

Лекция 3

Электронные генераторы ультразвуковой частоты

Уважаемые Студенты, Магистранты, Аспиранты, Коллеги!

(Слайд 1). Предлагаемое Вам сообщение (лекция) посвящено рассмотрению современного состояния электронных генераторов ультразвуковой частоты, предназначенных для создания ультразвуковых колебаний при их эксплуатации в составе аппаратов научного и промышленного применения.

В этой лекции, как и в предыдущих, изложены не только накопленные за многие годы знания, но и мой взгляд на существующие проблемы в конструкциях, проектировании и применении электронных генераторов ультразвуковой частоты (обычно называемых просто ультразвуковыми генераторами), а также мой подход к решению этих проблем.

Как и в предыдущей лекции, считаю необходимым предупредить слушателей о том, что раскрыть все особенности современных электронных генераторов ультразвуковой частоты в одной лекции невозможно, поэтому я не претендую на всеобъемлющее рассмотрение всех возможных электронных генераторов ультразвуковой частоты и на полное решение всех проблем. Но я надеюсь, что полученные знания позволят Вам ориентироваться в проблеме.

Поэтому эта лекция представляется Вам как очередная маленькая частичка вклада моего коллектива, которая позволит Вам понимать возможности применения различных электронных генераторов при решении конкретных задач, возникающих перед Вами при организации новых производств или решении проблем существующих старых технологий.

Как обычно, прежде чем приступить к сути сообщения – кратко о том: кто я и откуда.

(Слайд 2). Я научный руководитель большого коллектива. Это научная школа, это лаборатория акустических процессов и аппаратов в Алтайском государственном техническом университете, это малые инновационные предприятия, создающие и производящие большое количество разнообразных ультразвуковых аппаратов, которые можно посмотреть на наших сайтах.

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 ультразвуковые аппараты и технологии с применением ультразвука. Они создают возможности (и научные и финансовые), они объединяют и направляют нашу деятельность.

В предыдущих лекциях я говорил о промышленных аппаратах и их применении. А на последней лекции мы начали анализ составляющих этих аппаратов и рассмотрели пьезоэлектрические излучатели ультразвуковых колебаний.

Сегодня вторая основная составляющая аппаратов – электронный генератор (источникам электрической энергии ультразвуковой частоты) для питания пьезоэлектрических колебательных систем.

И так (Слайд 3).

Ультразвуковые технологии, основанные на применении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, широко применяются в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. Об этом мы говорили в рамках предыдущих лекций, и я хотел бы напомнить о широчайшем

применении ультразвуковых технологий и огромной потребности в аппаратах для реализации таких технологий.

Сегодня растущие потребности промышленного производства и потребителей обуславливают необходимость постоянного совершенствования технологических процессов, т.е. требуют непрерывного создания новых ультразвуковых аппаратов. Это требует активного развития и совершенствования всех элементов ультразвуковых технологических аппаратов, и, конечно же, источников питания ультразвуковых колебательных систем, предназначенных для создания колебаний и воздействия ими на среды и объекты.

Электронные генераторы также являются основой ультразвуковых аппаратов, поскольку они обеспечивают работу колебательных систем, только за счет энергии этих генераторов происходит формирование ультразвуковых колебаний и их введение в обрабатываемые среды.

Поэтому, второй важнейшей задачей, решаемой при создании высокоэффективного ультразвукового оборудования, является проектирование и изготовление источников питания ультразвуковых колебательных систем.

Как Вам уже известно, основными параметрами УЗ излучателя являются: резонансная частота, добротность, импеданс на резонансной частоте и предельно допустимая мощность.

Как правило, электронный генератор и УЗ излучатель являются согласованными элементами. Условиями согласованной работы УЗ генератора и излучателя являются:

- формирование генератором электрического напряжения, частота которого совпадает с резонансной частотой УЗ излучателя;
- обеспечение достаточного уровня напряжения на преобразователе УЗ излучателя;

- обеспечение электрического согласования электронного генератора с УЗ излучателем для передачи максимальной энергии.

