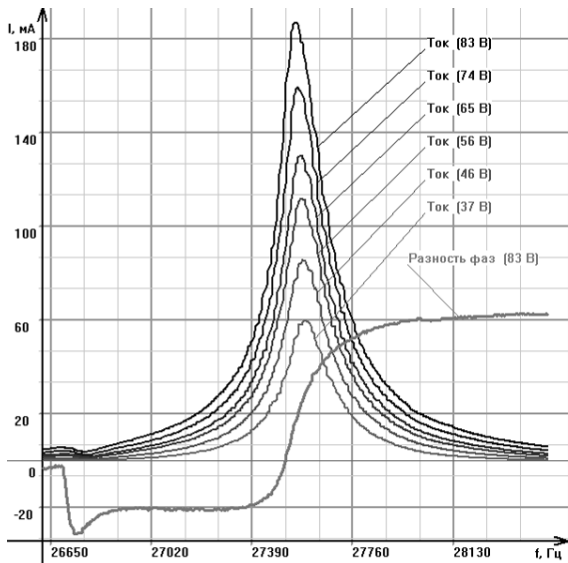


Рис. 15 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 83 В), и ФЧХ при напряжении равном 83 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «скальпель» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 24°.

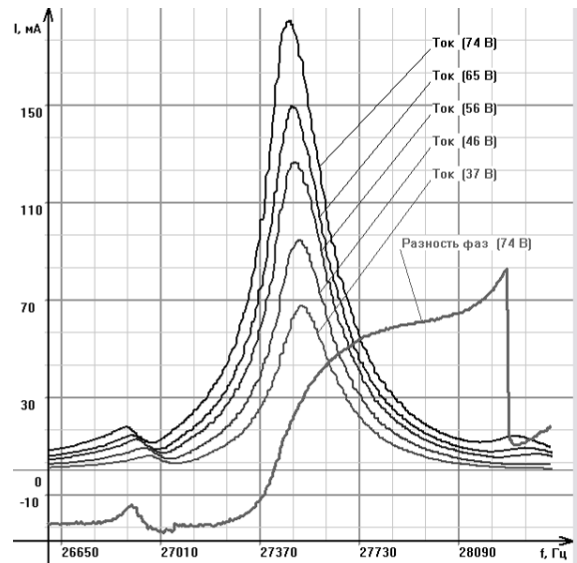


Рис. 17 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 74 В), и ФЧХ при напряжении равном 74 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «скальпель» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 0°.

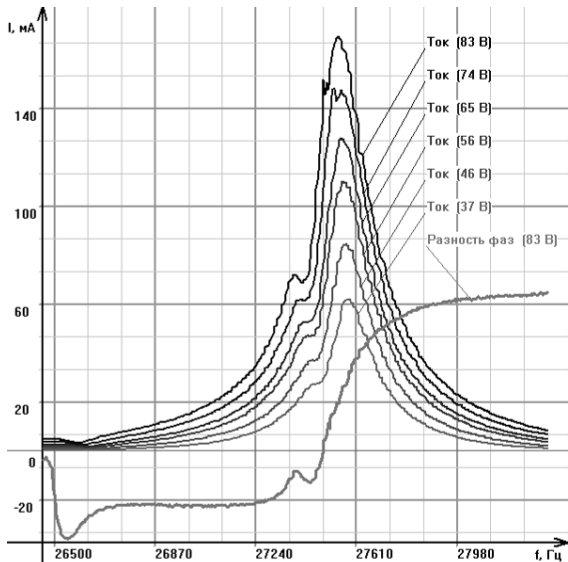


Рис. 16 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 83 В), и ФЧХ при напряжении равном 83 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «скальпель» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 8°.

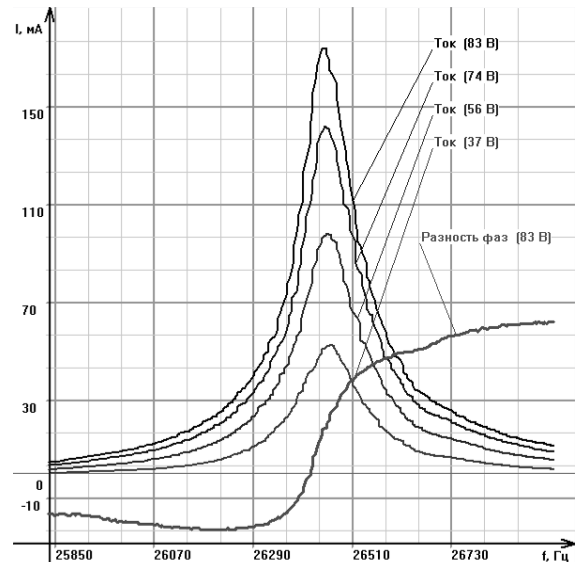


Рис. 18 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 83 В), и ФЧХ при напряжении равном 83 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «долото» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 24°.

