

Лекция 9

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЗМОЖНОСТИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТРОЛЯ СРЕД ПО ПАРАМЕТРАМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Уважаемые Студенты, Магистранты, Аспиранты, Коллеги!

(Слайд 1).

Предлагаемое Вам сообщение (лекция) посвящено рассмотрению вопроса контроля в процессе эксплуатации ультразвуковых приборов для промышленного применения (т.е. применению аппаратов и технологий).

Коротко о том, о каком контроле будет идти речь в Лекции.

В первую очередь о контроле параметров ультразвуковой пьезоэлектрической колебательной системы в процессе ее применения.

Зачем это нужно.

Это нужно для обеспечения максимально эффективной ее работы, т.е. осуществления максимально эффективного воздействия. Т.е., в процессе воздействия на различные меняющиеся среды и в различных условиях, учитывая возможные изменения параметров самой системы (износ инструмента, изменение свойств керамики и металлов при изменениях температуры) необходимо знать электрические параметры системы и подавать для ее питания необходимые по величине и частоте питающие напряжения, максимально эффективно обеспечивая согласование генератора и колебательной системы.

Во вторую очередь, необходимо непрерывно контролировать состояние обрабатываемых сред (изменения состава и структуры, химической активности и т.п.), которые влияют на работу системы. Это позволит не только контролировать изменения параметров колебательных систем для согласования с генератором но, самое важное, обеспечит контроль параметров реализуемых процессов и характеристик получаемых при этом материалов.

В лекции изложен мой взгляд на реализации проблемы контроля в применении ультразвуковых аппаратов, а также мой подход к решению этой проблемы.

Поэтому далее более подробно.

Прежде чем начать, как обычно – об авторе **(Слайд 2)**.

Слайд 3.

Как Вам уже известно, в настоящее время множество технических и технологических проблем решается применением ультразвуковых воздействий на различные среды.

Так, с помощью ультразвукового воздействия осуществляют кавитационную обработку жидких и жидко дисперсных сред, получая

устойчивые эмульсии, тонкодисперсные суспензии, экстракты, разделяя нанотрубки и др. При ультразвуковом воздействии на твердые тела осуществляют сварку полимеров и металлов, размерную обработку хрупких и осотвердых материалов, бурение грунтов, очистку поверхностей и разрушение покрытий.

В целом ультразвук позволяет интенсифицировать различные процессы, реализовать новые процессы, улучшить качество получаемых материалов и продуктов и получать новые вещества и материалы

Эффективность ультразвуковых технологий подтверждена полувековым широчайшим применением в различных отраслях промышленности. Сегодня без применения ультразвука высокой интенсивности невозможно представить себе решение множества глобальных проблем Человечества

Поэтому, современные производства требуют все больше ультразвуковых аппаратов для интенсификации различных технологических процессов. Одновременно растут требования к аппаратам по их эффективности и производительности.

Очевидно, что воздействовать можно только на что то. В данном случае, обобщенно, будем называть это технологическим процессом. Пока не будем рассматривать внутренностей технологического процесса, но понимаем, что воздействие осуществляется на среды с различными свойствами, в них протекают разнообразные физические процессы, обусловленные УЗ воздействием, и происходят изменения среды, необходимые для получения новых свойств или материалов.

Во всех случаях ставится задача реализации максимально эффективного ультразвукового воздействия, что обычно выражается в необходимости создания в зоне воздействия УЗ колебаний с максимальной интенсивностью (амплитудой) для достижения максимальной производительности процесса при требуемом качестве получаемого продукта. Поэтому электронный генератор должен обеспечивать формирование электрических колебаний, соответствующих собственной резонансной частоте колебательной системы при всех возможных воздействиях на ее со стороны обрабатываемой среды. При этом колебательная система должна не только осуществлять преобразование электрических колебаний в механические, но обеспечивать их усиление, введение в среды посредством рабочих инструментов для осуществления максимально эффективного воздействия на среды, материалы или препятствия в этих средах.

Таким образом, эффективность ультразвукового воздействия определяется не только работой электронного генератора и колебательной системы (конструктивной схемой, количеством промежуточных и усилительных каскадов, формой и размерами рабочего инструмента), но и условиями их согласования, а также условиями распространения колебаний в обрабатываемых средах, условиями отражения и влиянием обрабатываемых сред при реализации различных процессов (воздействие на твердые, жидкие или газообразные среды). Кроме того, нагрузкой

электронного генератора является не только колебательная система, но и обрабатываемая среда в процессе воздействия на нее.

Причем структура и свойства обрабатываемой среды постоянно меняется, поскольку возникновение и развитие кавитационного процесса всегда меняют состав среды за счет эмульгирования или диспергирования твердых частиц. Кроме того, в процессе кавитационной обработки жидких сред, особенно при экстремальных условиях высоких температур, давлений или химической активности сред происходит разрушение рабочих инструментов.

Изменение структуры и свойств, а также разрушение рабочих инструментов происходит и при размерной обработке или бурении грунтов, особенно в условиях экстремально низких космических температур.