Слайд 5. Хотелось бы напомнить, что обычно ультразвуковая колебательная системы состоит из следующих элементов:

- электромеханический преобразователь, который может быть как на основе пьезокерамики, так и на основе магнитострикционных элементов (мы этот случай не рассматриваем);

- элементов крепления;

- волноводных систем

- концентрирующих волноводов

- рабочих инструментов.

Почему мы возвращаемся к ультразвуковой колебательной системе?

По той простой причине, что она является основным элементом любого УЗ аппарата, и поскольку она же определяет все основные параметры и характеристики электронных УЗ генераторов. Т.е. фактически колебательная система является составляющим элементом электронного генератора.

Слайд 6. Электронный генератор осуществляет преобразование постоянного или переменного напряжения источника питания в синусоидальный сигнал ультразвуковой частоты и определенной амплитуды.

Казалось бы - электронный генератор ультразвуковой частоты это источник электрического сигнала определенной частоты и амплитуды.

Но поскольку на работу колебательной системы, как мы уже говорили, влияют и параметры материалов самой системы и характеристики среды и внешние воздействия (температура, давление) требования к электронным генераторам значительно шире.

Основные требования к электронным генераторам:

– наличие запаса мощности;

– наличие достаточного диапазона перестройки по частоте;

– наличие системы управления мощностью и частотой;

– наличие системы согласования его работы с подключаемым УЗ излучателем;

– наличие систем электрической и тепловой защиты;

– обеспечение синусоидальной формы генерируемого напряжения.

Исходя из необходимости обеспечения перечисленных требований, на Слайде 7 представлена структура типового электронного генератора, которая должна включать:

1 – входные силовые цепи регулятора мощности;

2 – ВЧ преобразователь;

3 - систему согласования;

4- перестраиваемый по частоте низковольтный генератор опорного сигнала;

5 - систему управления, которая может быть как ручной, так и автоматической (цифровой или аналоговой).

Далее последовательно рассмотрим различные составляющие электронного генератора (подсистемы).

Начнем с входных цепей.

Слайд 8. В качестве входных силовых цепей электронного генератора выступают схемы, обеспечивающие регулировку мощности УЗ аппарата. Это могут быть однофазные или трехфазные управляемые выпрямительные схемы – регуляторы напряжения.

Самым главным недостатком таких схем является низкий коэффициент мощности.

Самое главное достоинство простота и широкий диапазон регулировки напряжения.

В некоторых схемотехнических решениях электронных генераторов предусмотрено наличие корректора мощности (ККМ), за счет которого коэффициент мощности можно существенно улучшить (до 0.999...). На слайде так же представлены соответствующие эпюры токов и напряжений для различных схем входных силовых цепей.

Далее рассмотрим выходные цепи генератора.

Слайд 9. ВЧ преобразователь представляет собой транзисторную мостовую или полумостовую схемы. Частота управляющих сигналов лежит в ультразвуковом диапазоне и соответствует частоте УЗ излучателя. В качестве активных элементов ВЧ преобразователей могут быть использованы дискретные биполярные, полевые или IGBT транзисторы, IGBT или IPM (интеллектуальные силовые модули) модули. Мощность активных элементов, в частности, определяет мощность электронного генератора.

К выходным цепям относятся схемы согласования электронного генератора с пьезоэлектрической колебательной системой.

Слайд 10. Согласование электронного генератора с УЗ излучателем осуществляется при помощи трансформаторных схем с LC согласующим звеном. Схемы согласования могут быть как с постоянными параметрами, так и с возможностью корректировки параметров отдельных элементов (вручную или в автоматическом режиме).

Сердцем электронного генератора является низковольтный генератор, показанный на Слайде 11. Именно он предназначен для выработки электрического непрерывного (или импульсного) сигнала на частоте УЗ диапазона. Это может быть как аналоговый генератор, так и цифровой синтезатор частоты.

Основное требование к низковольтному генератору: возможность плавной перестройки частоты в определенном частотном диапазоне.

