

# Разработка Способа и Устройств Управления Работой Многофункционального Ультразвукового Технологического Аппарата

В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, А.Н. Лебедев  
Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический универси-  
тет им. И.И. Ползунова»

**В статье приведены результаты исследований, направленные на поиск пути согласования электронного генератора с резонансной пьезоэлектрической колебательной системой, осуществляющей ультразвуковое воздействие на различные технологические среды с изменяющимися физико-химическими параметрами. Результатом исследований является новый способ оптимального согласования и его практическая реализация.**

## ВВЕДЕНИЕ

Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности является эффективным способом осуществления, интенсификации и стимуляции различных физических и химических процессов в технологиях промышленных производств, научных исследованиях и медицине.

Для осуществления ультразвукового воздействия высокой интенсивности на различные среды и материалы используются специализированные устройства – ультразвуковые технологические аппараты (УЗТА), осуществляющие преобразование энергии электрической сети в энергию акустических колебаний и их ввод в обрабатываемую среду или материал. Конструкции ультразвуковых технологических аппаратов в зависимости от их назначения могут существенно отличаться, но, при этом, любой ультразвуковой технологический аппарат содержит электронный генератор, осуществляющий преобразование энергии электрической сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты, и ультразвуковую колебательную систему, осуществляющую преобразование электрических колебаний в упругие механические, их трансформацию и ввод в обрабатываемую среду (материал) [1].

До недавнего времени ультразвуковая аппаратура развивалась по экстенсивному пути – необходимый уровень ультразвукового воздействия достигался за счет простого «масштабирования» ультразвуковых установок. Как следствие, к.п.д. ультразвуковых установок не превышал 10-15%, ультразвуковые установки были узкоспециализированными, требовали постоянной регулировки и настройки. Уровень их автоматизации был крайне низок, для поддержания необходимого режима ультразвукового воздей-

ствия требовалась постоянная регулировка выходных параметров вручную.

Современным требованиям такие установки уже не отвечают, и поэтому постоянно ведутся работы по развитию и совершенствованию УЗТА. Развитие идет по следующим основным путям: повышение к.п.д. преобразования энергии, расширение функциональной применимости, повышение степени автоматизации, снижение массогабаритных характеристик и стоимости.

Наиболее существенные результаты были обеспечены за счет применения в электронных генераторах выходных каскадов на МДП-транзисторах, работающих в режиме переключения, применения микропроцессорных систем автоматизации и пьезоэлектрических колебательных систем. Общим итогом явилось достижение к.п.д. преобразования энергии генераторами 95% и выше, колебательными системами – до 80%. Микропроцессорные системы управления позволили обеспечить автоматическое поддержание оптимального режима ультразвукового воздействия на различные среды и материалы, и полностью автоматизировать процесс управления ультразвуковым технологическим аппаратом [2].

В настоящее время достаточно четко намечилось новое направление развитие ультразвуковой техники - малогабаритные многофункциональные ультразвуковые технологические аппараты, способные осуществлять различные технологические операции (обработку жидких и жидкодисперсных сред, мойку различных изделий, размерную обработку твердых материалов, ультразвуковую сварку и др.) [3]. Спрос на многофункциональные ультразвуковые технологические аппараты обусловлен развитием малых, но в тоже время гибких промышленных производств, а также общими тенденциями на рынке электронной техники.

В последние годы был разработан ряд многофункциональных УЗТА (или «ультразвуковых процессоров»). Однако в большинстве случаев эти устройства копируют конструкцию узкоспециализированных УЗТА и отличаются лишь большим набором сменных излучателей и рабочих инструментов, несколько усовершенствованными алгоритмами работы систем автоматизации.

Такой подход не учитывает того, что максимальная эффективность работы электронных генераторов и колебательных систем достижима только при условии их согласования друг с другом и с обрабатываемой средой. В многофункциональных ультразвуковых аппаратах условия согласования изменяются в широких пределах за счет изменения параметров обрабатываемых сред, колебательных систем и электронных генераторов.

Проблему акустического согласования ультразвуковой колебательной системы с обрабатываемой средой (материалом) в условиях изменения параметров обрабатываемых решают автоматической подстройки выходной частоты генератора в соответствии со всеми возможными изменениями частоты колебательной системы.

При этом не решается проблема электрического согласования электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы. Электронные генераторы, транзисторы которых работают в режиме переключения, особенно чувствительны к режиму согласования с нагрузкой – даже при незначительном рассогласовании их к.п.д. существенно падает, а уровень создаваемых ими электромагнитных помех возрастает. Кроме того, работа на несогласованную нагрузку может стать причиной выхода из строя силовых транзисторов.