Все эти факторы оказывают существенное влияние на эффективность ультразвукового воздействия (т.е. на эффективность реализации процессов) и их влияние должно устраняться или уменьшаться до минимально допустимых пределов.

(Слайд 4).

И так, при реализации любых процессов и в любых средах в основе всегда лежит ультразвуковое воздействие. Поэтому все ультразвуковые аппараты предназначены для создания «ультразвукового воздействия», поэтому далее мы будем рассматривать организацию этого «ультразвукового воздействия». Но с другой стороны «ультразвуковое воздействие» необходимо создавать. Для его создания необходим ультразвуковой технологический аппарат, основу которого составляет излучатель ультразвука и источник его питания – генератор.

(Слайд 5).

Перед Вами схематично устройство ультразвукового технологического аппарата. К его основным элементам (излучатель ультразвука и источник его питания – генератор) я сразу вынужден добавить систему контроля процесса воздействия и систему управления процессом ультразвукового воздействия. Т.е. ультразвуковой аппарат это информационно измерительная, контролирующая система, управляемая на основе данных контроля.

На следующих слайдах к качестве примера показаны различные технологические процессы, наиболее интересные для нас. Бурение лунного грунта, содержащего лед (Слайд 6). Кавитационное воздействие на расплавленный металл (Слайд 7). и обработка жидко дисперсных полимеров при различных температурах и вязкостях (Слайд 8).

Слайд 9.

Ультразвуковое воздействие на различные среды и в различных условиях всегда реализуется за счет формирования механических ультразвуковых колебаний при помощи колебательных систем, наиболее известные из которых представляют собой последовательно установленные

и акустически связанные пьезоэлектрический преобразователь, один или несколько резонансных промежуточных звеньев (бустеров или концентраторов механических колебаний) и рабочий инструмент.

Для формирования механических колебаний при помощи пьезоэлектрического преобразователя (его электрического питания) применяют электронные генераторы, преобразующие электрические колебания промышленной сети в электрические колебания ультразвуковой частоты, соответствующей собственной резонансной частоте колебательной системы.

На практике используются две основные конструктивные схемы пьезоэлектрических колебательных систем

Слайд 10.

Первая многополуволновая система состоит из преобразователя Ланжевена и далее одного или нескольких последовательно установленных усилительных полуволновых звеньев и инструментов (**Слайд 11**).

Проблемы, связанные с применением таких систем мы с вами рассматривали ранее. Основная - это согласование между собой отдельных резонансных звеньев.

Слайд 12.

Вторая представляет собой систему, объединяющую в полуволновой конструктивной схеме преобразователь и концентратор с рабочим инструментом.

Ее достоинства нам хорошо известны. Система всегда остается резонансной с частотой, определяемой суммарной длиной системы..

Обе конструктивные схемы используются на практике и поэтому необходимо исследовать процессы контроля для всех используемых систем.

Слайд 13.

При выявлении причин снижения эффективности УЗ воздействий при реализации различных процессов было установлено, что пьезоэлектрическая колебательная система, характеризуется собственными электрическими параметрами (электрическое сопротивление, электрическая емкость, индуктивность), которые влияют на работу выходного электрического контура генератора и требуют определенных условий согласования с электронным генератором. Аналогичным образом, на электрические параметры колебательной системы, влияет обрабатываемая среда (плотность, вязкость, скорость распространения колебаний), состояние рабочего инструмента, форма и размеры технологического объема.

Слайд 14

Поэтому, в процессе реализации ультразвукового воздействия на различные среды (жидкие, жидкодисперсные и твердые) и в различных условиях (изменения размеров инструментов, обрабатываемых промежутков,

разрушаемых покрытиях и т.п.) возникает необходимость непрерывного получения информации о состоянии обрабатываемых сред и о происходящих в них изменениях.

Слайд 15.

Получение такой информации, реализуется измерением электрических характеристик и обеспечивает не только возможность оптимизации ультразвукового воздействия при любых изменения в зоне воздействия, но и позволяет контролировать структуру и свойства сред и материалов в процессе обработки.

Слайд 16.

Но, при этом, кроме воздействий на электронный генератор, обусловленных «положительным» целенаправленным изменением структуры и свойств обрабатываемых сред и материалов для получения нужного состояния или структуры происходит формирование «отрицательных» воздействий на генератор, обусловленных изменением размеров разрушаемых рабочих инструментов, изменением условий распространения колебаний за счет изменений скорости их распространения, обусловленных развитием кавитации и изменением плотности (вплоть до изменения условий распространения колебаний от состояния стоячей волны до состояния бегущей волны), а также изменение условий отражения колебаний при разрушении грунтов, поверхностей стенок и покрытий кавитацией.

По этой причине, организация достоверного контроля протекания процессов и происходящих целенаправленных изменений состояния сред требует не только учета структуры и свойств обрабатываемых материалов, но и учета влияния изменений, обусловленных изменением размеров инструментов, изменением условий распространения колебаний между излучателями и отражателями, при которых реализуется уход от наиболее эффективных резонансных условий распространения колебаний, а также за счет изменения размеров отражающих элементов, обусловленных их кавитационным разрушением.