Кроме выработки электрического сигналы нужной частоты и передачи его на колебательную систему всегда существует множество проблем, обуславливающих необходимость управления параметрами генератора.

Слайд 12. Системы управления современных электронных генераторов являются автоматическими и чаще всего строятся на микроконтроллерах. Под управлением микроконтроллера согласованно работают все электронные подсистемы генератора.

Т.е. под управлением микроконтроллера работают:

- система управления мощностью;
- система контроля амплитуды колебаний УЗ излучателя;
- система управления частотой (которая обычно включает - поиск резонансной частоты УЗ излучателя, ее удержание, повторные поиски при срывах, определение механических повреждений УЗ излучателя);
- система контроля тепловых и электрических перегрузок;
- система коммуникации генератора с панелью оператора или внешними устройствами.

Управляющий микроконтроллер в сочетании с программным обеспечением (ПО) задают логику УЗ аппарата в целом.

Зачем так много различных подсистем и системы управления с большим числом разнообразных функций.

Слайд 13. Это обусловлено тем, что в процессе работы УЗ аппарата на него может воздействовать ряд дестабилизирующих факторов, которые стремятся нарушить нормальную работу УЗ аппарата. К таким факторам относятся:

- температура (обрабатываемой среды, УЗ излучателя, генератора);
- величина и характер акустической нагрузки;
- динамика изменения свойств акустической нагрузки;
- нестабильность параметров питающей сети;
- другие факторы (степень кавитации, степень износа инструмента, внешнее давление и т.п.).

Согласованная работа всех подсистем УЗ генератора направлена на компенсацию влияния (устранение влияния, учет влияния) выше перечисленных дестабилизирующих факторов.

Поэтому, при работе электронного генератора возникает необходимость постоянного изменения его электрических параметров, т.е. возникает необходимость использования систем и элементов управления.

Слайд 14. К основным системам и элементам УЗ генератора относятся:

- система контроля параметров УЗ излучателя и акустической нагрузки генератора;

- система автоматической подстройки частоты:

- система управления мощностью УЗ аппарата (в конечном счете - амплитудой колебаний излучающей поверхности рабочего инструмента в обрабатываемой среде).

Все эти три элемента, показанные на слайде оказывают взаимное влияние друг на друга. Все это зависит от того, для каких целей используется генератор.

Слайд 15. Поскольку области применения ультразвуковых генераторов могут быть самые различные все существующие УЗ аппараты можно условно разделить на три большие группы:

- УЗ аппараты, предназначенные для воздействия на газовые среды (УЗ сушка, разрушение пены, коагуляция и т.д.);

- УЗ аппараты, предназначенные для воздействия на жидкие среды (экстракция, эмульгирование, диспергирования, воздействие на расплавы металлов и т.д.);

- УЗ аппараты, предназначенные для воздействия на твердые среды (размерная обработка хрупких материалов, сварка металлов и полимеров, резка, обработка поверхностей металлов и др.).

Область применения и решаемые задачи, представленные на слайде, определяют параметры генераторов – частотные и мощностные.

Мощность УЗ генераторов лежат в диапазоне от единиц Вт до десятков кВт.

Рабочие частоты УЗ генераторов лежат в диапазоне от 18 кГц и выше.

Далее рассмотрим элементы, которые предназначены для реализации не только работоспособности электронных генераторов, но и для выполнения заданных функций.

Слайд 16. Современные электронные генераторы ультразвуковой частоты создаются с применением микроконтроллеров (например, мы

используем микроконтроллеры фирмы Atmel, STM и др.), которые в сочетании со специализированным ПО осуществляют управление всеми системами и подсистемами генератора.

Современные УЗ генераторы имеют:

- систему автоматического удержания резонансного режима работы УЗ излучателя;
- систему поиска резонансной частоты УЗ излучателя;
- систему определения «срывов» резонансного режима работы УЗ аппарата и излучателя, и последующего перезапуска;
- систему стабилизации амплитуды механических колебаний УЗ излучателя;
- систему контроля мощности;
- систему контроля параметров и характеристик УЗ излучателей;

Еще раз напомним, что в качестве электромеханического преобразователя в УЗ излучателях мы применяем только преобразователи с пьезокерамическими элементами. При использовании преобразователей магнитострикционного типа возникает необходимость иного решения поставленных задач.

