

В. Н. Хмелев¹, И. И. Савин²

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им И. И. Ползунова», г.Бийск, ул. Трофимова, 27

Повышение эффективности ультразвукового воздействия на обрабатываемые среды за счет оптимизации электрического согласования в ультразвуковом технологическом аппарате

Получена 16.11.2005, опубликована 28.11.2005

Статья посвящена решению проблемы повышения эффективности работы ультразвуковых технологических аппаратов за счет оптимизации электрического согласования электронных генераторов и ультразвуковых колебательных систем при всех возможных изменениях свойств обрабатываемых сред и параметров технологических процессов. В статье представлены результаты исследований по созданию нового способа автоматического установления и поддержания режима оптимального электрического согласования. Предложенный способ и его практическая реализация позволяют получить эффективное ультразвуковое воздействие при любых изменениях параметров обрабатываемых сред в ходе реализации технологических процессов.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в промышленности и медицине все более широкое распространение получают ультразвуковые методы воздействия и интенсификации различных технологических процессов.

Для осуществления воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности на обрабатываемые среды используются специальные устройства — ультразвуковые технологические аппараты (УЗТА). Ультразвуковой технологический аппарат состоит из технологического объема (или технологической оснастки), ультразвуковой колебательной системы (УЗКС), осуществляющей преобразование электрических колебаний ультразвуковой частоты в упругие механические колебания, их трансформацию и ввод в обрабатываемую среду и электронного генератора, осуществляющего преобразование энергии электрической сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты, предназначенного для питания УЗКС [1, 2].

Применение современной элементной базы и новых технических решений позволили существенно улучшить технические и эксплуатационные характеристики ультразвуковых технологических аппаратов. В тоже время опыт разработки и

¹ e-mail: vnh@bti.secna.ru

² e-mail: sii@bti.secna.ru

эксплуатации ультразвуковой техники показывает, что эффективность работы УЗТА оказывается существенно ниже их потенциальной возможности, особенно в случае обработки сред с широким диапазоном изменения параметров.

В связи с этим возникла необходимость в выявлении причин снижения эффективности работы УЗТА и поиске способа устранения этих причин.

1. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Анализ литературных и патентных источников позволил установить, что значительная часть УЗТА, разрабатываемых в России и за рубежом, строится по типовой схеме — резонансная пьезоэлектрическая колебательная система волноводного типа, питаемая от транзисторного электронного генератора, работающего в ключевом режиме. Как правило, электронный генератор содержит две основные системы автоматизации: систему автоподстройки выходной частоты и систему стабилизации выходной мощности [2, 3].

Широкое применение пьезоэлектрических преобразователей при построении новых типов колебательных систем обеспечило к.п.д. электроакустического преобразования до 80% [4].

Транзисторные генераторы, работающие в ключевом режиме, так же характеризуются высоким к.п.д. — 92–97% (теоретически достижимый — почти 100%).

Очевидно, что теоретически достижимый общий к.п.д. преобразования энергии в ультразвуковом технологическом аппарате составляет примерно $100 \cdot (0,95 \cdot 0,8) = 76\%$. Но на практике это не реализуется, особенно в условиях, когда свойства обрабатываемых сред в технологическом процессе непрерывно изменяются. Очевидно, что причиной снижения общего к.п.д. ультразвуковых технологических аппаратов является неполная передача энергии от электронного генератора к УЗКС, то есть не выполняется условие оптимального акустического и электрического согласования.

Под оптимальным акустическим согласованием понимается такой режим взаимодействия ультразвуковой колебательной системы с обрабатываемой средой, при котором значение ее акустического импеданса является действительной величиной [1, 4, 5]. Очевидно, что для выполнения условия акустического согласования ультразвуковой колебательной системы с обрабатываемой средой достаточно обеспечить равенство частоты ее механического резонанса и частоты питающего напряжения.

Под электрическим согласованием электронного генератора (работающего в ключевом режиме) и ультразвуковой колебательной системы понимается такой режим их взаимодействия, при котором выполняются следующие условия [2, 6, 7]:

1. Ток, протекающий через ультразвуковую колебательную систему, является гармоническим,
2. Переключение выходных транзисторов генератора происходит при нулевом токе,
3. Коэффициент мощности нагрузки генератора равен единице.