В связи с этим возникает необходимость теоретического исследования различных параметров систем и реализуемых процессов на контролируемый параметры пьезоэлектрических колебательных систем.

Слайд 17.

В частности – возникает необходимость выявления и установления зависимостей.

1. Влияния изменений рабочего инструмента (разрушения) на электрические параметры пьезоэлектрической колебательной системы
2. Влияние разрушения отражающей поверхности (разрушаемого объекта) на электрические параметры пьезоэлектрической колебательной системы

3. Влияние изменений условий УЗ воздействия (увеличение расстояний, изменение свойств материалов, отклонение от резонансных условий) на электрические параметры пьезоэлектрической колебательной системы

В конечном счете, такие результаты нужны нам для разработки методики построения ультразвуковых колебательных систем, способных с одной стороны обеспечить эффективное воздействие на жидкие и твердые среды при наличии аномально низких и высоких температур, а с другой стороны имеющих максимальную взаимосвязь своих параметров с акустическими свойствами обрабатываемой среды (для косвенного контроля процесса разрушения материала инструмента и изменения структуры и свойств при кавитационных явлениях в жидких средах).

Слайд 18.

Схема реализации процесса воздействия. Один пьезоэлектрический преобразователь Ланжевена и присоединение к нему необходимого количества усилительных звеньев для получения необходимого усиления, т.е. заданной амплитуды колебаний.

Один пьезопреобразователь дает амплитуду колебаний в 5...7 мкм. Три усилительных звена (концентратора с коэффициентами усиления каждого 2 позволят увеличить амплитуду колебаний рабочего инструмента до 40...56 мкм. Такой амплитуды будет достаточно для бурения и кавитационной обработки жидких сред.

Слайд 19

В основу исследований положено построение электромеханической модели ультразвукового излучателя, позволяющей учитывать влияние кавитационных явлений и процесса разрушения инструмента и покрытий на характеристики и параметры УЗ излучателей с целью создания способа косвенного контроля кавитационных явлений в низко – и высокотемпературных жидких средах, путем контроля параметров УЗ колебательных систем.

Слайд 20.

На первом этапе мы исследовали влияния износа (в пределах 100 мкм) тестового рабочего инструмента на электрические параметры ультразвуковой пьезоэлектрической колебательной системы для различных конструктивных схем ее выполнения (вариантов сборки).

На **Слайде 20** представлены зависимости импеданса Z УЗ излучателя от величины износа цилиндрического наконечника ΔL для различных вариантов сборки (количества последовательно соединенных однотипных волноводных элементов) УЗКС и коэффициентов усиления K ее элементов.

Из представленных на слайде кривых, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами без коэффициента усиления ($K=1$) не оказывает никакого влияния на зависимость импеданса Z от величины износа тестового образца (кривые совпадают).

Диапазон изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL при последовательном присоединении полуволновых элементов с $K=1$ не меняется.

Чувствительность контролируемого параметра ΔZ от ΔL составляет $\frac{\Delta Z}{\Delta L} = 0.09$ Ом/мкм и не зависит от параметров текущей сборки.

Слайд 21

Из кривых, представленных на **слайде 21** следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=1.5$ приводит к увеличению диапазона изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL увеличивается на 120 %, 400 % и 1127 %, соответственно, по отношению к сборке «Преобразователь+Нагрузка». Абсолютные же значения диапазона изменения ΔZ составляют 4.4 Ом, 9.7 Ом, 22 Ом и 54 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔZ к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Z1}{\Delta L} = 0.088 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z2}{\Delta L} = 0.194 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z3}{\Delta L} = 0.44 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Z4}{\Delta L} = 1.08 \text{Ом/мкм}$.

Слайд 22.

Из кривых, представленных на слайде следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=2$ приводит к большему увеличению диапазона изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL увеличивается на 295%, 1700% и 10000 % соответственно, по отношению к сборке «Преобразователь+Нагрузка».

Абсолютные же значения диапазона изменения ΔZ составляют 4 Ом, 15 Ом, 72 Ом и 405 Ом соответственно. Чувствительность параметра ΔZ к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Z1}{\Delta L} = 0.08 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z2}{\Delta L} = 0.316 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z3}{\Delta L} = 1.44 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Z4}{\Delta L} = 8.1 \text{Ом/мкм}$.

Следует отметить, что представленные на этих трех слайдах кривые имеют минимум, из чего следует, что одному и тому же значению импеданса соответствует два различных значения ΔL . В связи с этим, полученные зависимости можно использовать либо в диапазоне, когда $\Delta L=0...50$, либо когда $\Delta L=50...100$.

Слайд 23.

Далее были проведены исследования по выявлению зависимостей для действительной и мнимой составляющих комплексного сопротивления.

На **Слайде 23** справа представлены зависимости действительной части импеданса Re УЗ излучателя от величины износа цилиндрического наконечника ΔL для различных вариантов сборки (количества последовательно соединенных однотипных волноводных элементов) УЗКС и коэффициентов усиления K ее элементов.

