

Лекция 6

Принципы и алгоритмы управления ультразвуковыми приборами

Уважаемые Студенты, Магистранты, Аспиранты, Коллеги!

(Слайд 1). Предлагаемое Вам сообщение (лекция) посвящено рассмотрению современного состояния проблем управления ультразвуковыми приборами. Т.е., в этой лекции, мы рассматриваем принципы и алгоритмы управления ультразвуковыми приборами (аппаратами), предназначенными для промышленного применения.

В лекции изложены подходы нашего коллектива к решению существующих проблем управления ультразвуковыми приборами при их создании и применении.

(Слайд 2). Как обычно, в начале каждой Лекции я напоминаю о том, кто я и откуда.

И так - я представляю большой научный коллектив, занимающийся разработкой и применением ультразвуковых аппаратов различного назначения для различных областей науки и техники. Работаем мы в городе Бийске Алтайского края в Российской Федерации.

Это научная школа, это лаборатория акустических процессов и аппаратов в Университете, это малые инновационные предприятия, создающие и производящие большое количество разнообразных ультразвуковых аппаратов.

Численно это небольшой, но молодой и дружный коллектив (более 20 человек), официально сформированный 24 мая 1994 года, сегодня реализующий себя как Центр ультразвуковых технологий

Объединяет коллектив ультразвук. Он создает возможности (и научные и финансовые), он объединяет и направляет. Что такое ультразвук и в чем его особенности, позволяющие решать глобальные проблемы человечества, я рассказывал в предыдущих лекциях.

Я еще раз напомню Вам о том, что эффективность ультразвуковых технологий подтверждена широчайшим применением в различных отраслях промышленности. Сегодня без применения ультразвука высокой интенсивности невозможно представить размерную обработку хрупких

материалов, соединение термопластичных материалов, получение и коагуляцию аэрозолей, добычу и переработку нефти, производство альтернативных топлив, получение и применение однослойных углеродных нанотрубок и очень многое другое.

Ультразвуковые технологии и аппараты сегодня развиваются благодаря тому, что современные производства требуют все больше ультразвуковых аппаратов для интенсификации различных технологических процессов. Одновременно растут требования к аппаратам по их эффективности и производительности.

(Слайд 3). Мы с Вами уже говорили о том, что 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 и обеспечение именно этого «ультразвукового воздействия».

Очевидно, что «ультразвуковое воздействие» необходимо создавать. Для его создания и необходим ультразвуковой технологический аппарат, основу которого составляет излучатель ультразвука и источник его питания – генератор (Слайд 4).

Но ультразвуковое воздействия нужно не просто создавать, его необходимо оптимизировать, т.е. обеспечить максимальную его эффективность (получение конечного продукта заданного качества с максимальной производительностью) при минимальных энергетических затратах.

Т.е. необходимо обеспечить такую работу ультразвукового аппарата, при которой будет обеспечиваться максимальная эффективность воздействия на любой процесс и в любых условиях.

Слайд 5 Что это значит? Для эффективной работы любого УЗ аппарата необходимо обеспечить его работу на резонансной частоте УЗ излучателя и обеспечить при этом вывод в озвучиваемую среду определенную мощность, или обеспечить определенную амплитуду механических колебаний рабочего инструмента УЗ излучателя.

Таким образом, управлять необходимо определенными параметрами, а для обеспечения такого управления основными электронными системами любого УЗ генератора должны быть:

- система управления мощностью УЗ воздействия, обеспечивающая регулирование амплитуды или интенсивности УЗ воздействия;
- система управления частотой УЗ генератора, обеспечивающая генерацию электрических колебаний, обеспечивая при этом равенство собственной частоте колебательной системы в любых условиях;
- система управления работой УЗ генератора, обеспечивающая исключение нерегламентных режимов работы и оптимальность воздействия.

Рассмотрим основные принципы управления мощностью УЗ генераторов, к которым относятся (Слайд 6):

1. Изменение напряжения питания ВЧ преобразователя УЗ генератора при помощи однофазного тиристорного регулятора.
2. Изменение напряжения питания ВЧ преобразователя УЗ генератора при помощи 3-х фазного тиристорного регулятора напряжения.
3. Изменение напряжения питания ВЧ преобразователя УЗ генератора при помощи чопперного регулятора напряжения.

Остановимся на каждом из них более подробно.