Выполнение перечисленных условий позволяет передавать энергию от электронного генератора к УЗКС с наименьшими потерями. Как известно, пьезоэлектрическая колебательная система при непосредственном подключении к электронному генератору такому условию не удовлетворяет. Это обуславливает необходимость включения между выходом электронного генератора и входом УЗКС специальных цепей электрического согласования, которые представляют собой реактивные четырехполюсники [1, 6].

В условиях изменения параметров обрабатываемых сред и наличия других дестабилизирующих факторов, режимы акустического и электрического согласования в процессе работы УЗТА изменяются. Следовательно, для поддержания оптимальных режимов согласования требуется автоматическое регулирование некоторых параметров ультразвукового технологического аппарата.

Проблему оптимизации акустического согласования ультразвуковой колебательной системы с обрабатываемой средой в условиях изменения параметров последней решают автоматической подстройки выходной частоты генератора в соответствии со всеми возможными изменениями частоты колебательной системы [2, 8].

Более сложной является проблема электрического согласования, поскольку до настоящего времени отсутствуют практические способы и средства для реализации автоматического управления цепью электрического согласования. Поэтому, практически все известные конструкции УЗТА оснащаются только цепями электрического согласования, параметры которых фиксированы и подобраны таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность работы только в одном технологическом режиме в узком диапазоне изменения свойств обрабатываемой среды. В случае изменения свойств среды и параметров технологического процесса в более широком диапазоне оптимального электрического согласования достичь не удастся.

Последствия работы ультразвукового технологического аппарата в режиме неоптимального электрического согласования заключаются в следующем.

1. Снижение коэффициента мощности неизбежно приводит и к снижению к.п.д. аппарата, поскольку для поддержания заданного значения выходной мощности приходится увеличивать значение напряжения питания выходного каскада или значение выходного тока. Это требует дополнительных затрат энергии.
2. Работа в режиме переключения транзисторов при ненулевом токе также обуславливает снижение к.п.д., поскольку основные потери в транзисторах происходят именно в момент переключения.
3. Переключение транзисторов с разрывом тока неизбежно приводит к возникновению переходных процессов, обусловленных паразитными емкостями и индуктивностями в выходных цепях. Эти переходные процессы также обуславливают потери энергии и являются причиной возникновения электромагнитных помех, а также выбросов напряжения, способных вывести из строя выходные транзисторы.

Потери энергии в выходных транзисторах, обусловленные электрическим рассогласованием, ухудшают экономичность ультразвуковых технологических аппаратов и увеличивают тепловую нагрузку на выходной каскад. Это приводит к необходимости наличия запаса по рассеиваемой мощности транзисторов, и, в конечном итоге, к увеличению габаритных размеров, массы и стоимости электронных генераторов и ухудшению других эксплуатационных характеристик.

Проблема оптимизации электрического согласования при изменении свойств обрабатываемых сред существенно ограничивает диапазон функциональных применений ультразвуковых технологических аппаратов.

Учитывая вышеперечисленные обстоятельства, проблема создания способов оптимизации электрического согласования электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы считается актуальной.

2. ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КАК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЕЕ СОГЛАСОВАНИЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

2.1. Эквивалентная схема замещения ультразвуковой колебательной системы

Для установления взаимосвязи между свойствами обрабатываемой среды и входным электрическим сопротивлением УЗКС используется метод электромеханических аналогий, предложенный У. Мэзоном [9]. Этот метод позволяет представить механические величины их электрическими эквивалентами и рассматривать УЗКС как электрическую нагрузку.

В этом случае пьезоэлектрическая ультразвуковая колебательная система представляется эквивалентной электрической схемой замещения, позволяющей связать ее акустические и электрические параметры. Один из вариантов такой эквивалентной схемы представлен на рис. 1.

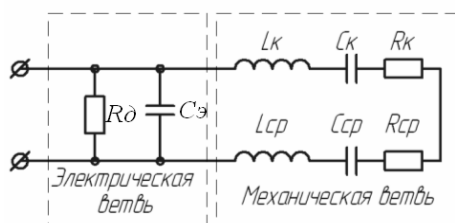


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения УЗКС

В эквивалентной схеме замещения $C_э$ и $R_д$ — чисто электрические величины («электрическая ветвь»), представляющие собой собственную электрическую емкость и сопротивление потерь пьезоэлектрического преобразователя. Величины, входящие в «механическую ветвь» — электрические эквиваленты механических (акустических) величин. Индуктивность $L_к$ эквивалентна колеблющейся массе УЗКС, емкость $C_к$

эквивалентна гибкости материала УЗКС, сопротивление R_K эквивалентно внутреннему трению в материале УЗКС. Индуктивность L_{CP} эквивалентна соколеблющейся с излучателем массе участка среды, а емкость C_{CP} , соответственно, эквивалентна гибкости этого участка. Сопротивление R_{CP} характеризует безвозвратные потери энергии в обрабатываемой среде.

