

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.Н. Хмелев, И.И. Савин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин

В статье представлены результаты исследований, направленных на решение проблемы повышения эффективности 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.

Введение

Промышленное применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности началось примерно 60 лет назад. Тем не менее, за столь короткий срок ультразвуковые технологии доказали свою высокую эффективность, особенно при осуществлении процессов экстракции, диспергирования, получения эмульсий, сушки, пропитки пористых материалов, получения или коагуляции аэрозолей, сварки полимеров и металлов.

Для интенсификации технологических процессов под воздействием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности 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 многолетний опыт разработки и 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 поиска способа устранения этих причин.

Особенности современных ультразвуковых технологических аппаратов

В настоящее время ультразвуковые технологические аппараты различной мощности и технологического назначения, как в России, так и за рубежом, строятся по типовой схеме, включающей резонансную пьезоэлектрическую колебательную систему волноводного типа, питаемую от транзисторного электронного генератора, работающего в ключевом режиме. Электронный генератор содержит две основные системы автоматизации — систему автоподстройки выходной частоты и систему стабилизации выходной мощности [2, 3].

Ультразвуковые колебательные системы, выполненные по полуволновой конструктивной схеме, с использованием современных пьезоэлектрических материалов имеют к.п.д. 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 $100 \cdot (0,95 \cdot 0,8) = 76\%$. К сожалению, на практике это не реализуется, особенно в условиях, когда свойства обрабатываемых сред в технологическом процессе непрерывно изменяются. Причиной снижения общего к.п.д. ультразвуковых технологических аппаратов является неэффективная передача энергии от электронного генератора к УЗКС и от УЗКС к обрабатываемой среде, то есть не выполнение условий 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 минимально и 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, при подключении пьезоэлектрической колебательной системы к электронному генератору такое условие не соблюдается. 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 в соответствии с изменениями свойств обрабатываемой среды.

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 для решения является проблема электрического согласования. До настоящего времени отсутствуют практические способы и средства для реализации автоматического управления цепью электриче-

ского согласования. Вместе с тем, все известные конструкции УЗТА оснащаются 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 не оптимального электрического согласования заключаются в следующем.

1. Снижается коэффициент мощности, что 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 обуславливают потери энергии, и являются причиной возникновения электромагнитных помех, а также выбросов напряжения, способных вывести из строя выходные транзисторы.

4. Потери энергии в выходных транзисторах, обусловленные электрическим рассогласованием ухудшают экономичность ультразвуковых технологических аппаратов и увеличивают тепловую нагрузку на выходной каскад. Это приводит к увеличению габаритных размеров, массы и стоимости электронных генераторов и ухудшению других эксплуатационных характеристик.

В связи с этим, отсутствие решения проблемы оптимизации электрического согласования при изменении свойств обрабатываемых сред существенно ограничивает диапазон функциональных применений ультразвуковых технологических аппаратов.

Учитывая вышеперечисленные обстоятельства, необходимость решения проблемы повышения эффективности ультразвуковых

технологических аппаратов за счет оптимизации электрического согласования является актуальной задачей.

Особенности согласования ультразвуковых колебательных систем с генераторами

Для установления взаимосвязи между акустическими характеристиками 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 рассматриваемом 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.

В эквивалентной схеме замещения элементы $C_Э$ 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_K эквивалентна колеблющейся массе УЗКС, емкость C_K 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.

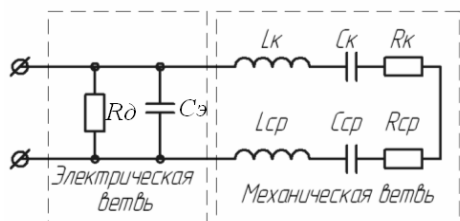


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения УЗКС

Электрические элементы L_K , C_K и R_K

практически не подвержены изменениям в процессе работы УЗТА. Значение электрической емкости $C_Э$ 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 элементы, определяемые обрабатываемой средой.

При излучении ультразвуковых колебаний в жидкую среду инерционное сопротивление преобладает над упругим и среда ведет себя как масса, присоединенная к излучателю. В связи с этим C_{CP} может быть исключено из расчета.