Электрическое согласование обеспечивается включением между выходом электронного генератора и пьезоэлектрическим преобразователем ультразвуковой колебательной системы специальных устройств, представляющих собой цепи реактивных элементов. Задачи этих элементов: во-первых, режекция высших гармоник выходного прямоугольного напряжения генератора, а во-вторых, приведение комплексного сопротивления нагрузки генератора к чисто активной величине на частоте первой гармоники. При этом параметры реактивных элементов устройства согласования должны изменяться при наличии изменений параметров обрабатываемых сред и УЗКС – только так можно обеспечить оптимальное электрическое согласование в различных режимах работы аппарата. Однако, практических решений по созданию согласующих устройств с изменяемыми в процессе работы аппарата параметрами реактивных элементов на сегодняшний день нет.

Поэтому, разработчикам многофункциональных аппаратов, приходится использовать неуправляемые в процессе работы согласующие устройства, прибегая к ряду компромиссных решений. В одном случае сознательно снижают эффективность электрического согласования во всех режимах работы аппарата, за счет чего обеспечивают более или менее равные характеристики во всем диапазоне функциональных применений. Во втором случае обеспечивают наилучшее согласование в одном из режимов работы, мирясь с существенным ухудшением характеристик в других режимах. В итоге, и в том и в другом случае к.п.д. и выходная мощность оказываются существенно ниже, чем в специализированных аппаратах, построенных на той же элементной базе. В тоже время, кроме неопти-

мальности согласования, других препятствий для повышения эффективности многофункциональных УЗТА нет, так как сами по себе генераторы и колебательные системы могут вполне эффективно работать в широком диапазоне нагрузок, частот, температур и других факторов.

В связи с этим, на сегодняшний день актуальна проблема создания способа управления работой ультразвукового аппарата, обеспечивающего автоматическое установление оптимального режима согласования при включении аппарата в работу и автоматическое поддержание оптимального режима согласования в процессе работы аппарата (в дальнейшем – *способ управления*) и разработки устройств, реализующих такой способ.

Основная трудность разработки заключается в учете некоторых особенностей ультразвуковых колебательных систем, электронных генераторов и устройств их согласования, которые будут рассмотрены далее.

#### ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КАК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Эквивалентная схема замещения пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы как электрической нагрузки при работе на частотах, близких к частоте механического резонанса, представлена на рисунке 1.

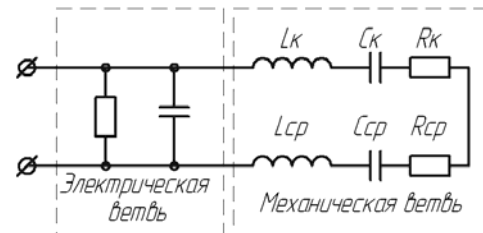


Рисунок 1. Эквивалентная схема замещения ультразвуковой колебательной системы

Здесь  $C_\epsilon$  и  $R_d$  – чисто электрические величины, являющиеся собственной емкостью пьезоэлектрического преобразователя и сопротивлением диэлектрических потерь соответственно, и образуют так называемую «электрическую ветвь». Элементы  $L_k$ ,  $C_k$ ,  $R_k$ ,  $L_{ср}$ ,  $C_{ср}$ ,  $R_{ср}$  – есть электрические аналогии механических величин и образуют так называемую «механическую ветвь». Индуктивность  $L_k$  – эквивалентна колеблющейся массе ультразвуковой колебательной системы,  $C_k$  – ее гибкости,  $R_k$  – сопротивлению, обусловленному внутренним трением в материале. Элементы  $L_{ср}$ ,  $C_{ср}$ ,  $R_{ср}$  относятся к обрабатываемой среде.  $L_{ср}$  – эквивалентная масса обрабатываемой среды, присоединенной к излучателю,  $C_{ср}$  – эквивалентная гибкость среды,  $R_{ср}$  – сопротивление, учитывающее потерю энергии на излучение колебаний в среду, вязкое трение среды и поддержание резонанса в ультразвуковой колебательной системе как электрической нагрузки используют следующие основные параметры: частота механического резонанса  $f$ , добротность  $Q$ , активное сопротивление «механической ветви»  $R_m$ , собственная электрическая емкость

пьезоэлектрического преобразователя  $C_3$ .