Из кривых, представленных на **слайде 23**, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами без коэффициента усиления ($K=1$) не оказывает никакого влияния на зависимость действительной части импеданса Re от величины износа тестового образца (кривые совпадают). Диапазон изменения действительной части импеданса при изменении ΔL равен 0.

Из кривых, представленных на **Слайде 24**, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=1.5$ приводит к увеличению диапазона изменения действительной составляющей импеданса ΔRe при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔRe при изменении ΔL составляет 0.8 Ом, 5 Ом и 28 Ом соответственно. Без элементов «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔRe при изменении ΔL близок к нулю.

Чувствительность параметра ΔRe к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Re1}{\Delta L} = 0 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re2}{\Delta L} = 0.008 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re3}{\Delta L} = 0.05 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Re4}{\Delta L} = 0.28 \text{Ом/мкм}$.

Из кривых, представленных на слайде 25, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=2$ приводит к большему увеличению диапазона изменения действительной составляющей импеданса ΔRe при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔRe при изменении ΔL увеличивается на 1600%, 28900% и 450000% соответственно, в сравнении со сборкой «Преобразователь+нагрузка».

Диапазоны изменения ΔR в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 0.1 Ом, 1.7 Ом, 29 Ом, 459

Ом соответственно. Чувствительность параметра ΔRe к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Re1}{\Delta L} = 0.001 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re2}{\Delta L} = 0.017 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re3}{\Delta L} = 0.29 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Re4}{\Delta L} = 4.59 \text{Ом/мкм}$.

Вывод из анализа изменений действительной части импеданса таков - при увеличении числа последовательно соединенных элементов конструкции УЗКС с коэффициентами усиления отличными от 1 усиливается взаимосвязь между действительной составляющей импеданса Re и параметром ΔL .

Вернемся к **слайду 23**. Справа представлены зависимости мнимой части импеданса Im УЗ излучателя от величины износа цилиндрического наконечника ΔL для различных вариантов сборки (количества последовательно соединенных одноступенчатых волноводных элементов) УЗКС и коэффициентов усиления K ее элементов.

Из кривых, представленных на **слайде 23** справа, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами без коэффициента усиления ($K=1$) не оказывает никакого влияния на зависимость мнимой части импеданса Im от величины износа тестового образца (кривые совпадают). Диапазон изменения мнимой части импеданса ΔIm для всех рассматриваемых вариантов составляет 27 Ом. Чувствительность параметра ΔIm к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Im}{\Delta L} = 0.27 \text{ ом/мкм} - \text{const}$.

Из кривых, представленных на **слайде 24** справа, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=1.5$ приводит к увеличению диапазона изменения мнимой составляющей импеданса ΔIm при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔIm при изменении ΔL увеличивается на 124%, 400% и 1000% соответственно, в сравнении со сборкой «Преобразователь+Нагрузка».

Диапазоны изменения ΔIm в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 26 Ом, 58 Ом, 132 Ом, 296 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔIm к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Im1}{\Delta L} = 0.262 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im2}{\Delta L} = 0.588 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im3}{\Delta L} = 1.3 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Im4}{\Delta L} = 2.96 \text{Ом/мкм}$.

Из кривых, представленных на **слайде 25** справа, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=2$ приводит к большему увеличению диапазона изменения мнимой составляющей импеданса ΔIm при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2»,

«Концентратор 3» диапазон изменения ΔI_m при изменении ΔL увеличивается на 300%, 1400% и 6000% соответственно, в сравнении со сборкой «Преобразователь+Нагрузка».

Диапазоны изменения ΔI_m в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 24 Ом, 97 Ом, 386 Ом, 1463 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔI_m к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta I_{m1}}{\Delta L} = 0.242 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta I_{m2}}{\Delta L} = 0.97 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta I_{m3}}{\Delta L} = 3.38 \text{ Ом/мкм}$, $\frac{\Delta I_{m4}}{\Delta L} = 14.6 \text{ Ом/мкм}$.

Таким образом, при увеличении числа последовательно соединенных элементов конструкции УЗКС с коэффициентами усиления отличными от 1 усиливается взаимосвязь между действительной составляющей импеданса I_m и параметром ΔL .

На **слайде 27** представлены зависимости фазы φ УЗ излучателя от величины износа цилиндрического наконечника для различных вариантов сборки УЗКС и коэффициентов усиления ее элементов.

Из кривых, представленных на рисунке **Слайде 27** следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с различными коэффициентами усиления ($K=1, 2$) не влияет на зависимость фазы φ УЗ излучателя от параметра ΔL (кривые для различного количества звеньев УЗКС с различными коэффициентами K совпадают). Тем не менее, диапазон изменения параметра $\Delta \varphi$ составляет 60 градусов, зависимость от ΔL близка к линейной. Чувствительность параметра $\Delta \varphi$ к ΔL составляет $\frac{\Delta \varphi}{\Delta L} = 0.6 \text{ градусов/мкм}$ и является константой.

Слайд 27.