На Рис. 15-17 представлены зависимости, полученные с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «скальпель». Рабочий инструмент использовался для излучения в воздухе. Характер зависимостей практически не изменяются при изменении угла поворота. Следует отметить возникновение незначительных увеличений амплитуды тока вблизи от основного резонанса, но ФЧХ на этих частотах не пересекает ось абсцисс.

На Рис. 18 и Рис. 19 представлены зависимости, полученные с присоединенным рабочим инструментом с окончанием «долото». Рабочий инструмент использовался для излучения в воздухе. Параметры практически не изменяются при изменении угла поворота рабочего инструмента. Следует отметить, что не происходит значительных изменений формы АЧХ и ФЧХ.

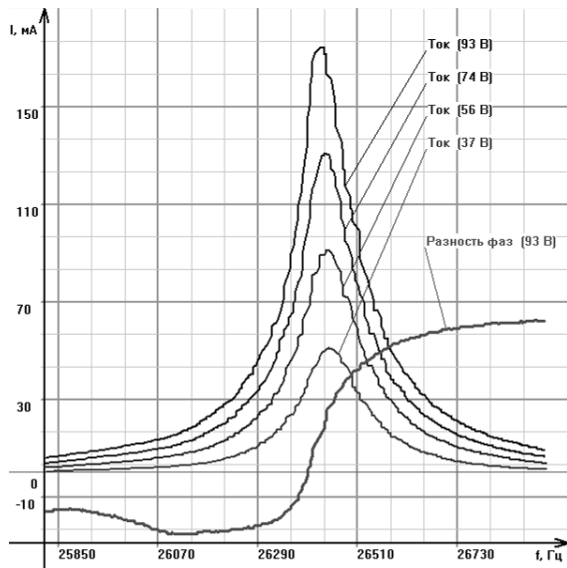


Рис. 19 – АЧХ колебательной системы при различных значениях напряжения питания колебательной системы (от 37 В до 93 В), и ФЧХ при напряжении равном 93 В. Присоединенный рабочий инструмент с окончанием «долото» расположен в воздухе. Угол поворота рабочего инструмента 0° .

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования доказали, что качество акустического контакта, между сменным рабочим инструментом и электроакустическим преобразователем, влияет на электрические и механические параметры УЗ колебательной системы. Влияние проявляется в различной степени, в зависимости от формы и размеров рабочего инструмента.

О качестве акустического контакта можно судить по характеру изменения величины тока механической ветви на частотах превышающих значение частоты основного резонанса на 700 – 900 Гц.

На основе проведенного анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Влияние качества акустического контакта на параметры колебательной системы, с присоединенными рабочими инструментами полуволновой длины, является незначительным;
2. Влияние качества акустического контакта на параметры колебательной системы, с присоединенными рабочими инструментами волновой длины, проявляется в значительной степени. В некоторых случаях становится невозможным обеспечение работы УЗ колебательной системы в номинальном режиме;
3. Найден способ контроля качества соединения рабочего инструмента с электроакустическим преобразователем по электрическим параметрам этого преобразователя;
4. Для повышения качества и надежности функционирования алгоритмов управления элект-

тронного генератора рекомендуется внесение изменений в схемную и программную реализацию, обеспечивающих контроль качества акустического контакта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Г.В. Леонов, В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, М.В.Хмелев, "Исследование изменений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем в процессе УЗ воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды", International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2005, Новосибирск, НГТУ, 2005
- [2] 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", International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007, Новосибирск, НГТУ, 2007.
- [3] 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.



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 разра-



боткой 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.



Максим В. Хмелёв родился в 1982 году, в г. Бийске. В 2005 закончил БТИ по специальности «Информационно-измерительная техника и технологии». Инженер БТИ. Область научных интересов: ультразвуковые технологии очистки.