Отличительная особенность ультразвуковой колебательной системы заключается в том, что ее входные электрические характеристики не являются постоянными и подвержены существенным изменениям при изменении параметров обрабатываемых сред (волновое сопротивление, вязкость, кавитационный процесс) в процессе осуществления ультразвукового воздействия, замены излучателя, изменения температуры пьезоэлектрического преобразователя и других факторов.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить что, входное сопротивление может изменяться в диапазоне 300-3000 Ом, резонансная частота – в пределах  $\pm 20\%$  от номинального значения, а электрическая емкость пьезопреобразователя в 1,5 – 2 раза.

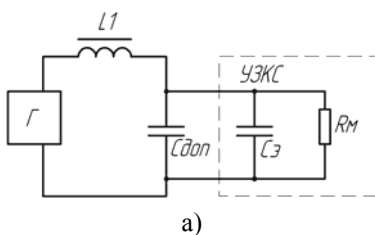
#### ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВ СОГЛАСОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Как уже было отмечено, выше, устройство согласования выполняет две основные функции: режекцию высших гармоник выходного напряжения генератора и приведение комплексного сопротивления нагрузки на частоте первой гармонике к чисто активной величине.

Режекция позволяет обеспечить работу УЗКС и выходного каскада при синусоидальных токах и исключить дополнительные потери энергии на высших гармониках (без режекции высших гармоник к.п.д. падает до 40%-50% [ 1]).

Приведение комплексного сопротивления нагрузки к чисто активной величине позволяет обеспечить режим переключения транзисторов выходного каскада при нулевом токе (режим ПНТ).

Режим переключения при нулевом токе характеризуется наименьшими потерями энергии на внутреннем сопротивлении транзисторов, минимальным уровнем электромагнитных помех и опасных выбросов напряжения на паразитных емкостях и индуктивностях монтажа, способных вызвать выход транзисторов из строя.



а)

ненных схемы построения устройств согласования электронных генераторов и пьезоэлектрических колебательных систем.

Здесь УЗКС представлена параллельно включенными активным сопротивлением «механической ветви»  $R_m$  и емкостью «электрической ветви»  $C_3$ .

Для обеспечения температурной стабилизации, получения необходимых параметров согласующего устройства и работы некоторых типов систем АПЧ параллельной входу ультразвуковой колебательной системы включают дополнительный конденсатор ( $C_{дон}$ ), емкость которого в сумме с емкостью «электрической ветви» образует общую емкость  $C_2$ .

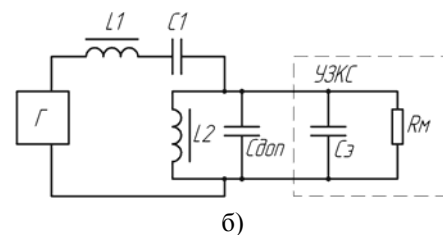
В схеме, показанной на рисунке 2а (в дальнейшем – устройство *первого типа*) режекция высших гармоник и компенсация емкостного сопротивления «электрической ветви» осуществляется одной и той же группой реактивных элементов  $L_1 - C_2$ , образующих однозвенный электрический фильтр.

Работа в режиме ПНТ обеспечивается при  $L_1 = (R_M^2 C_2) / (1 + 4\pi^2 f^2 R_M^2 C_2^2)$ , где  $f$  – частота механического резонанса УЗКС. При этом согласующее устройство обладает коэффициентом передачи напряжения  $K_H = \sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 R_M^2 C_2^2} > 1$ , что является несомненным достоинством при использовании УЗКС с высоким сопротивлением «механической ветви» (1500 Ом и более).

В схеме, показанной на рисунке 2б (в дальнейшем – устройство *второго типа*) режекция высших гармоник осуществляется электрическим фильтром, включающим в себя индуктивный элемент (дроссель)  $L_1$  и конденсатор  $C_1$ . Компенсация реактивного сопротивления эквивалентной емкости  $C_2$  осуществляется индуктивным элементом (дросселем)  $L_2$ , включенного параллельно входу ультразвуковой колебательной системы.

Элементы  $L_1 - C_1$  образуют последовательный колебательный контур, а элементы  $L_2 - C_2$  – параллельный колебательный контур.

Работа в режиме ПНТ обеспечивается в случае, когда



б)

Рисунок 2. Две наиболее распространенные схемы построения устройств электрического согласования в электронных генераторах и ультразвуковых колебательных системах

Так как при работе УЗКС в условиях механического резонанса сопротивление ее «механической ветви» чисто активное, обеспечение работы в режиме ПНТ сводится только к компенсации емкостного сопротивления «электрической ветви».

На рисунке 2 представлены две наиболее распростра-

$f = f_1 = f_2$ , где  $f_1 = 1/(2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1})$ ,  $f_2 = 1/(2\pi\sqrt{L_2 \cdot C_2})$  - резонансные частоты последовательного и параллельного колебательных контуров соответственно. Коэффициент передачи напряжения согласующим устройством в этом случае равен единице.