(Слайд 7): На слайде представлена схема однофазного тиристорного регулятора, предназначенного для регулирования напряжения питания ВЧ инвертора электронного УЗ генератора. Изменение напряжения питания ВЧ инвертора позволяет осуществлять регулирование мощности ультразвукового воздействия или осуществлять регулирование амплитуды УЗ воздействия. В качестве активного силового ключа используется тиристорный ключ. Индуктивный элемент ограничивает амплитуду импульсного тока, возникающего при коммутации тиристорного ключа. Для нормальной работы тиристорного регулятора используется схема синхронизации ФИ, которая формирует короткие импульсы в моменты перехода сетевого переменного напряжения через 0. Управление тиристорным ключом осуществляет управляющий микроконтроллер с соответствующим программным обеспечением. Т.е. управление тиристорным ключом «привязано» к фазе сетевого напряжения. Регулятор позволяет регулировать напряжение в диапазоне от 0 до 340 В.

(Слайд 8): На слайде 8 представлена диаграмма сетевого напряжения с выделенными зонами работы тиристорного регулятора, а так же указаны диапазоны изменения фазы управляющих импульсов, которые составляют

90...180 и 270...360 градусов. Изменение фазы отпирания тиристорного ключа в указанных диапазонах позволяет регулировать напряжение на выходе регулятора от 0 до 340 В. Следует отметить, зависимость выходного напряжения регулятора от фазы отпирания тиристорного ключа является нелинейной (рисунок 2), что обусловлено синусоидальной формой сетевого напряжения.

(Слайд 9): На слайде 9 представлены так называемые характерные временные интервалы работы тиристорного регулятора. T – период сетевого переменного напряжения. $T/2$ – период следования синхроимпульсов, φ – фаза отпирания тиристорного ключа. Из рисунка видно, что отпирание тиристорного ключа происходит на правом склоне полусинусоиды сетевого напряжения.

(Слайд 10): На слайде 10 представлен упрощенный алгоритм управления однофазным тиристорным регулятором, который реализуется в управляющем микроконтроллере в ходе выполнения соответствующей программы. Циклично осуществляется контроль появления синхроимпульса от схемы синхронизации. При появлении синхроимпульса, запускается таймер на время $T/4$, по истечении которого микроконтроллер вычисляет фазу отпирания тиристорного ключа. При вычислении фазы отпирания тиристорного ключа учитывается текущая фаза, уставка мощности, текущая мощность. После вычисления времени φ запускается таймер на время φ , по истечении которого формируется отпирающий импульс для тиристорного ключа и программа «уходит» в режим ожидания очередного синхроимпульса, далее все повторяется.

(Слайд 11): На этом слайде представлены эпюры напряжений, токов и управляющих сигналов однофазного тиристорного регулятора. Видно, что ток потребляется импульсами, частота пульсаций напряжения на выходе регулятора (при наличии нагрузки) составляет 100 Гц. Как было отмечено ранее, амплитуду импульсов потребляемого тока можно снизить, включив последовательно с тиристорным ключом индуктивный элемент. Величину пульсаций напряжения на выходе регулятора можно уменьшить, путем увеличения емкости фильтрующего элемента, что с другой стороны может привести к увеличению инерционности регулятора

(Слайд 12): Что делается, если питание генератора ультразвукового трехфазное. На слайде 12 представлена схема трехфазного тиристорного регулятора мощности. Концепция 3-х фазного регулятора подобна концепции однофазного регулятора, рассмотренного ранее. В схеме

используется 3-х фазный управляемый выпрямитель, отпирание ключей которого осуществляется в определенной последовательности с учетом фазы сетевого напряжения. Управляющий микроконтроллер с соответствующим ПО контролирует фазу сетевого напряжения и вырабатывает шесть управляющих сигналов. Индуктивность сглаживает импульсные токи, снижая тем самым импульсную нагрузку как на электрическую сеть так и элементы регулятора. Диапазон регулирования выходного напряжения составляет 0...410В

(Слайд 13): На этом слайде представлены характерные временные интервалы работы 3-х фазного тиристорного регулятора. T – период сетевого переменного напряжения. Диапазон изменения фазы управляющих импульсов φ составляет $90...180$ и $270...360$ градусов. Каждый из шести каналов управляющего контроллера периодически формирует два импульса с интервалом $T/6$. Фазовые соотношения управляющих импульсов всех каналов представлены на слайде.

(Слайд 14): На слайде 14 представлены эпюры напряжений, токов и управляющих сигналов 3-х фазного тиристорного регулятора. Частота пульсаций напряжения на нагрузке, при работе регулятора, составляет 300 Гц. Потребление тока из электрической сети так же импульсное, которое может быть снижено за счет индуктивности L .

