

Разработка Малогабаритных Многофункциональных Технологических Ультразвуковых Аппаратов

Владимир Н. Хмелев, Игорь И. Савин, Роман В. Барсуков, Алексей Н. Сливин, Сергей Н. Цыганок, Евгений В. Чипурин
Бийский технологический институт

Аннотация- В статье описывается возможные области применения ультразвуковых технологий в условиях малых производств и проблемы, ограничивающие эти применения, связанные с отсутствием недорогих малогабаритных многофункциональных технологических аппаратов. Рассматриваются проблемы, возникающие при создании малогабаритных ультразвуковых технологических аппаратов и пути их решения. Описываются конструктивные и технологические решения примененные при проектировании колебательной системы и электронного генератора, направленные на повышение КПД, снижение массогабаритных характеристик, упрощение работы с аппаратом и расширение области его применения. В заключении приводятся характеристики опытных образцов ультразвуковых аппаратов, созданных с применением предложенных решений.

I. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, технологии с применением ультразвуковых колебаний высокой интенсивности нашли широкое применение в промышленности. Они позволяют интенсифицировать такие важнейшие процессы химических и пищевых технологий как экстракция, растворение, эмульгирование и т.п. Благодаря ультразвуковым колебаниям удается выполнять размерную обработку хрупких и твердых материалов (стекло, камень, керамика), осуществлять сварку термопластичных материалов, производить мойку различных изделий [1].

Для практической реализации перечисленных технологий в промышленности создаются специализированные ультразвуковые технологические установки, рассчитанные, как правило, на решение какой-то одной технологической задачи. Они обладают высокой производительностью, позволяют обрабатывать большие объемы, но имеют высокую стоимость, большие габариты, значительное энергопотребление, требуют квалифицированных специалистов для монтажа,

эксплуатации и обслуживания. Эти обстоятельства фактически делают такие установки доступными лишь для крупных предприятий. Однако ультразвуковые технологии можно эффективно применять не только в условиях крупных промышленных производств, но в условиях малых производств (например, аптечных или кондитерских), ювелирных мастерских, станциях технического обслуживания автомобилей, в сельском хозяйстве и у индивидуального потребителя.

Спектр таких применений достаточно широк: экстрагирование биологически активных веществ из растительного сырья при производстве лекарств, получение эмульсий (ароматических, лекарственных, пищевых), сверление отверстий в ювелирных и поделочных камнях, стекле, керамике и фарфоре, сварка термопластичных материалов (например заделка трещин в пластмассовых автомобильных бамперах, сварка линолеума и др.), мойка различных изделий (ювелирные изделия, форсунки, карбюраторы и клапаны автомобильных двигателей, картриджи струйных принтеров). Для решения технологических проблем индивидуальных потребителей необходимы малогабаритные многофункциональные ультразвуковые аппараты, которые отвечали бы следующим требованиям: простота эксплуатации и минимум технического обслуживания, невысокая стоимость, возможность применения одного и того же аппарата для решения различных технологических задач. Потребность в таких аппаратах постоянно растет.

Однако в настоящее время, серийных ультразвуковых аппаратов ориентированных на удовлетворение потребностей малых производств и индивидуальных потребителей нет. Это объясняется несколькими причинами: во-первых, до недавнего времени не было необходимой элементной базы для создания таких аппаратов, во-вторых, в нашей стране необходимость в таких аппаратах возникла сравнительно недавно - в середине 90-х годов с развитием малых производств. Поэтому разработка серийного малогабаритного ультразвукового аппарата в настоящее время является достаточно важной задачей.

II. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ СОВРЕМЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА

Схематично основные компоненты ультразвукового аппарата показаны на рис.1. Ультразвуковой технологический аппарат, как правило, представляет собой систему следующих блоков и элементов: собственно технологического аппарата (объема 1 с обрабатываемым материалом 2); ультразвуковой колебательной системы 3, состоящей из преобразователя 4 электрических колебаний в механические, волноводной системы 5, концентрирующей УЗ колебания и рабочего инструмента 6 для ввода УЗ колебаний в обрабатываемые среды; электронного блока, состоящего из генератора электрических колебаний ультразвуковой частоты 7 и систем контроля и автоматизации 8 [1].