ент усиления нормирующего усилителя НУ, до тех пор, пока амплитуда сигнала  $I_m$  не станет менее 2% от амплитуды сигнала  $I_3$ , что достигается при выполнении условия  $C_2 K = C_3$ , где  $K$  – коэффициент усиления нормирующего усилителя. Из этого условия вычисляется начальное значение емкости пьезоэлектрического преобразователя.

Блок управления измеряет начальное значение температуры пьезоэлектрического преобразователя (сигнал TR), запоминает его и переходит к реализации алгоритма поиска начального значения частоты механического резонанса.

Производится выключение источника питания выходного каскада (сигналом VS), устанавливается минимальное значение выходной частоты генератора (сигналом FS), производится плавное увеличение напряжения питания выходного каскада (сигналом VS) до 30% от максимального значения. После этого блок управления начинает плавно увеличивать выходную частоту (сигналом FS) одновременно рассчитывая и устанавливая значения индуктивностей дросселей ДР1 и ДР2 исходя из условий  $L_1 = 1/(4\pi^2 f^2 C_1)$  и  $L_2 = 1/(4\pi^2 f^2 (C_2 + C_3))$ , соответственно и контролируя фазовые соотношения сигналов U2 и  $I_m$ .

Рассмотрим процесс формирования сигнала  $I_m$ . Входной комплексный ток колебательной системы складывается из тока через «механическую ветвь»  $I_{mm} = U_B / Z_M$ , где  $U_B$  – напряжение питания УЗКС (узел Б на рисунке 3),  $Z_M$  – комплексное сопротивление «механической ветви» и тока через электрическую ветвь  $I_{эв} = jU_B \cdot 2\pi f C_3$ . При равенстве коэффициентов преобразования шунтов Ш2 и Ш3 комплексное напряжение сигнала  $I_m$  определяется как  $I_m = M \cdot U_B (1/Z_M + j2\pi f (C_3 - KC_2))$ . При выполнении условия  $C_2 K = C_3$  напряжение сигнала  $I_m$  определяется только током «механической ветви» УЗКС.

Таким образом, когда выходная частота генератора совпадает с частотой механического резонанса УЗКС фазы сигналов U2 и  $I_m$  становятся равными. При выполнении этого условия блок управления завершает режим первоначальной настройки и переходит к реализации алгоритмов управления ультразвуковым технологическим аппаратом в основном режиме работы.

Если в процессе выполнения действий по изменению собственной электрической емкости пьезопреобразователя или поиска резонансной частоты амплитудные значения напряжений и токов хотя бы на одном из участков выходной цепи превышают максимально допустимые значения, производится немедленное отключение выходного напряжения источника питания в целях предотвращения выхода из строя ультразвукового технологического аппарата.

В основном режиме работы блок управления обеспечивает оптимизацию акустического согласования ультразву-

ковой колебательной системы и обрабатываемой среды, электрическое согласование выходного каскада и пьезоэлектрического преобразователя, а также поддерживает заданное значение выходной мощности, для чего организуются пять контуров управления.

Первый контур управления выполняет автоматическую подстройку частоты генератора, для чего непрерывно контролирует разность фаз сигналов U2 и  $I_m$  и минимизирует ее за счет изменения выходной частоты генератора сигналом FS, обеспечивая тем самым работу ультразвуковой колебательной системы в режиме механического резонанса и ее акустическое согласование с обрабатываемой средой. Если в работе первого контура управления происходит сбой, блок управления заново повторяет выполнения операций первоначальной настройки.

Второй контур управления поддерживает заданное значение выходной мощности, для чего непрерывно контролирует произведение амплитудных значений сигналов U2 и  $I_m$ , и обеспечивает его равным заданной уставке за счет регулировки напряжения питания выходного каскада сигналом VS.

Третий контур управления обеспечивает работу транзисторов выходного каскада в режиме переключения при нулевом токе, для чего, непрерывно контролирует разность фаз сигналов U1 и I1 и минимизирует ее, за счет регулировки значения индуктивности дросселя ДР1 сигналом L1.

Четвертый контур управления регулирует индуктивность дросселя ДР2. Алгоритм работы четвертого контура управления зависит от сопротивления «механической ветви» УЗКС. Если последнее таково, что необходимое значение выходной мощности достигается при единичном коэффициенте передачи напряжения согласующим устройством, контур управления контролирует разность фаз сигналов U2 и I1 и минимизирует ее за счет регулировки значения индуктивности дросселя ДР2. Если сопротивление «механической ветви» велико, и заданное значение выходной мощности при единичном коэффициенте передачи напряжения не может быть обеспечено даже при максимальном выходном напряжении генератора, контур управления увеличивает коэффициент передачи напряжения согласующего устройства, уменьшая индуктивность дросселя ДР2 до тех пор, пока не будет достигнута заданная выходная мощность или минимально допустимое значение индуктивности.