(Слайд 15): На слайде 15 представлен упрощенный алгоритм управления 3-х фазным тиристорным регулятором, который реализуется в управляющем микроконтроллере в ходе выполнения соответствующей программы. Алгоритм управления 3-фазным регулятором схож с алгоритмом управления однофазным. Циклично осуществляется контроль появления синхроимпульса. Синхронизация управляющего микроконтроллера осуществляется по одной фазе.

При появлении синхроимпульса, запускается таймер на время $T/4$, по истечении которого микроконтроллер вычисляет фазу отпирания φ тиристорного ключа. При вычислении фазы отпирания тиристорного ключа учитывается текущая фаза, уставка мощности, текущая мощность. После вычисления времени φ запускается таймер на время φ , по истечении которого формируется серия отпирающих импульсов для тиристорных ключей по каналам СН1-СН6. Далее программа «уходит» в режим ожидания очередного синхроимпульса и все повторяется.

(Слайд 16): Следующий вариант управления мощностью. На слайде 16 представлена схема чопперного регулятора мощности. Регулятор позволяет регулировать напряжение на выходе в диапазоне 0...340В. Схема управления более простая, так как отсутствует схема синхронизации с фазой сетевого напряжения. Величина выходного напряжения зависит от скважности управляющего сигнала, причем характер зависимости близок к линейному. Достоинством данной схемы является ее быстродействие и относительно низкий уровень пульсаций на нагрузке.

(Слайд 17): На слайде 17 показаны эпюры напряжений, токов и управляющих сигналов чопперного регулятора. Частота пульсаций напряжения на нагрузке, а так же частота следования потребляемых импульсов тока составляет 50 Гц. Частота ШИМ сигнала составляет примерно 60 кГц.

(Слайд 18): На слайде 18 представлен алгоритм управления чопперным регулятором. Алгоритм является простым. Программа циклически осуществляет расчет скважности и формирование ШИМ сигнала с учетом уставки мощности, текущей мощности, текущих коэффициентов ПИД регулятора.

(Слайд 19): Далее рассмотрим основные принципы управления частотой УЗ генераторов. Поскольку большая часть УЗ излучателей является резонансными, то для их эффективной работы требуется обеспечение резонансного режима их работы, т.е. «возбуждение» на их резонансной частоте. Причем необходимо обеспечить удержание данного режима во времени при воздействии различных дестабилизирующих факторов. Наиболее эффективной является фазовая автоматическая подстройка частоты электронного генератора, в основе которой лежит следующий критерий: обеспечение равенства нулю (или определенному значению) сдвига фаз между сигналом опорного генератора $F_{ор}$ и сигналом обратной связи $F_{ос}$ (током, протекающий через пьезопреобразователь УЗ излучателя).

На слайде 20 показаны фазовые соотношения сигналов обратной связи и опорной частоты в процессе работы системы ФАПЧ. На данном слайде рассматривается ситуация, когда частота задающего генератора ниже резонансной частоты УЗ излучателя. Пока выполняется показанное на слайде соотношение сигналов, управляющий контроллер генератора должен увеличивать частоту опорного генератора. Шаг перестройки по частоте может быть либо фиксированным, либо зависеть от величины фазового рассогласования.

(Слайд 21): На слайде 21 так же показаны фазовые соотношения сигналов обратной связи и опорной частоты в процессе работы системы ФАПЧ. На данном слайде рассматривается ситуация, когда частота задающего генератора выше резонансной частоты УЗ излучателя. Пока выполняется показанное на слайде соотношение сигналов управляющий контроллер генератора должен уменьшать частоту опорного генератора. Шаг перестройки по частоте так же может быть либо фиксированным, либо зависеть от величины фазового рассогласования.

(Слайд 22): На слайде 22 так же показаны фазовые соотношения сигналов обратной связи и опорной частоты в процессе работы системы ФАПЧ для случая, когда частота задающего генератора равна резонансной частоте УЗ излучателя. В подобных случаях подстройка частоты останавливается и, считается, что реализуется резонансный режим работы УЗ излучателя. Однако такое состояние крайне нестабильно из-за наличия множества дестабилизирующих факторов, поэтому система ФАПЧ, в процессе ее работы, постоянно осуществляет перестройку частоты опорного генератора в окрестностях резонансной частоты УЗ излучателя (то вверх, то вниз по частоте).