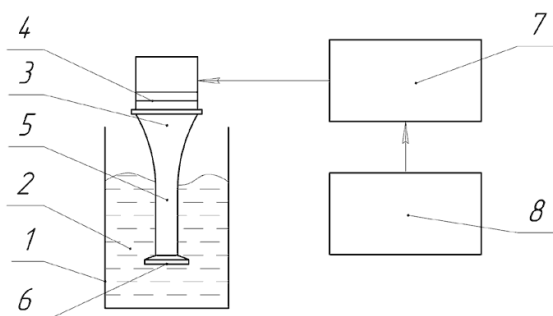


Рис.1. Функциональная схема ультразвукового технологического аппарата

Важнейшей характеристикой ультразвуковых колебательных систем является резонансная частота. Обусловлено это тем, что эффективность технологических процессов определяется амплитудой колебаний (колебательными смещениями), а максимальные значения амплитуд достигаются при возбуждении УЗ колебательной системы на резонансной частоте. Собственная резонансная частота зависит от многих параметров: геометрических размеров колебательной системы, акустических характеристик обрабатываемой среды, размеров рабочего инструмента, температуры.

Электронный блок (генератор) должен обеспечивать перестройку частоты выходных электрических колебаний в соответствии с изменением резонансной частоты ультразвуковой колебательной. Для этого применяются различные схемные решения: независимое возбуждение с ручным регулированием частоты, самовозбуждение, независимое возбуждение с автоматической подстройкой частоты. Последний способ получил наибольшее распространение, поскольку только он способен обеспечить высокую точность подстройки частоты и надежный запуск.

III. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАЛОГАБАРИТНОМУ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ АППАРАТУ

Для того чтобы сформулировать такие требования,

необходимо определить возможные сферы применения таких аппаратов. Все технологические процессы с использованием ультразвуковых колебаний можно разделить на четыре группы:

- интенсификация процессов в жидких и жидкодисперсных средах (экстракция, эмульгирование, диспергирование, растворение, смешение, дегазация, стерилизация);
- ультразвуковая размерная обработка хрупких и твердых материалов;
- интенсификация процессов на границе раздела твердых и жидких сред (пропитка пористых материалов, склеивание, лужение);
- сварка термопластичных материалов.

Эти группы технологических процессов отличаются друг от друга характером акустической нагрузки на колебательную систему ультразвукового аппарата и способом ввода ультразвуковых колебаний в обрабатываемый объект.

Интенсификация процессов в жидких и жидкодисперсных средах обусловлена процессами кавитации и акустическими течениями. Для реализации кавитационных процессов в жидкости необходимо вводить ультразвуковые колебания с интенсивностью 2...10 Вт/см² в зависимости от вязкости среды. Акустическая нагрузка в этом режиме изменяется сравнительно медленно. Ввод ультразвуковых колебаний в жидкие и жидкодисперсные среды осуществляется через поверхность большой площади.

При реализации размерной обработки твердых и хрупких материалов используется передача колебаний инструмента с ультразвуковой частотой обрабатываемому изделию через абразивные зерна. Эффект обработки твердых тел будет наибольшим в том случае, когда амплитуда колебаний равна размеру абразивных зерен [2]. Такой режим характеризуется быстрым изменением акустической нагрузки в значительных пределах. Ультразвуковые колебания вводятся с помощью инструмента, форма которого копируется в материале. Как правило, такие инструменты имеют небольшую площадь контакта с обрабатываемым объектом.

Интенсификация процессов на границе раздела сред характеризуется комплексным воздействием различных физических факторов (давление, кавитация, акустические течения). В этом режиме изменение акустической нагрузки происходит еще сильнее, чем при ультразвуковой размерной обработке.