Далее представлены результаты исследований, полученных на втором этапе, где мы исследовали влияния износа (в пределах 100 мкм) тестового рабочего инструмента на электрические параметры ультразвуковой пьезоэлектрической колебательной системы, состоящей из полуволнового преобразователя, объединенного с концентратором и разрушаемым инструментом

На **слайде 28** слева представлены зависимости параметров одного полуволнового УЗ преобразователя с присоединенным полуволновым наконечником, от величины его износа ΔL , для различных коэффициентов усиления полуволнового звена.

Из кривых, представленных на **слайде 28**, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена приводит к уменьшению диапазона изменения импеданса ΔZ при изменении

ΔL . При значениях $K=2, 4, 6, 8, 10$ диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL уменьшается на 11%, 37%, 49%, 62%, 66% соответственно.

Диапазоны изменения ΔZ в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 4.5 Ом, 4 Ом, 2.8 Ом, 2.3 Ом, 1.7 Ом, 1.5 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔZ к изменению ΔL с увеличением K падает и составляет $\frac{\Delta Z1}{\Delta L} = 0.09 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z2}{\Delta L} = 0.08 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z3}{\Delta L} = 0.056 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z4}{\Delta L} = 0.046 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z5}{\Delta L} = 0.034 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z6}{\Delta L} = 0.03 \text{ Ом/мкм}$.

Следует отметить, что представленные на **слайде 28** кривые имеют минимум, из чего следует, что одному и тому же значению импеданса соответствует два различных значения ΔL . В связи с этим, полученные зависимости можно использовать либо в диапазоне когда $\Delta L=0\dots 50$, либо когда $\Delta L=50\dots 100$.

Из кривых, представленных на этом же слайде (**слайд 28**) справа, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена не меняет характер зависимости действительно составляющей импеданса Re от параметра ΔL . Для всех значений K изменение ΔL не вызывает изменение действительно составляющей импеданса Re (зависимости представляют собой горизонтальные прямые).

Слайд 29.

Из кривых, представленных на **Слайде 29**, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена приводит к уменьшению диапазона изменения мнимой части импеданса Im при изменении ΔL . При значениях $K=2, 4, 6, 8, 10$ диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL уменьшается на 11%, 35%, 50%, 60%, 67% соответственно.

Диапазоны изменения ΔIm в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 27 Ом, 24 Ом, 17 Ом, 13 Ом, 10 Ом, 9 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔIm к изменению ΔL с увеличением K падает и составляет $\frac{\Delta Im1}{\Delta L} = 0.272 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im2}{\Delta L} = 0.247 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im3}{\Delta L} = 0.175 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im4}{\Delta L} = 0.134 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im5}{\Delta L} = 0.108 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im6}{\Delta L} = 0.09 \text{ Ом/мкм}$.

Из кривых, представленных на **слайде 29**, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена не меняет характер зависимости фазы φ от параметра ΔL . Для всех значений K кривые зависимости фазы φ от параметра ΔL совпадают.

Диапазон изменения $\Delta \varphi$ от ΔL не меняется и составляет 71 градус.

Чувствительность параметра $\Delta \varphi$ к изменению ΔL $\frac{\Delta \varphi}{\Delta L} = 0.7 \text{ градусов/мкм}$ и от K не зависит.

Слайд 30.

Далее представлены результаты исследований влияния изменяемого жидкостного резонансного промежутка (в пределах 100 мкм) на электрические параметры ультразвуковой колебательной системы для различных вариантов ее сборки.

Следует сразу оговорить – почему мы исследуем влияние изменений величины жидкостного промежутка, а не изменения плотности, состава, дисперсности, вязкости, скорости распространения, затухания и т.п. Как видите – реально существует множество параметров, которые необходимо контролировать. Но все они приводят к изменению условий распространения колебаний, которые, в конечном счете, можно представить в виде изменений некоего промежутка, в котором колебания формируются и распространяются.

На **Слайде 31** представлены зависимости импеданса Z УЗ излучателя от величины изменения резонансного промежутка (объема) жидкой среды ΔL для различных вариантов сборки (количества последовательно соединенных однотипных волноводных элементов) УЗКС и коэффициентов усиления K ее элементов.

Из кривых, представленных на **слайде 31**, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами без коэффициента усиления ($K=1$) не оказывает никакого влияния на зависимость импеданса Z от величины износа тестового образца (кривые совпадают).

Диапазон изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL при последовательном присоединении полуволновых элементов с $K=1$ не меняется.

Чувствительность параметра ΔZ к ΔL составляет $\frac{\Delta Z}{\Delta L} = 0.012 \text{ Ом/мкм}$ и не зависит от параметров текущей сборки.

Из кривых, представленных на **слайде 32**, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=1.5$ приводит к увеличению диапазона изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL увеличивается на 114 %, 428 % и 1300 %, соответственно, по отношению к сборке «Преобразователь+Нагрузка». Абсолютные же значения диапазона изменения ΔZ составляют 0.7 Ом, 1.5 Ом, 3.7 Ом и 10 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔZ к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Z1}{\Delta L} = 0.014 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z2}{\Delta L} = 0.03 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z3}{\Delta L} = 0.074 \text{ Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Z4}{\Delta L} = 0.2 \text{ Ом/мкм}$.