Электрические параметры L_K , C_K и R_K практически не подвержены изменениям в процессе работы УЗТА. Значение электрической емкости C_9 пьезоэлектрического преобразователя при изменении его температуры в процессе от 20°C до 150°C увеличивается в 1,5...2 раза.

Наиболее существенным и динамичным изменениям в процессе работы УЗТА подвержены параметры, определяемые обрабатываемой средой.

Принимая, что для жидких сред $C_{CP} \rightarrow \infty$, частота (циклическая) резонанса «механической ветви» нагруженной УЗКС определяется выражением

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_K \cdot (L_K + L_{CP})}}. \quad (1)$$

Сопротивление «механической ветви» на частоте механического резонанса является чисто активным и равно

$$R_M = R_K + R_{CP}. \quad (2)$$

Считая, что $R_9 \gg 1/\omega C_9$, входное комплексное электрическое сопротивление УЗКС на частоте резонанса «механической ветви» определяется выражением

$$Z_{BX} = R_M / (1 + j\omega C_9 R_M), \quad (3)$$

где j — мнимая единица.

Из представленных зависимостей можно сделать следующие выводы.

1. На частоте механического резонанса (что соответствует режиму оптимального акустического согласования) ультразвуковая колебательная система может рассматриваться как комплексная электрическая нагрузка, образованная параллельным включением активного сопротивления «механической ветви» и емкостного сопротивления «электрической ветви».
2. Параметры «механической ветви», в частности резонансная частота и активное сопротивление, подвержены изменениям при изменении свойств обрабатываемой среды, а емкостное сопротивление «электрической ветви» подвержено изменениям при изменении температуры пьезоэлектрического преобразователя.

В связи с этим необходимо исследовать процесс электрического согласования электронных генераторов и УЗКС, выявить проблемы и найти пути решения проблем.

2.2. Цепи электрического согласования

В ультразвуковой технологической аппаратуре в настоящее время используются два типа цепей электрического согласования (ЦЭС). Цепь первого типа (рис. 2а) представляет собой одиночный колебательный контур, где нагрузка (УЗКС) включается параллельно конденсатору. Цепь второго типа (рис. 2б) представляет собой два связанных колебательных контура, один из которых является последовательным, другой — параллельным. УЗКС включается в цепь питания параллельного колебательного контура.

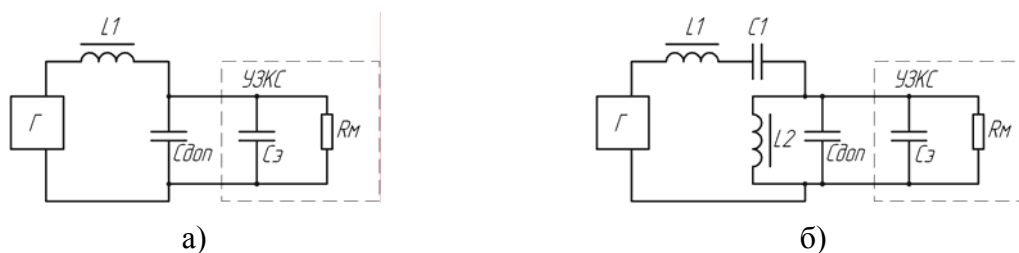


Рис. 2. Эквивалентные схемы цепей электрического согласования:
а – цепь первого типа, б – цепь второго типа

При использовании ЦЭС первого типа комплексное сопротивление нагрузки генератора при условии резонанса «механической ветви» определяется выражением

$$Z_n = \frac{R_M}{1 + \omega^2 C_2^2 R_M^2} - j\omega \left(L_1 - \frac{R_M^2 C_2}{1 + \omega^2 C_2^2 R_M^2} \right), \quad (4)$$

где $C_2 = C_э + C_{доп}$, $C_{доп}$ — емкость дополнительного конденсатора, включаемого параллельно пьезоэлектрическому преобразователю.