Проведенные исследования [1],[2] показали, что все четыре группы технологических процессов можно реализовать с помощью ультразвуковых аппаратов, способных обеспечивать на поверхности рабочих инструментов интенсивность ультразвуковых колебаний в пределах 3..10 Вт/см² или амплитуду колебаний в пределах 30-70 мкм. Из этого следует, что электронные

генераторы и колебательные системы таких аппаратов будут иметь близкие характеристики. Различаться будут лишь рабочие инструменты для ввода ультразвуковых колебаний в обрабатываемый объект и алгоритм работы системы управления и автоматизации электронного генератора. Эти обстоятельства открывают возможность для создания ультразвукового малогабаритного технологического аппарата позволяющего осуществлять эффективное воздействие на все четыре группы технологических сред.

Проведенный анализ существующих технологических потребностей малых производств и индивидуальных потребителей [3] позволили установить, что в большинстве случаев необходимыми и достаточными являются следующие показатели:

- объем одновременно обрабатываемой жидкой и жидкодисперсной среды - не более 3 л;
- основной тип обрабатываемых жидких и жидкодисперсных сред - водные растворы, масляные эмульсии и суспензии;
- габаритный диаметр выполняемых отверстий при размерной обработке - 0.5 - 25 мм при скорости сверления 1 - 10 мм/мин;
- толщина свариваемых полимерных материалов - 1 - 5 мм при площади сварки от 0,1 до 2 см²;

На основании этого анализа были сформулированы требования к малогабаритному многофункциональному ультразвуковому технологическому аппарату:

- максимальная выходная акустическая мощность - 120 Вт;
- пределы регулирования выходной мощности 10%..100%, автоматическая стабилизация заданной выходной мощности;
- возможность замены рабочих инструментов;
- автоматический поиск резонансной частоты при включении генератора и автоматическое удержание частоты выходных колебаний на резонансной частоте колебательной системы при работе в любом технологическом режиме;
- высокой общий коэффициент полезного действия (не ниже 60%)
- небольшие габариты и вес аппарата

Основным элементом ультразвукового технологического аппарата является ультразвуковая колебательная система. По этой причине проектирование многофункционального ультразвукового технологического аппарата начато с конструирования и исследования малогабаритной ультразвуковой колебательной системы, способной обеспечить реализацию перечисленных требований.

IV. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Для обеспечения всех функциональных возможностей при проектировании ультразвуковой колебательной

системы применены следующие конструктивные решения.

Во-первых, крепление рабочего инструмента к волноводу осуществляется с помощью резьбового соединения. Это позволяет применять сменные рабочие инструменты различного технологического назначения, а также заменять их по мере износа.

Во-вторых, преобразователь электрических колебаний в механические выполняется на базе пьезоэлементов, которые имеют значительно больший КПД по сравнению с магнитострикторами, не требуют жидкостного охлаждения, более компактны.

В-третьих, применяемые пьезоэлектрические материалы обладают высокими электромеханическими характеристиками, что позволяет получить высокую амплитуду механических колебаний при небольших питающих напряжениях.

Более подробно эти конструктивные решения описаны в ранее опубликованных работах [1],[5].

Разработанная колебательная система выполнена по полуволновой схеме и конструктивно объединяет пьезоэлектрический, совмещенный со ступенчато-экспоненциальным концентратором. Выбранные соотношения диаметров пьезоэлементов и диаметра выходного участка концентратора, а также выбор положения пьезоэлементов позволили обеспечить коэффициент усиления 15..17, электромеханический коэффициент полезного действия не менее 0.75 [7].

Примененные конструктивные решения позволили создать малогабаритную ультразвуковую колебательную систему, обладающую следующими характеристиками:

ТАБЛИЦА 1
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Резонансная частота	22 ± 1,65 кГц
Максимальная допустимая акустическая мощность	200 Вт
Габаритные размеры	150x70 мм
Масса	Не более 0,6 кг

Внешний вид колебательной системы показан на рис.2.



Рис.2. Фотография колебательной системы малогабаритного ультразвукового технологического аппарата

V. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В настоящее время электронные генераторы ультразвуковых технологических аппаратов имеют выходные каскады, выполненные на полупроводниковых элементах (как правило - транзисторах). При этом используются два различных режима работы выходных каскадов: активный и ключевой.