(Слайд 23): В процессе управления частотой УЗ генератора может возникать ряд штатных ситуаций связанных с поиском резонансной частоты, перезапуском, обнаружением «срывов», удержанием резонансного режима работы УЗ излучателя. Рассмотрим далее эти вопросы подробнее

(Слайд 24): Поскольку основная часть УЗ излучателей являются высокооборотными колебательными системами с ярко выраженной резонансной частотой, возникает необходимость реализации процедуры поиска резонансной частоты подключенной УЗ колебательной системы. Рассмотрим наиболее распространенные способы поиска резонансной частоты УЗ излучателя:

По **максимальному значению** амплитудно-частотной характеристики УЗ излучателя.

По **максимуму** амплитудно-частотной характеристики УЗ излучателя

(Слайд 25): На этом слайде представлен алгоритм поиска резонансной частоты УЗ излучателя с использованием амплитудно-частотной характеристики тока, потребляемого УЗ излучателем. Из характеристики видно, что максимальное ее значение соответствует резонансной частоте УЗ излучателя. В данном случае алгоритм поиска резонансной частоты

заключается в нахождении максимального значения функции. Точность нахождения резонансной частоты определяется шагом перестройки по частоте. Однако при уменьшении шага перестройки по частоте снижается скорость нахождения резонансной частоты.

(Слайд 26): Представленная на слайде АЧХ встречается редко, чаще всего АЧХ имеет вид как показано на предыдущем слайде. Из представленной характеристики видно, что точка максимального значения на АЧХ не соответствует резонансной частоте УЗ излучателя. В таком случае нахождение резонансной частоты по максимальному значению на АЧХ не является приемлемым. Очевидно, что в таком случае необходимо искать максимум на частотной характеристике.

(Слайд 27): На слайде 27 иллюстрируется алгоритм поиска максимума на амплитудно-частотной характеристике УЗ излучателя. Поиск максимума осуществляется по 7-ми точкам «скользящим» окном. Каждый раз при перестройке на 1 шаг вверх по частоте «отбрасывается» значение X_1 , массив сдвигается на один шаг влево, записывается новое значение АЧХ в ячейку X_7 . Далее проверяется условие нахождения резонанса, представленное на слайде. Следует отметить, что на слайде представлена идеализированная АЧХ. Реальная АЧХ может иметь локальные максимумы, что может приводить к ошибочному нахождению резонанса.

(Слайд 28): Как было сказано выше, для определения резонансной частоты необходимо получить АЧХ УЗ излучателя. Возникает вопрос: «При каком напряжении возбуждения необходимо получать АЧХ?». При малых напряжениях возбуждения УЗ излучателя U АЧХ может не проявиться, при больших напряжениях возбуждения УЗ излучателя может произойти перегрузка УЗ генератора. В данном случае реализуется следующий режим получения АЧХ:

1. Делается попытка получения АЧХ при повышенном напряжении ее возбуждения.

2. Если при получении очередной выборки АЧХ фиксируется превышение некоего критического порога I_{max} , то процесс получения АЧХ прерывается, напряжение возбуждения УЗ излучателя снижается и процесс получения АЧХ повторяется.

Это происходит до тех пор, пока АЧХ не «впишется» в диапазон $0..I_{max}$ (кривая 1).

(Слайд 29): В процессе работы УЗ генератора важно быстро реагировать на «срывы» резонансного режима работы, поскольку потеря резонанса и работа в таком «нерезонансном» режиме может вывести УЗ генератор из строя. Существует несколько причин, которые могут спровоцировать «срывы» резонансного режима работы УЗ излучателя - скачкообразное изменение нагрузки, нарушения в конструкции УЗ излучателя, сбой в работе ПО и т.д.

(Слайд 30): На слайде 30 перечислены два основных критерия, которые используются для обнаружения срывов резонансного режим работы:

1. Частота задающего генератора $F < F_{min}$ или $F > F_{max}$.
2. Задающий генератор в течении определенного интервала времени перестраивает частоту либо вверх, либо вниз по частоте.

Применение любого из этих критериев позволяет определять срывы резонансного режима работы УЗ излучателя.

(Слайд 31): Еще одной особенностью перезапуска УЗ генератора, который необходим либо при срыве резонансного режим работы, либо при начальном поиске резонансной частоты является направление перестройки частоты задающего генератора при получении АЧХ. Дело в том, что при получении серии АЧХ при различных напряжениях возбуждения УЗ излучателя наблюдается их смещение вверх по частоте. В связи с этим, при возникновении срыва резонансной частоты не достаточно вернуться к частоте, на которой УЗ генератор стабильно работал, а необходимо начинать поиск частоты с отступлением вниз относительно этой частоты.