При этом режим оптимального электрического согласования определяется условием

$$L_1 = \frac{R_M^2 C_2}{1 + \omega^2 C_2^2 R_M^2}. \quad (5)$$

При использовании ЦЭС первого типа комплексное сопротивление нагрузки генератора при условии резонанса «механической ветви» определяется выражением

$$Z_n = \frac{\rho_2^2 R_M}{\rho_2^2 + R_M^2 \left(\frac{\omega^2 - \omega_2^2}{\omega \omega_2} \right)^2} + j \left(\rho_1 \left(\frac{\omega^2 - \omega_1^2}{\omega \omega_1} \right) - \frac{\rho_2 R_M^2 \left(\frac{\omega^2 - \omega_2^2}{\omega \omega_2} \right)}{\rho_2^2 + R_M^2 \left(\frac{\omega^2 - \omega_2^2}{\omega \omega_2} \right)^2} \right), \quad (6)$$

где $\rho_1 = \sqrt{L_1 / C_1}$ — характеристическое сопротивление последовательного контура,
 $\omega_1 = 1 / \sqrt{L_1 C_1}$ — резонансная частота последовательного контура,
 $\rho_2 = \sqrt{L_2 / C_2}$ — характеристическое сопротивление параллельного контура,
 $\omega_2 = 1 / \sqrt{L_2 C_2}$ — резонансная частота параллельного контура.

При этом режим оптимального электрического согласования определяется условием

$$\omega = \omega_1 = \omega_2. \quad (7)$$

Для определения необходимых диапазонов перестройки удобно использовать значение фазового угла φ между током и напряжением на выходе генератора или связанное с ним значение коэффициента мощности нагрузки, равное $\cos \varphi$.

Значение фазового угла между током и напряжением на выходе генератора рассчитывается как

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im}(Z_n)}{\operatorname{Re}(Z_n)}. \quad (8)$$

Изменения параметров ультразвуковой колебательной системы, обусловленные изменением свойств обрабатываемой среды, вызывают изменение соотношения действительной и мнимой частей сопротивления нагрузки электронного генератора и влияют на режим электрического согласования. Далее рассмотрены особенности работы электронного генератора в условиях эксплуатации УЗТА в режиме несогласованной нагрузки.

2.3. Работа электронного генератора в условиях несогласованной нагрузки

В общем случае мощность потерь на внутреннем сопротивлении генератора определяется как $P_A = P_{\text{НАГР}} / ((1 - \eta) \cos \varphi)$, где $P_{\text{НАГР}}$ — мощность, отдаваемая в нагрузку, η — к.п.д. генератора.

Применительно к ключевым генераторам, работающим на комплексную нагрузку, ситуация ухудшается. Обусловлено это тем, что в ключевых каскадах основные потери энергии происходят в моменты переключения, когда транзисторы находятся в активном режиме. Для характеристики мощности потерь энергии в моменты переключения следует использовать величину $D_K = r_K t_K / T$, имеющую размерность электрического сопротивления, где r_K — среднее значение сопротивления в моменты переключения, t_K — время переключения, T — период колебаний.

Средняя за период колебаний мощность потерь в транзисторах в моменты переключения определяется выражением $P_K = I_K^2 \cdot D_K$, где $I_K = I_A \cdot \sin \varphi$ — ток через транзисторы в моменты коммутации («ток разрыва»). Таким образом

$$P_K = D_K I_R^2 \sin^2 \varphi. \quad (9)$$

Для определения реальных значений при работе в условиях несогласованной нагрузки были проведены экспериментальные исследования и получены зависимости мощности потерь в выходных транзисторах и к.п.д. выходного каскада от фазового угла между током и напряжением на выходе генератора. Результаты исследований представлены в виде графиков на рисунке 3. На этих же графиках представлена теоретическая аппроксимация этих данных, определяемая выражением (9).