Из кривых, представленных на **слайде 33**, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми

элементами с коэффициентами усиления $K=2$ приводит к большему увеличению диапазона изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL увеличивается на 333%, 2000% и 14500 % соответственно, по отношению к сборке «Преобразователь+Нагрузка». Абсолютные же значения диапазона изменения ΔZ составляют 0.6 Ом, 2.6 Ом, 12 Ом и 88 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔZ к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Z1}{\Delta L} = 0.006 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z2}{\Delta L} = 0.026 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z3}{\Delta L} = 0.125 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Z4}{\Delta L} = 0.8 \text{Ом/мкм}$.

Следует отметить, что представленные на слайдах кривые имеют минимум, из чего следует, что одному и тому же значению импеданса соответствует два различных значения ΔL . В связи с этим, полученные зависимости можно использовать либо в диапазоне когда $\Delta L=0\dots50$, либо когда $\Delta L=50\dots100$.

На слайде 34 справа представлены зависимости действительной части импеданса $Re Y3$ излучателя от величины изменения резонансного объема жидкой среды ΔL для различных вариантов сборки (количества последовательно соединенных однотипных волноводных элементов) УЗКС и коэффициентов усиления K ее элементов.

Из полученных результатов следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами без коэффициента усиления ($K=1$) не оказывает никакого влияния на зависимость действительной части импеданса Re от величины износа тестового образца (кривые совпадают). Диапазон изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL равен 0.

Последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=1.5$ приводит к увеличению диапазона изменения действительной составляющей импеданса ΔRe при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL увеличивается на 133%, 800% и 3900 % соответственно, по отношению к сборке «Преобразователь+Нагрузка». Абсолютные же значения диапазона изменения ΔRe при изменении ΔL составляет 0.3 Ом, 0.7 Ом, 2.7 Ом и 12 Ом соответственно. Чувствительность параметра ΔRe к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Re1}{\Delta L} = 0.003 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re2}{\Delta L} = 0.007 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re3}{\Delta L} = 0.027 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Re4}{\Delta L} = 0.12 \text{Ом/мкм}$.

Показанный результат для последовательного наращивания конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=2$ приводит к максимальному увеличению диапазона изменения действительной составляющей импеданса ΔRe при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами

«Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔRe при изменении ΔL увеличивается на 1100%, 13100% и 174900% соответственно, в сравнении со сборкой «Преобразователь+нагрузка». Диапазоны изменения ΔR в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 0.1 Ом, 1.2 Ом, 13 Ом, 175 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔRe к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Re1}{\Delta L} = 0.001 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re2}{\Delta L} = 0.012 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re3}{\Delta L} = 0.132 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Re4}{\Delta L} = 1.75 \text{Ом/мкм}$.

Таким образом, при увеличении числа последовательно соединенных элементов конструкции УЗКС с коэффициентами усиления отличными от 1 усиливается взаимосвязь между действительной составляющей импеданса Re и параметром ΔL .

На этом же слайде представлены зависимости мнимой части импеданса Im УЗ излучателя от величины изменения резонансного объема жидкой среды ΔL для различных вариантов сборки (количества последовательно соединенных однотипных волноводных элементов) УЗКС и коэффициентов усиления K ее элементов.

Из кривых, представленных на слайде 34 справа, следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами без коэффициента усиления ($K=1$) не оказывает никакого влияния на зависимость мнимой части импеданса Im от величины износа тестового образца (кривые совпадают). Диапазон изменения мнимой части импеданса ΔIm для всех рассматриваемых вариантов составляет 10 Ом. Чувствительность параметра ΔIm к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Im}{\Delta L} = 0.1 \text{ ом/мкм} - \text{const}$.

Последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=1.5$ приводит к увеличению диапазона изменения мнимой составляющей импеданса ΔIm при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔIm при изменении ΔL увеличивается на 10%, 150% и 450% соответственно, в сравнении со сборкой «Преобразователь+Нагрузка». Диапазоны изменения ΔIm в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 19 Ом, 21 Ом, 48 Ом, 109 Ом соответственно. Чувствительность параметра ΔIm к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta Im1}{\Delta L} = 0.197 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im2}{\Delta L} = 0.217 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im3}{\Delta L} = 0.487 \text{Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Im4}{\Delta L} = 1.089 \text{Ом/мкм}$.

Последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с коэффициентами усиления $K=2$ приводит к большему увеличению диапазона изменения мнимой составляющей импеданса ΔIm

при изменении ΔL . При последовательном наращивании конструкции полуволновыми элементами «Концентратор 1», «Концентратор 2», «Концентратор 3» диапазон изменения ΔI_m при изменении ΔL увеличивается на 300%, 1500% и 5800% соответственно, в сравнении со сборкой «Преобразователь+Нагрузка». Диапазоны изменения ΔI_m в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 9 Ом, 36 Ом, 142 Ом, 530 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔI_m к изменению ΔL составляет $\frac{\Delta I_{m1}}{\Delta L} = 0.089 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta I_{m2}}{\Delta L} = 0.36 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta I_{m3}}{\Delta L} = 1.42 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta I_{m4}}{\Delta L} = 5.304 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$.