Как оператор взаимодействует с электронным генератором.

Генераторы, как правило, имеют панель управления с кнопками управления и соответствующими переключателями, но могут быть интегрированы коммуникационные порты для управления работой удаленными системами управления.

Далее о некоторых особенностях реализации электронных генераторов.

Слайд 17. Ультразвуковые генераторы мощностью до 1 кВт представляют собой одноплатные конструкции (все системы блоки и узлы располагаются на одной печатной плате).

Более мощные УЗ генераторы выполняются в виде модульных конструкции (отдельно основной контроллер, регулятор мощности, ВЧ преобразователь, блок питания, согласующие элементы и т.п.).

Слайд 18. Рассмотрим более подробно некоторые типовые схемные решения, реализованные в УЗ электронных генераторах

На слайде 19 упрощенно представлена чепперная схема, которая используется в некоторых конструкциях генераторов в качестве регулятора мощности. По сути это классический чепперный регулятор напряжения, который питает ВЧ преобразователь генератора. Диапазон регулировки напряжения на выходе регулятора и соответственно мощности УЗ воздействия можно изменять в диапазоне от 0 до 100%. Управление напряжением на выходе регулятора осуществляется путем изменения скважности широтно – импульсного (ШИМ) сигнала, отпирающего ключевой элемент VT1. ШИМ модуляция может осуществляться как при помощи специализированных схем, так и при помощи универсального микроконтроллера с соответствующим ПО.

Слайд 20. На слайде представлена принципиальная схема чепперного регулятора напряжения (мощности). Силовой тракт образуют: входной мост VD3, силовой ключ VT1, индуктивность L1. Силовой ключ VT1 гальванически развязан со схемой управления при помощи оптопары V1. Управляющий ШИМ сигнал поступает от ШИМ контроллера на базу транзистора VT5. Термисторы R9, R8 исключают большие пусковые токи при первом включении регулятора в электрическую сеть. Напряжение переменной электрической сети поступает на разъем X2. Частота ШИМ сигнала фиксирована и составляет примерно 60 кГц. Коэффициент мощности такой схемы может достигать 0.8.

На слайде 21 упрощенно представлена тиристорная схема, которая используется в некоторых конструкциях генераторов в качестве регулятора мощности. По сути это классический тиристорный регулятор напряжения, который питает ВЧ преобразователь генератора. Диапазон регулировки напряжения на выходе регулятора и соответственно мощности УЗ воздействия можно изменять в диапазоне от 0 до 100%. Управление напряжением на выходе регулятора осуществляется путем изменения фазы

отпирания тиристорного ключа VS в пределах $90-180^{\circ}$ (положительная полуволна сетевого напряжения) и в пределах $270-360^{\circ}$ (отрицательная полуволна сетевого напряжения). Частота импульсов, отпирающих тиристорный ключ составляет 100 Гц. Т.е. тиристорный ключ отпирается два раза на один период сетевого напряжения. Схема синхронизации обеспечивает синхронную работу тиристорного ключа с частотой сетевого напряжения.

На Слайде 22 представлена схема электрическая принципиальная тиристорного регулятора напряжения (мощности), преобразующего переменное напряжение электрической сети в постоянное, с возможностью регулировки в диапазоне 0-340 В. Силовой тракт образуют: входной мост VD1, тиристорный ключ VS1, емкости C2 и C3 (блок A1). Силовой тиристорный ключ гальванически развязан от управляющего контроллера при помощи симмисторной оптопары V1. Поскольку тиристорный ключ должен отпираться синхронно с частотой сетевого напряжения, в составе регулятора входит схема формирования синхроимпульсов (блок A2), частота и фаза которых равна частоте и фазе сетевого напряжения. Блок A3 построен на базе микроконтроллера, который формирует отпирающие импульсы для тиристорного ключа с учетом текущей мощности, уставки мощности, состояния программного ПИД регулятора.