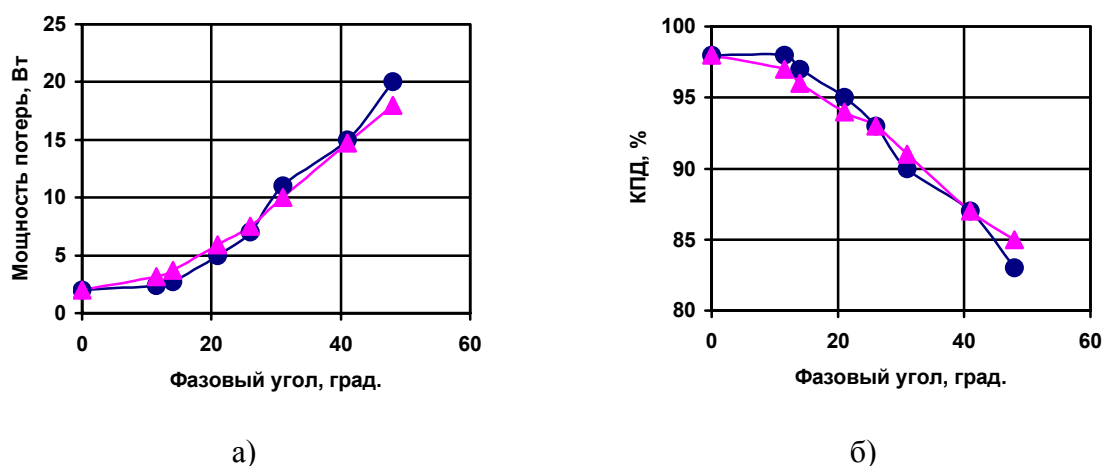


Рис. 3. Графики зависимости мощности потерь (а) и к.п.д. (б) от фазового угла между током и напряжением на выходе генератора. Треугольные маркеры соответствуют теоретическим данным, круглые — экспериментальным

При проведении этих исследований к выходному каскаду электронного генератора вместо штатной цепи электрического согласования и УЗКС подключалась электрическая цепь, состоящая из последовательно включенных дросселя, конденсатора и реостата. На радиаторе одного из выходных транзисторов закреплялась термопара, а сам радиатор теплоизолировался. Серия экспериментов, в ходе которых производилось измерение начальной температуры радиатора, после чего генератор включался на 1 минуту, и температура измерялась снова, была проведена для различных значений фазового угла между током и напряжением на выходе генератора. Мощность потерь рассчитывалась по формуле $P_K = cm\Delta T/t$, где c — удельная теплоемкость материала радиатора, m — его масса, ΔT — разность температур, t — время. В ходе каждого эксперимента действующее значение тока через нагрузку поддерживалось равным 1 А, а мощность, потребляемая в нагрузке — 100 Вт за счет регулировки сопротивления реостата и напряжения питания выходного каскада. К.п.д. выходного каскада рассчитывался как $\eta = P_H / (P_K + P_H)$, где P_H — мощность, потребляемая нагрузкой.

В результате проведенных экспериментов установлено, что работа выходного ключевого каскада наиболее эффективна только при значениях фазового угла между током и напряжением не превышающих 15 градусов (что соответствует коэффициенту мощности 0,96). В диапазоне 15–25 градусов (коэффициент мощности 0,96–0,91) к.п.д. снижается на 5–7%. При значениях фазового угла свыше 25 градусов потери мощности начинают существенно возрастать, а к.п.д. — падать (не менее 0,5 Вт на 1 угловой градус и 0,4% к.п.д. на один угловой градус соответственно).

Для определения диапазонов изменения электрических параметров УЗКС в условиях обработки различных сред и влияния этих изменений на режим согласования с электронным генератором были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в следующем подразделе.

2.4. Экспериментальная оценка диапазонов изменения электрических параметров УЗКС и их влияние на режим электрического согласования

Исследование проводилось с использованием электронного генератора мощностью 400 Вт и полуволновой пьезоэлектрической колебательной системы с номинальной частотой 22 кГц, диаметром пакета пьезоэлектрических элементов 38 мм, толщиной пакета пьезоэлектрических элементов 10 мм. Эксперименты выполнялись с использованием рабочих инструментов грибовидного типа диаметром 20 и 25 мм. Цепь электрического согласования (первого типа) была предварительно настроена для эффективной обработки водной среды в режиме развитой кавитации при диаметре излучателя 20 мм. При изменении среды и условий обработки параметры цепи электрического согласования не изменялись. В таблице 1 представлены значения частоты резонанса и активного сопротивления «механической ветви» УЗКС и значения фазового угла между током и напряжением на выходе электронного генератора при обработке различных сред в различных режимах.

Таблица 1. Изменение частоты резонанса и активного сопротивления «механической ветви» УЗКС в условиях различных обрабатываемых сред и режимов обработки.