Таким образом при увеличении числа последовательно соединенных элементов конструкции УЗКС с коэффициентами усиления отличными от 1 усиливается взаимосвязь между действительной составляющей импеданса I_m и параметром ΔL .

На **Слайде 35** представлены зависимости фазы φ УЗ излучателя от величины изменения резонансного объема жидкой среды ΔL для различных вариантов сборки УЗКС и коэффициентов усиления ее элементов.

Из кривых, представленных на **слайде 35** следует, что последовательное наращивание конструкции УЗКС полуволновыми элементами с различными коэффициентами усиления ($K=1, 1.5, 2$) не влияет на зависимость фазы φ УЗ излучателя от параметра ΔL (кривые для различного количества звеньев УЗКС с различными коэффициентами K совпадают). Тем не менее, диапазон изменения параметра $\Delta \varphi$ составляет 30 градусов, зависимость от ΔL близка к линейной.

Чувствительность параметра $\Delta \varphi$ к ΔL составляет $\frac{\Delta \varphi}{\Delta L} = 0.3$ градусов/мкм и является константой.

Слайд 36

Далее представлены результаты исследований влияния изменяемого жидкостного резонансного промежутка (в пределах 100 мкм) на электрические параметры полуволновой ультразвуковой колебательной системы

Еще раз повторяю – почему мы исследуем влияние изменений величины жидкостного промежутка, а не изменения плотности, состава, дисперсности, вязкости, скорости распространения, затухания и т.п. Как видите – реально существует множество параметров, которые необходимо контролировать. Но все они приводят к изменению условий распространения колебаний, которые, в конечном счете, можно представить в виде изменений некоего промежутка, в котором колебания формируются и распространяются.

На **Слайде 37** представлены зависимости параметров одного полуволнового УЗ преобразователя с присоединенным полуволновым

наконечником, от величины изменения резонансного объема жидкой среды ΔL , для различных коэффициентов усиления полуволнового звена.

Из кривых, представленных на **слайде 37** справа, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена приводит к уменьшению диапазона изменения импеданса ΔZ при изменении ΔL . При значениях $K=2, 4, 6, 8, 10$ диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL уменьшается на 0%, 33%, 33%, 66%, 66% соответственно. Диапазоны изменения ΔZ в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 0.6 Ом, 0.6 Ом, 0.4 Ом, 0.4 Ом, 0.2 Ом, 0.2 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔZ к изменению ΔL с увеличением K падает и составляет $\frac{\Delta Z_1}{\Delta L} = 0.012 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z_2}{\Delta L} = 0.012 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z_3}{\Delta L} = 0.008 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z_4}{\Delta L} = 0.008 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z_5}{\Delta L} = 0.004 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z_6}{\Delta L} = 0.004 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$.

Следует отметить, что представленные кривые имеют минимум, из чего следует, что одному и тому же значению импеданса соответствует два различных значения ΔL . В связи с этим, полученные зависимости можно использовать либо в диапазоне когда $\Delta L=0 \dots 50$, либо когда $\Delta L=50 \dots 100$.

Из кривых, представленных на **слайде 37** справа, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена не меняет характер зависимости действительно составляющей импеданса Re от параметра ΔL . Для всех значений K изменение ΔL не вызывает изменение действительно составляющей импеданса Re (зависимости представляют собой горизонтальные прямые).

Слайд 38.

Из кривых, представленных на слайде справа, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена приводит к уменьшению диапазона изменения мнимой части импеданса Im при изменении ΔL . При значениях $K=2, 4, 6, 8, 10$ диапазон изменения ΔZ при изменении ΔL уменьшается на 11%, 35%, 49%, 60%, 67% соответственно. Диапазоны изменения ΔIm в абсолютных значениях составляют для рассматриваемых вариантов сборки составляют 10 Ом, 8 Ом, 6 Ом, 5 Ом, 4 Ом, 3 Ом соответственно.

Чувствительность параметра ΔIm к изменению ΔL с увеличением K падает и составляет $\frac{\Delta Im_1}{\Delta L} = 0.1 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im_2}{\Delta L} = 0.089 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im_3}{\Delta L} = 0.065 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im_4}{\Delta L} = 0.051 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im_5}{\Delta L} = 0.04 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im_6}{\Delta L} = 0.033 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$.

Из кривых, представленных на слайде 38 слева, следует, что увеличение коэффициента усиления K (от 1 до 10) единственного полуволнового звена не меняет характер зависимости фазы φ от параметра ΔL . Для всех значений K кривые зависимости фазы φ от параметра ΔL совпадают. Диапазон изменения $\Delta \varphi$ от ΔL не меняется и составляет 30

градус. Чувствительность параметра $\Delta\varphi$ к изменению ΔL
 $\frac{\Delta\varphi}{\Delta L} = 0.3$ градусов/мкм и от К не зависит.