На слайде 23 представлен силовой тракт тиристорного регулятора напряжения (мощности) работающего в трехфазных сетях. Регулятор подобного типа используют при конструировании УЗ генераторов с мощностью более 3 кВт. Шесть тиристорных ключей так же работают синхронно с частотой питающей сети. Индуктивный элемент L1 снижает импульсную нагрузку, как на элементы силового тракта регулятора, так и на элементы питающей сети. Разрядная цепочка K1, R1 используется для разрядки емкости C1 в те моменты, когда регулятор закрыт (УЗ генерация выключена).

На слайде 24 представлена схема контроллера управления трехфазным тиристорным мостом, которая состоит из трех частей:

- А1 – блок синхронизации. Предназначен для формирования синхронизирующих импульсов для синхронной работы тиристорных ключей регулятора напряжения с частотой питающей сети. Одновременно он используется для определения последовательности подключения фаз питающей сети к разъему питания УЗ генератора (возможные варианты подключения генератора к линиям трехфазной сети ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, CBA).

Определение последовательности подключения УЗ генератора к линиям питающей сети необходимо для корректного формирования последовательности управляющих импульсов, отпирающих тиристорные ключи регулятора напряжения (мощности).

- А2 – блок микропроцессора. Осуществляет расчет фазы отпираания тиристорных ключей регулятора напряжения (мощности) и формирует импульсы управления тиристорными ключами с учетом текущей мощности УЗ генератора, уставки мощности и состояния программного ПИД регулятора.

- А3 – блок транзисторных ключей. Используется непосредственно для управления тиристорными ключами. Для гальванической развязки силового тракта регулятора и блока управления в силовом тракте регулятора используются тиристорные ключи с оптическим каналом управления.

Слайд 25. Рассмотренные выше схемы регуляторов имеют не высокий коэффициент мощности, что в некоторых случаях оказывает существенную импульсную нагрузку, как на элементы регулятора, так и на цепи питающей сети. В некоторых случаях эксплуатация таких силовых установок запрещена соответствующими нормативными актами. Для повышения коэффициента мощности УЗ генераторов (как электропотребителей), схемы некоторых генераторов дополняются, так называемыми, схемами коррекции мощности, которые могут быть как активными так и пассивными. Так, например

дополнение чепперного регулятора корректором мощности, как показано на этом слайде, повышает коэффициент мощности УЗ генератора до 0.99... Активные корректоры мощности представляют собой импульсные схемы, рабочие частоты которых не превышают 90 кГц.

На слайде 26 представлена типовая схема активного корректора мощности, предназначенного для работы с однофазной питающей сетью и чепперным регулятором напряжения (мощности). Применение корректоров мощности усложняет схему УЗ генераторов, однако обеспечивает ряд достоинств:

- высокий коэффициент мощности (около 0.999);
- силовой тракт становится не чувствительным к изменениям напряжения питающей сети в более широком диапазоне;
- величина фильтрующих конденсаторов в цепях силового тракта может быть уменьшена на порядки, что позволяет повысить быстродействие регулятора мощности УЗ генератора.

На слайде 27 представлена типовая схема ВЧ инвертора УЗ генератора. Она представляет собой транзисторный полумост с управляющим драйвером. Транзисторные ключи работают в режиме переключения, что обеспечивает высокий КПД этой части силового тракта УЗ генератора. Драйвер DA1 обеспечивает корректное управление транзисторными ключами, обеспечивая их противофазное включения, а так же формирует так называемые паузы между коммутациями транзисторных ключей, исключая возникновение сквозных токов. ВЧ инвертор может быть так же выполнен в виде мостовой схемы. Мощность используемых транзисторных ключей определяет в частности мощность УЗ генератора. ВЧ преобразователь работает на частоте, которую формирует задающий генератор. ВЧ преобразователь гальванически «развязан» от низковольтной части УЗ генератора при помощи оптопары V2, излучающая часть которой подключена к выходу опорного генератора УЗ аппарата.