При использовании каскадов, работающих в активном режиме частоту и амплитуду колебаний на выходе генератора можно изменять в широких пределах, однако такой режим связан с большим рассеиванием мощности транзисторами. В этом режиме теоретически достижимый КПД генератора не превышает 75%, но практически удается достигнуть всего 50-60%. При этом общий КПД аппарата (с учетом КПД колебательной системы) не превышает 35-40%. Это приводит к необходимости применения радиаторов большой площади (и, соответственно, большого веса) для охлаждения транзисторов, ухудшается общий тепловой режим аппарата, увеличивается его вес и габариты, потребляемая мощность.

Когда выходные каскады работают в ключевом режиме, потери энергии на транзисторах минимальны и КПД превышает 90%, однако, при этом выходные электрические колебания имеют прямоугольную форму. Питание таким напряжением пьезоэлектрических элементов колебательной системы приведет к большим энергетическим потерям на высших гармониках и сведет на нет все преимущества ключевого режима. Поэтому между выходными каскадами и колебательной системой включают согласующий LC-фильтр, подавляющий высшие гармоники. В качестве фильтра используется электрический колебательный контур.

Схема выходных цепей генератора с ключевыми выходными каскадами представлена на рис. 3.

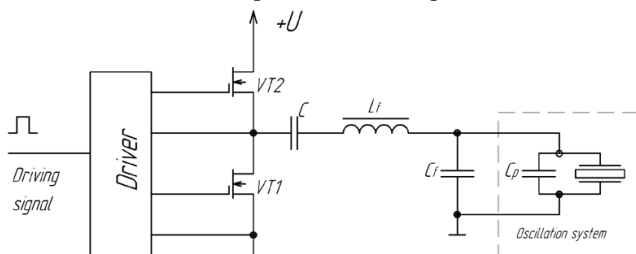


Рис.3. Упрощенная схема выходных цепей электронного генератора

Выходные транзисторы VT1 и VT2 включены в соответствии с полумостовой схемой, конденсатор C - разделительный по постоянному току, Lf и Cf - соответственно дроссель и конденсатор выходного фильтра, Cp - собственная емкость пьезопреобразователя.

Общая колебательная добротность системы фильтр - колебательная система зависит от соотношения их резонансных частот. Максимальная добротность достигается при равенстве этих частот, однако, работа в

таком режиме невозможна, так как эти частоты в процессе работы изменяются независимо друг от друга. Поэтому, резонансную частоту фильтра обычно выбирают на 5-10 кГц выше резонансной частоты колебательной системы. При таком соотношении изменение частот в небольших пределах не приводит к существенному изменению добротности, однако, при значительных изменениях частоты (2-4 кГц) добротность может изменяться в несколько раз. Кроме того, на общую колебательную добротность влияет и собственная добротность колебательной системы, которая может значительно изменяться при замене рабочего инструмента и изменении акустической нагрузки. Необходимо учитывать и то, что в результате прогрева пьезоэлементов емкость их увеличивается и частота резонанса колебательного контура снижается. Эти обстоятельства создают определенные трудности при использовании таких генераторов в multifunctional аппаратах.

Для устранения причин снижения эффективности генераторов, в их конструкции были применены следующие решения:

- выходное напряжение на выходе генератора регулируется в широких пределах изменением напряжения питания выходных каскадов;
- генератор имеет значительный запас по амплитуде выходного напряжения, что позволяет поддерживать необходимую амплитуду колебаний при падении добротности;
- генератор имеет защиту выходных каскадов от больших токов, при резком увеличении колебательной добротности.

Вторая причина, ограничивающая функциональные возможности ультразвукового аппарата - сложность обеспечения устойчивой работы системы автоматической подстройки частоты в условиях значительного изменения резонансной частоты и добротности колебательной системы. Для устранения этой причины были применены новые технические решения, описанные в ранее опубликованных работах [4],[5].