В числителе указаны результаты, полученные при использовании излучателя диаметром 20 мм, в знаменателе — 25 мм

Обрабатываемая среда (условия обработки)	Частота резонанса «механической ветви», ω , кГц	Сопротивление «механической ветви», R_M , Ом	Фазовый угол между током и напряжением, φ , град
Воздух	22,4 / 22,0	530 / 580	4 / 0
Вода (температура +40 град, кавитация)	21,7 / 20,5	660 / 890	2 / 20
Вода (температура +10 град, без кавитации)	20,6 / 21,0	1100 / 1980	24 / 44
Масло моторное (в условиях кавитации)	21,4 / 19,4	810 / 1200	18 / 35
Эпоксидная смола (температура +18 градусов без кавитации)	18,8 / 18,0	2210 / 3320	50 / 63
Эпоксидная смола (температуре +85 градусов в условиях кавитации)	19,5 / 19,0	930 / 1030	24 / 31

Емкость пьезоэлектрического преобразователя для выбранного типа колебательной системы изменялась в процессе осуществления экспериментов в зависимости от температуры пьезоэлектрического преобразователя в пределах от 3,7 нФ до 5,9 нФ.

Таким образом, условие согласования, близкое к оптимальному, выполняется только в трех из 12 случаев. Следовательно, для обеспечения оптимального электрического согласования в УЗТА в условиях изменения параметров обрабатываемых сред и режимов обработки необходимо осуществлять автоматическое регулирование параметров элементов цепи согласования с целью выполнения условий (5) или (7). Решению этой проблемы посвящен следующий раздел.

3. РАЗРАБОТКА СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ И РЕАЛИЗУЮЩИХ ЕГО СРЕДСТВ

Разрабатываемый способ управления ориентирован на использование его в УЗТА, содержащих цепи электрического согласования второго типа. Объясняется это тем, что, хотя для выполнения условия (7) требуется регулирование минимум двух параметров, обеспечить это условие проще, нежели условие (5). Сущность способа заключается в том, что при включении ультразвукового технологического аппарата в работу происходит определение первоначальных значений собственной электрической емкости пьезоэлектрического преобразователя и частоты резонанса «механической ветви», после чего осуществляется расчет и установка необходимых параметров цепи электрического согласования. В процессе работы ультразвукового технологического аппарата осуществляется непрерывное поддержание режимов оптимального акустического и электрического согласования за счет автоматической подстройки выходной частоты и автоматического регулирования параметров элементов цепи электрического согласования, соответственно.

На рис. 4 представлена функциональная схема практической реализации системы автоматического регулирования. В качестве исполнительных устройств используются дроссели переменной индуктивности (вариометры).

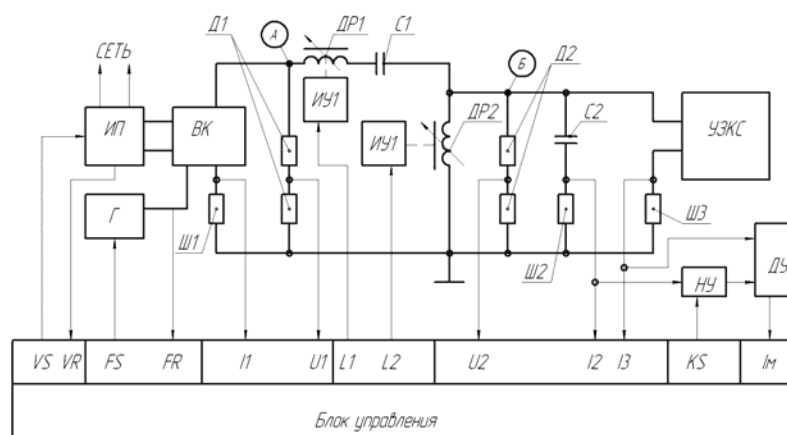


Рис. 4. Схема системы автоматического регулирования

В системе управления используется девять измерительных и пять управляющих сигналов, назначения которых поясняется в таблице 2.

Обозначения на структурной схеме (рис. 4) имеют следующий смысл: ИП — источник питания с регулируемым напряжением, ВК — выходной каскад, Г — задающий генератор с регулируемой выходной частотой, тактирующий выходной каскад, Ш1–Ш3 — токоизмерительные шунты, Д1–Д2 измерительные делители напряжения. ДР1–ДР2 регулируемые дроссели с исполнительными устройствами ИУ1–ИУ2. НУ — нормирующий линейный усилитель с переменным коэффициентом усиления, ДУ — дифференциальный усилитель.