Слайд 39.

Следующие исследования были посвящены выявлению зависимостей влияния изменяемого резонансного промежутка (в пределах 100 мкм) для определенной (фиксированной) сборки при различных площадях контакта излучающей поверхности с обрабатываемой средой.

K_p – коэффициент, определяющий площадь грибовидного излучающего элемента.

$K_p=1$ – диаметр грибовидного излучающего элемента равен меньшему диаметру D_s Концентратора 2;

$K_p=1.5$ – диаметр грибовидного излучающего элемента равен большему диаметру D_L Концентратора 2;

$K_p=1.25$ – диаметр грибовидного излучающего элемента лежит между D_s и D_L .

Слайд 40.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1$, изменение импеданса ΔZ составляет 4 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1.25$, изменение импеданса ΔZ составляет 5 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1.5$, изменение импеданса ΔZ составляет 6 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

При изменении (увеличении) площади акустического контакта со средой, т.е. для $K_p=1, 1.25, 1.5$, диапазон изменения ΔZ увеличивается на 30% и 60% соответственно, по отношению к $K_p=1$.

Однако, изменение ΔZ в абсолютных величинах составляет Омы и относительно мало.

Чувствительность действительной составляющей импеданса для различных площадей контакта со средой увеличивается и составляет $\frac{\Delta Z_1}{\Delta L} = 0.04$ Ом/мкм, $\frac{\Delta Z_2}{\Delta L} = 0.05 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Z_3}{\Delta L} = 0.06$ Ом/мкм соответственно.

Из представленных на рисунке кривых следует, что связь импеданса Z УЗ излучателя с величиной ΔL слабая, в том числе для различных значений площади контакта излучающей поверхности со средой. Кроме того, представленные кривые имеют минимум, из чего следует, что одному и тому же значению импеданса соответствует два различных значения ΔL .

Слайд 41.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1$, изменение действительной составляющей импеданса ΔRe составляет 2 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1.25$, изменение действительной составляющей импеданса ΔRe составляет 4 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1.5$, изменение действительной составляющей импеданса ΔRe составляет 5 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

При изменении (увеличении) площади акустического контакта со средой, т.е. для $K_p=1, 1.25, 1.5$, диапазон изменения ΔRe увеличивается на 50% и 100% соответственно, по отношению к $K_p=1$.

Однако, изменение ΔRe в абсолютных величинах составляет Омы и относительно мало.

Чувствительность действительной составляющей импеданса для различных площадей контакта со средой увеличивается и составляет $\frac{\Delta Re 1}{\Delta L} = 0.02$ Ом/мкм, $\frac{\Delta Re 2}{\Delta L} = 0.04$ $\frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Re 3}{\Delta L} = 0.05$ Ом/мкм соответственно.

Из представленных кривых следует, что связь действительной составляющей импеданса Re УЗ излучателя с величиной ΔL слабая, в том числе для различных значений площади контакта излучающей поверхности со средой.

Слайд 42.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1$, изменение мнимой составляющей импеданса ΔIm составляет 47 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1.25$, изменение мнимой составляющей импеданса ΔIm составляет 59 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

Для площади контакта излучающей поверхности, с коэффициентом $K_p=1.5$, изменение мнимой составляющей импеданса ΔIm составляет 72 Ом при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм.

При изменении (увеличении) площади акустического контакта со средой, т.е. для $K_p=1, 1.25, 1.5$, диапазон изменения ΔIm увеличивается на 25% и 50% соответственно, по отношению к $K_p=1$. При этом чувствительность мнимой составляющей импеданса для различных

площадей контакта со средой увеличивается и составляет $\frac{\Delta Im1}{\Delta L} = 0.47 \text{ Ом/мкм}$, $\frac{\Delta Im2}{\Delta L} = 0.59 \frac{\text{Ом}}{\text{мкм}}$, $\frac{\Delta Im3}{\Delta L} = 0.72 \text{ Ом/мкм}$ соответственно.

Из полученных результатов (**слайд 42**) следует, что чувствительность мнимой составляющей импеданса Im УЗ излучателя к изменению величины озвучиваемого резонансного водного объема ΔL , **прямо пропорциональна** площади контакта излучающей поверхности с озвучиваемой средой.

Слайд 43 иллюстрирует изменение фазы φ тока УЗ излучателя в диапазоне от -17 до 12 градусов при изменении величины озвучиваемого резонансного водного объема на $\Delta L=100$ мкм. При этом площадь контакта УЗ излучателя с озвучиваемой средой на представленную на рисунке характеристику не влияет (все кривые совпадают). Значение чувствительность фазы к зазору $\frac{\Delta \varphi}{\Delta L}=0.28$ град/мкм и не зависит от площади контакта со средой.

В заключении я хочу сказать, что выявленные и представленные зависимости являются основой для создания способов контроля различных параметров колебательных сред и технологических процессов. Полученные результаты дают основу для того, что бы выбрать нужный параметр для реализации необходимого контроля и использовать и применять этот метод контроля на практике

Спасибо за внимание.