(Слайд 32): Для качественной работы систем управления мощностью УЗ генераторов, систем управления амплитудой УЗ воздействия, систем автоматической подстройки частоты важно наличие систем выделения сигналов обратной связи, которые несут информацию о режимах работы УЗ излучателя. Таким сигналом ОС является ток механической ветви УЗ излучателя, который определяется как полный ток, потребляемый УЗ излучателем за вычетом реактивного тока, протекающего по электрической емкости пьезоэлементов

(Слайд 33): На слайде 33 представлены частотные характеристики УЗ излучателя (АЧХ и ФЧХ). На левом графике представлены 1 – АЧХ тока механической ветви колебательной системы; 2 – ФЧХ тока, потребляемого от генератора; 3 – ФЧХ тока механической ветки колебательной системы;

Видно, что ФЧХ полного тока и ФЧХ тока механической ветви пересекают ось абсцисс (в окрестностях резонансной частоты) на разных частотах. Причем частота, при которой ФЧХ тока механической ветви пересекает ось абсцисс, соответствует резонансной частоте УЗКС. Т.е. для работы системы ФАПЧ необходимо ориентироваться именно на ФЧХ тока механической ветви, а не на ФЧХ полного тока, как реализовано во многих УЗ аппаратах различных производителей.

Кроме того, как видно из правого графика, на ФЧХ полного тока влияет величина акустической нагрузки, в то время как точка пересечения ФЧХ тока механической ветви оси абсцисс от нагрузки не меняется, что еще раз подтверждает необходимость использовать в качестве сигнала обратной связи ток механической ветви УЗКС.

(Слайд 34): На слайде 31 представлена простейшая электрическая схема замещения УЗ излучателя и схема выделения тока механической ветви. Механическую ветвь УЗ излучателя образует последовательно соединенная RLC цепочка. Статическая емкость преобразователя УЗ излучателя представлена емкостью C_0 . Представленная схема замещения УЗ излучателя справедлива в окрестностях его резонансной частоты. Схема выделения тока механической ветви представляет собой дифференциальный усилитель, который из полного тока УЗ излучателя вычитает емкостной ток, протекающий по элементу C_d , который выбирается равным емкости пьезоэлементов C_0 . Узел АД выделяет амплитудное значение тока механической ветви (используется системой управления мощностью УЗ генератора или системой управления амплитудой УЗКС).

Узел ТШ выделяет прямоугольный сигнал, частота и фаза которого соответствуют частоте и фазе тока механической ветви (используется системой ФАПЧ).

(Слайд 35): Величина тока механической ветви прямопропорционально связана с амплитудой механических колебаний, однако при изменении отдельных элементов конструкции УЗ излучателя эта зависимость изменяется. Например, существуют УЗ аппараты, имеющие в своем составе УЗ излучатели со сменными рабочими инструментами. Основной проблемой является то, что при смене рабочего инструмента, одному и тому же значению сигнала обратной связи (величине тока механической ветви) соответствует различная амплитуда механических колебаний рабочего инструмента. На слайде 35 показаны такие зависимости. Эту особенность необходимо учитывать, поскольку при подключении некоторых

инструментов, амплитуда механических колебаний может достигнуть критических значений, что приведет к их механической поломке.

Таким образом, подводя итоги сказанному в Лекции, следует отметить:

1. Необходимость обеспечения максимально эффективной работы ультразвуковых аппаратов (как с точки зрения обеспечения максимально эффективного воздействия, так и для обеспечения необходимых режимов работы) необходимо осуществлять непрерывное управления параметрами работы и воздействия.
2. Основное управление ультразвуковыми аппаратами связано с необходимостью обеспечения работы генератора на собственной рабочей частоте колебательной системы при любых возможных и допустимых изменениях ее частотных характеристик.
3. Обеспечение максимально эффективного воздействия на различные среды и в различных условиях невозможно без управления мощностью генератора для обеспечения требуемой амплитуды механических колебаний рабочего окончания колебательной системы.
4. Для исключения неоптимальных и нерегламентных режимов работы необходимо, на основе непрерывного контроля, исключение срывов и обеспечение перезапусков аппарата.
5. Принципы и алгоритмы управления требуют постоянного совершенствования и развития, применительно к существующим и вновь создаваемым технология УЗ воздействия.
6. Более подробно материалы, изложенные в Лекции будут в ближайшее время опубликованы в виде отдельной монографии.