Кроме необходимости устранения перечисленных проблем необходимо также обеспечить повышение КПД генератора, ограниченного следующими факторами:

- наличием проходного сопротивления транзистора в открытом состоянии;
- потерями энергии в момент переключения транзисторов, когда они некоторое время работают в активном режиме;
- потерями за счет сквозных токов через транзисторы в момент переключения;
- потерями в элементах выходного фильтра;

Новые схемные решения, основывающиеся на применении MOSFET - транзисторов и специализированных микросхем управления ими (драйверов) позволили практически устранить первые три причины потерь энергии, поскольку транзисторы

MOSFET имеют очень малое сопротивление канала во включенном состоянии (порядка 0.1 - 0.2 Ом), малое время переключения. Такие конструктивные решения позволили уменьшить потери энергии на транзисторах до 3-5 Вт при выходной мощности 150 Вт. Это позволило использовать радиаторы небольшой площади, что благоприятно отразилось на массогабаритных характеристиках генератора.

Потери на элементах выходного фильтра могут быть обусловлены такими причинами, как:

- потери при перемагничивании сердечника дросселя;
- потери на омическом сопротивлении обмотки дросселя;
- диэлектрические потери в конденсаторах;

Для решения этих проблем были применены специальные конденсаторы с малыми диэлектрическими потерями и максимальным напряжением 10 кВ а также ферритовые сердечники из магнитомягких материалов с воздушным зазором.

Широкое применение систем автоматизации позволило упростить работу с ультразвуковым аппаратом и свести до минимума эксплуатационные регулировки.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененные схемные и конструктивные решения позволили разработать и изготовить опытные образцы малогабаритных многофункциональных аппаратов, решающих такие технологические задачи, как обработка жидких и жидкодисперсных сред, размерную обработку хрупких и твердых материалов, сварку термопластичных материалов. Технические характеристики созданных аппаратов представлены в таблице:

ТАБЛИЦА 2
ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗДАНЫХ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Объем одновременно обрабатываемой жидкости, л	0.5-3
Мощность акустического излучения, вводимого в жидкость, Вт	до 150
Габаритный диаметр отверстий, выполняемых в твердых материалах, мм	0.5 – 25
Производительность сверления стекла при диаметре отверстия 10 мм/мин	до 10
Амплитуда колебаний на торце рабочего инструмента при сверлении, мкм	30-70
Мощность, потребляемая от сети, ВА, не более	200
Габаритные размеры электронного блока, мм	230x200x80
Масса электронного блока, кг, не более	3
Габаритные размеры колебательной системы, мм	150x70
Масса колебательной системы, кг, не более	0.6
Гарантированное время непрерывной	2

работы, ч	
с последующим перерывом, мин	15

На рис.4 и рис.5 представлены фотографии опытных образцов малогабаритных многофункциональных ультразвуковых аппаратов.



Рис.4. Ультразвуковой фитомиксер «Алена»



Рис.5. Многофункциональный ультразвуковой аппарат «МУЗА»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хмелев В.Н., Попова О.В. " Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве", научная монография, Алт. гос. Техн. Ун-т. им. И.И. Ползунова. - Барнаул: изд. АлтГТУ, 1997. - 160 с.
- [2] Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. "Размерная обработка хрупких и твердых материалов". Барнаул: АлтГТУ, 1999.
- [3] Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н. "Развитие ультразвуковых технологий, разработка и исследование многофункциональных и специализированных ультразвуковых аппаратов". "Ползуновский альманах" №3/2000, издательство Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 2000 г., стр.193-200.
- [4] Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Шалунов А.В. "Способ повышения качества работы ФАПЧ ультразвуковых технологических аппаратов" Межвузовский сборник "Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях". - Бийск: АлтГТУ, 2002.
- [5] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Tchyganok S.N., Slivin A.N. "System of Phase-Locked-Loop Frequency Control of Ultrasonic Generators". Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2001, p. 56-57.
- [6] Хмелёв В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н. "Высокоэффективная компактная колебательная система для ультразвуковых технологических аппаратов".

Межвузовский сборник "Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях". - Бийск: АлтГТУ, 2000.
[7] Патент РФ №2141386.