На слайде 28 представлена схема согласования ВЧ инвертора УЗ генератора с электромеханическим преобразователем УЗ излучателя. Схему согласования образуют: согласующий трансформатор TR, дроссель L, емкость Сд, которая подключена параллельно к электромеханическому преобразователю УЗ излучателя. На слайде представлена АЧХ тока, потребляемого такой схемой с подключенным УЗ излучателем от электронного УЗ генератора. Из представленной АЧХ видно наличие механического резонанса F_m и электрического резонанса F_e . Механический резонанс обусловлен наличием резонансных свойств у УЗ излучателя, а электрический резонанс определяется наличием последовательного LC контура. Как правило, электрический резонанс располагается выше механического на 1.5 – 4 кГц.

Коэффициент трансформации согласующего трансформатора TR, положение электрического резонанса, относительно механического, определяются исключительно параметрами и характеристиками УЗ излучателя, а также величиной и характером акустической нагрузки. Такая схема согласования обеспечивает:

- требуемый уровень напряжения на преобразователе УЗ излучателя;
- синусоидальность напряжения на преобразователе УЗ излучателя;
- электрическое согласование УЗ излучателя с электронным генератором.

Слайд 29. Для работы таких систем УЗ генератора как система ФАПЧ и система стабилизации амплитуды необходима система формирования сигналов обратной связи. На слайде 29 представлена схема выделения двух основных сигналов:

1 - сигнал, пропорциональный амплитуде тока, протекающего по механической ветви УЗ излучателя. Этот сигнал несет информацию об амплитуде механических колебаний УЗ излучателя.

2 - прямоугольный сигнал, частота и фаза которого равны частоте и фазе синусоидального тока, протекающего по механической ветви УЗ

излучателя. Фазовый сдвиг этого сигнала относительно сигнала опорной частоты задающего генератора УЗ аппарата несет информацию о режиме работы УЗ излучателя (ниже резонансной частоты, на резонансной частоте, выше резонансной частоты).

Основу схемы составляют два токовых датчика Т3 и Т4, дифференциальный усилитель, построенный на элементе DA4 и триггер Шмидта, построенный на элементе DA7.

Особенностей реализации очень много.

Например, на слайде 30 представлена схема формирования сигнала, пропорционального потребляемой УЗ излучателем активной мощности. Данная схема используется в УЗ аппаратах, где необходимо стабилизировать мощность, потребляемую УЗ излучателем. Данная схема включается «в разрыв» между выходом электронного генератора и УЗ излучателем. Схема представляет собой четырехквadrантный аналоговый перемножитель (А2). Схема осуществляет перемножение (с учетом знаков и фазовых сдвигов) двух аналоговых сигналов, пропорциональных току и напряжению на преобразователе УЗ излучателя. Постоянная составляющая сигнала, являющегося результатом перемножения, пропорциональна потребляемой УЗ излучателем активной мощности (выделяется пиковым детектором А3). Блоки А1.1 А1.2 являются нормирующими усилителями, формирующие сигналы для перемножения. Сформированный схемой измерения сигнал поступает на аналоговый вход микроконтроллера УЗ генератора и далее может быть использован в работе УЗ аппарата.

Что касается практической реализации генераторов.

Она может быть очень различной.

На слайде 31 представлены различные варианты исполнения УЗ генераторов нашего производства.

Как правило, это металлический или пластиковый корпус с панелью управления, на которой расположены все необходимые органы управления.

Массогабаритные показатели генераторов определяются их мощностью, функциональными возможностями и назначением.

УЗ генераторы могут быть как в настольном исполнении (имеют небольшой металлический или пластиковый корпус), промышленном исполнении (размещаются в стандартных электрических шкафах), а так же могут быть интегрированы в другое производственное оборудование, производственные линии.

И в завершении лекции.

Слайд 32. Весть теоретический и практический опыт коллектива лаборатории акустических процессов и аппаратов БТИ АлтГТУ изложен в различных научных журналах, сборниках научных трудов, патентах и монографиях, одна из которых представлена на слайде.