Пятый контур управления непрерывно контролирует значение температуры пьезоэлектрического преобразователя ультразвуковой колебательной системы, на ее основании рассчитывает текущее значение его электрической емкости и сигналом KS устанавливают коэффициент усиления нормирующего усилителя НУ исходя из условия  $K = C_3 / C_2$ , что позволяет обеспечить наиболее точную работу других контуров управления.

Если в процессе работы амплитудные значения напряжений и токов хотя бы на одном из участков выходной

цепи превышают максимально допустимые значения, производится немедленное отключение выходного напряжения источника питания в целях предотвращения выхода из строя ультразвукового технологического аппарата.

Для исследования принципиальных возможностей предложенного способа управления был создан реализующий его опытный образец ультразвукового технологического аппарата.

Конструкция примененных в опытном образце дросселей показана на рисунке 5.

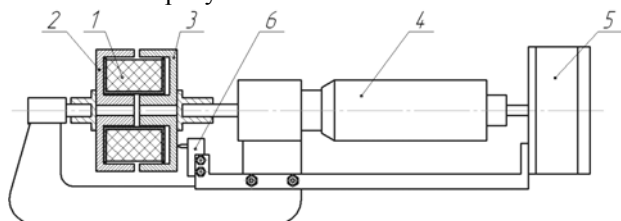


Рисунок 5. Конструкция макетных образцов регулируемых дросселей

Созданная конструкция состоит из, собственно, дросселя и устройства регулирования зазора. Сам дроссель выполнен по общеизвестной схеме, где обмотка 1 размещается внутри сердечника, образованного двумя ферритовыми чашками 2 и 3. Величина воздушного зазора между чашками регулируется с помощью винтового механизма, выполненного в данной работе на основе микрометра 4, винт которого связан с валом шагового двигателя 5. Концевой выключатель 6 является датчиком начала отсчета.

Управление работой шагового двигателя осуществляется однокристалльным микроконтроллером, в ПЗУ которого занесена таблица соответствия количества шагов от начала отсчета и индуктивности. Созданные дроссели имеют следующие параметры: диапазон изменения зазора 1,5 – 4,5 мм, диапазон регулирования индуктивности 3-14 мГн, допустимый ток – 5А, скорость регулирования индуктивности – до 2 мГн/с, дискретность установки значения индуктивности – не более 10 мкГн.

В связи с тем, что реализация предложенного способа управления сопряжена с выполнением ряда вычислительных операций, а также с изменяемой логикой работы, все основные функции блока управления реализованы программно, на базе трех однокристалльных микроконтроллеров – основного и двух микроконтроллеров управления дросселями. Всю логику работы в режиме первоначальной настройки реализует основной микроконтроллер (микроконтроллеры дросселей лишь осуществляют непосредственную установку заданных значений индуктивности по командам от основного микроконтроллера).

В рабочем режиме основной микроконтроллер реализует работу первого, второго, пятого и частично четвертого контура управления, микроконтроллер дросселя ДР1 полностью реализует работу третьего контура управления, а микроконтроллер дросселя ДР2 – четвертого.

Опытная эксплуатация созданного образца многофункционального ультразвукового технологического аппарата позволила выявить, что предложенный способ управления

позволяет обеспечить одинаково высокую эффективность ультразвукового воздействия на различные технологические среды при использовании различных колебательных систем со сменными рабочими инструментами. При этом к.п.д. преобразования энергии в электронном генераторе составляет 97% (при осуществлении тех же процессов, но с отключенной системой автоматической оптимизации электрического согласования, выходная мощность в среднем оказалась на 15% ниже, а в отдельных режимах снижение мощности достигало 60%, а к.п.д. снижался до 85%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил выявить пути повышения эффективности за счет создания систем автоматического согласования. Предложенный и разработанный способ согласования и его практическая реализация позволили обеспечить к.п.д. электронного генератора до 97% при любых изменениях параметров сред и колебательных систем.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Картыш. Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982.
- [2] Khmelev V.N., Savin I.I., Barsukov R.V., Slivin A.N., Tsyganok S.N., Chipurin E.V., "Development of Compact Multipurpose Ultrasonic Technological Device", Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2003. - p. 217-221.
- [3] Хмелев В.Н., Попова О.В. "Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве". Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 1997.