Таблица 2. Назначение измерительных и управляющих сигналов

Название сигнала	Тип	Передаваемая информация
VR	Измерительный	Значение напряжения питания выходного каскада
FR	-//-	Частота выходного напряжения
I1	-//-	Амплитуда и фаза тока на выходе генератора
U1	-//-	Амплитуда и фаза напряжения на выходе генератора
U2	-//-	Амплитуда и фаза напряжения, питающего УЗКС
I2	-//-	Мгновенные значения тока через дополнительный конденсатор C2
I3	-//-	Мгновенные значения полного тока, питающего УЗКС
Im	-//-	Амплитуда и фаза тока «механической ветви» УЗКС
T	-//-	Температура пьезоэлектрического преобразователя
VS	Управляющий	Задание напряжения питания выходного каскада
FS	-//-	Задание частоты выходного напряжения
L1	-//-	Задание индуктивности дросселя ДР1 последовательного контура
L2	-//-	Задание индуктивности дросселя ДР2 параллельного контура
KS	-//-	Задание значения коэффициента усиления нормирующего усилителя НУ

Нормирующий усилитель НУ и дифференциальный усилитель ДУ обеспечивают выделение значения тока «механической ветви» из полного тока, питающего УЗКС. Полный ток УЗКС есть $I_3 = I_{MB} + U_2 \omega C_3$, ток через дополнительный конденсатор есть $I_2 = U_2 / \omega C_2$. Если коэффициенты передачи для шунтов и дифференциального усилителя единичные, то сигнал на выходе последнего описывается выражением

$$I_M = I_{MB} + U_2 \omega (C_3 - K C_2). \quad (10)$$

Соответственно, если выполняется условие

$$K = C_2 / C_3, \quad (11)$$

сигнал I_m на выходе дифференциального усилителя окажется пропорциональным только току «механической ветви». Сигнал, несущий информацию о токе механической ветви, необходим для работы системы АПЧ и системы регулирования выходной мощности.

Предложенный способ управления реализуется следующим образом. При включении УЗТА производится определение параметров УЗКС, в частности значения собственной емкости пьезоэлектрического преобразователя и частоты резонанса «механической ветви».

Определение значения собственной электрической емкости пьезоэлектрического преобразователя производится блоком управления автоматически, в результате выполнения следующей последовательности действий.

1. Частота выходного напряжения генератора устанавливается на 5–7 кГц выше номинального (паспортного) значения частоты резонанса. Для задания частоты используется управляющий сигнал FS.
2. Амплитуда выходного напряжения генератора устанавливается на уровне 15–20% от максимального значения. Для этого используется сигнал VS.
3. Для установленного значения частоты производится расчет и установка значения индуктивности дросселя ДР1 из условия обеспечения резонанса последовательного колебательного контура. Установка значения индуктивности дросселя ДР1 осуществляется с помощью управляющего сигнала L1.
4. Индуктивность дросселя ДР2 устанавливается таким образом, чтобы амплитуда напряжения питания УЗКС отличалась от амплитуды выходного напряжения генератора не более чем на 30%. После выполнения действий 1–4 полный ток питания УЗКС будет практически равен реактивному току через собственную электрическую емкость пьезоэлектрического преобразователя, поскольку ток «механической ветви» на частоте, далекой от частоты резонанса, пренебрежимо мал.
5. Производится установка минимального коэффициента усиления K нормирующего усилителя НУ. Для этого используется сигнал KS.
6. Производится постепенное увеличение коэффициента усиления нормирующего усилителя НУ до тех пор, пока амплитуда сигнала I_m не станет меньше заданного значения, близкого к нулю. Так как ток в механической ветви пренебрежимо мал, близкая к нулю амплитуда сигнала I_m свидетельствует о том, что выполняется условие (11).
7. Производится расчет значения собственной электрической емкости пьезоэлектрического преобразователя $C_0 = KC_2$.
8. Производится изменение температуры пьезоэлектрического преобразователя.

После выполнения действий 1–8 осуществляется переход в режим поиска частоты механического резонанса УЗКС, что блок управления также реализует в автоматическом режиме. Для этого амплитуда выходного напряжения также устанавливается в пределах 15–20% от максимального значения, индуктивность дросселя ДР1 устанавливается из условия резонанса последовательного контура при текущем значении частоты, а индуктивность дросселя ДР2 — из условия резонанса параллельного контура с учетом значения емкости пьезоэлектрического преобразователя.

Поиск продолжается до тех пор, пока фазы сигналов U_2 и I_m не сравняются. После этого подготовительные операции заканчиваются, осуществляется переход в рабочий режим.

В рабочем режиме блок управления на основании измерительной информации реализует регулирование пяти основных параметров. Регулирование каждого параметра осуществляется независимо, что позволяет рассмотреть работу разработанной системы автоматического регулирования как пяти независимых систем, названных далее контурами управления.

Первый контур управления выполняет автоматическую подстройку частоты выходного напряжения генератора, для чего непрерывно контролирует разность фаз сигналов U_2 и I_m и минимизирует ее за счет изменения выходной частоты генератора (используя сигнал FS), обеспечивая тем самым работу ультразвуковой колебательной системы в режиме механического резонанса и ее акустическое согласование с обрабатываемой средой.

Второй контур управления поддерживает заданное значение выходной мощности, для чего непрерывно контролирует произведение амплитудных значений сигналов U_2 и I_m , и обеспечивает его равным заданной установке за счет регулировки амплитуды выходного напряжения генератора за счет изменения напряжения питания выходного каскада (используя сигнал VS).

Третий контур управления обеспечивает работу транзисторов выходного каскада в режиме переключения при нулевом токе, для чего непрерывно контролирует разность фаз сигналов U_1 и I_1 и минимизирует ее за счет регулировки значения индуктивности дросселя ДР1 сигналом L1.

Четвертый контур управления обеспечивает режим резонанса параллельного колебательного контура (что необходимо для выполнения условия (7)), для чего контролирует разность фаз сигналов U_2 и I_1 и минимизирует ее за счет регулировки значения индуктивности дросселя ДР2.

Пятый контур управления непрерывно контролирует значение температуры пьезоэлектрического преобразователя ультразвуковой колебательной системы, на ее основании рассчитывает текущее значение его электрической емкости и, используя сигнал KS, устанавливает коэффициент усиления нормирующего усилителя НУ исходя из условия (11), 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.

Опытная эксплуатация созданного образца ультразвукового технологического аппарата позволила установить, 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 95–97% (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

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. В результате анализа современного состояния ультразвуковых технологических аппаратов установлено, что снижение их эффективности в ходе технологического процесса обусловлено электрическим рассогласованием электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы.
2. Исследование процесса передачи электрической энергии от электронного генератора к ультразвуковой колебательной системе позволило установить, что причиной рассогласования является изменение электрических параметров колебательной системы, обусловленное изменением свойств обрабатываемых сред в ходе технологического процесса.
3. Проанализированы особенности построения перестраиваемых цепей электрического согласования и сформулированы требования к оборудованию, обеспечивающему режим оптимального электрического согласования.
4. В результате экспериментальных исследований на различных технологических средах определены пределы необходимой перестройки параметров цепей электрического согласования и показана необходимость их автоматического регулирования в процессе работы ультразвукового технологического аппарата.
5. Предложен способ автоматического регулирования электрического согласования и разработана его практическая реализация, позволившая обеспечить максимальную эффективность работы ультразвукового технологического аппарата при любых изменениях параметров сред и колебательных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донской А. В., Келлер О. К., Кратыш Г. С. Ультразвуковые электротехнологические установки. Л., Энергоиздат, 1982, 276 с.
2. 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.
3. 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. pp. 217–221.
4. Цыганок С. Н., Хмелев В. Н., Барсуков Р. В., Лебедев А. Н. Полуволновые пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы. Электронный журнал «Техническая акустика», <http://www.ejta.org>, 2005, 22.
5. Китайгородский Ю. И., Яхимович Д. Ф. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем. М., Машиностроение, 1982, 56 с.

6. Khmelev V. N., Savin I. I., Barsukov R. V., Tsyganok S. N. Problems of Electrical Matching of Electronic Ultrasound Frequency Generators and Electroacoustical Transducers for Ultrasound Technological Installations. Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'2004. Workshop Proceedings, Novosibirsk, NSTU, 2004, pp. 211–215.
7. Vladimir N. Khmelev, Igor I. Savin, Roman V. Barsukov, Sergey N. Tsyganok, Andrey N. Lebedev, Alexey N. Slivin. Developing The Method And Devices For Controlling Of The Working Process In Multifunctional Ultrasonic Apparatus. Intrnational Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'2005. Workshop Proceedings, Novosibirsk, NSTU, 2005 (русский вариант).
8. Пат. 2131794 РФ, МПК6 В 23 В 37/00. Способ управления процессом ультразвуковой размерной обработки / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н.; ГОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова". – №98105730; Заявл. 26.03.98; Оpubл. 20.06.99, Бюл. №13. - 4 с.: ил.
9. W. Mason et al. Electromechanical transducers and filters. New York, 1942.