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

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

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

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

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

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.

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.



Рисунок 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 $C_2 = C_3 + C_{доп}$, $C_{доп}$ – 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 $\rho_1 = \sqrt{L_1/C_1}$ и $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ – соответственно, характеристическое сопротивление и резонансная частота последовательного колебательного контура, $\rho_2 = \sqrt{L_2/C_2}$ и $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ – тоже самое, для параллель-

ного колебательного 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

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

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

При работе электронного генератора в условиях несогласованной нагрузки. Мощность потерь на внутреннем сопротивлении генератора определяется как $P_A = P_{НАГР} / ((1 - \eta) \cos \varphi)$, где $P_{НАГР}$ — 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 переключе-

ния, когда транзисторы находятся в активном режиме. Для характеристики мощности потерь энергии в моменты переключения используется величина $D_K = r_K t_K / T$, имеющая 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 изменяемых величин 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 рис. 3. На этих же графиках представлена теоретическая аппроксимация, определяемая выражением (9).

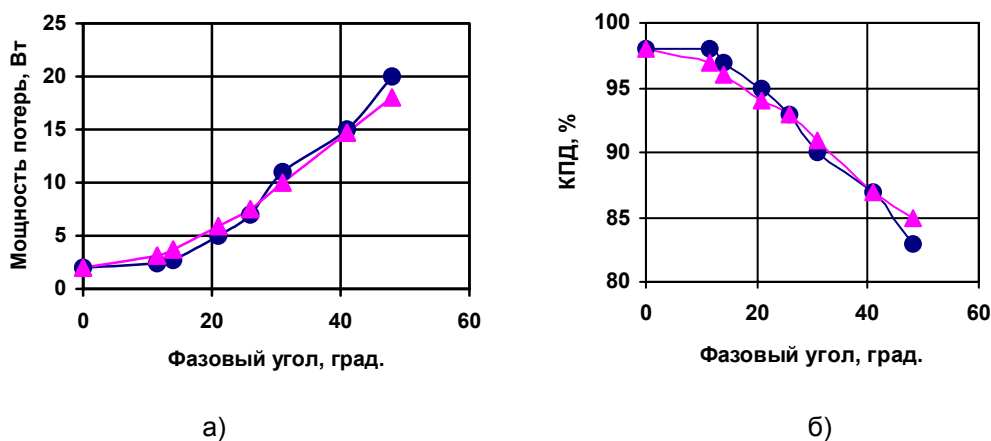


Рисунок 3 – Графики зависимости мощности потерь (а) и к.п.д. (б) от фазового угла между током и напряжением на выходе генератора. Треугольные маркеры соответствуют теоретическим данным, круглые — экспериментальным

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

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

Примечание. В числителе указаны результаты, полученные при использовании излучателя диаметром 20 мм, в знаменателе – 25 мм

При проведении экспериментальных 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 вновь. Исследования проведены 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. Это достигалось 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 градусов — 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).

Экспериментальное определение диапазонов изменения электрических параметров УЗКС и их влияния на режим электрического согласования проводилось с использованием электронного генератора мощностью 400 Вт и полуволновой пьезоэлектрической колебательной системы с номинальной частотой 22 кГц. УЗКС выполнена на основе пакета пьезоэлектрических элементов диаметром 38 мм, толщиной пакета пьезоэлектрических элементов 10 мм и имела рабочие инструментов грибовидного типа диаметром 20 и 25 мм. Цепь электрического согласования

(первого типа) была предварительно настроена для 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.

Емкость пьезоэлектрического преобразователя для выбранного типа колебательной системы изменялась в ходе экспериментов при изменении температуры пьезоэлектрического преобразователя изменялась в пределах от 3,7 нФ до 5,9 нФ. Таким образом, условие согласования, близкое к оптимальному, выполняется только в трех из 12 исследованных 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). Для решения этой проблемы создано специализированное оборудование, принцип построения которого и практическая реализация изложены в следующем разделе.

Разработка способа управления и реализующих его средств

Предложенный и разработанный способ управления основан на использовании 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 предложенного 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).

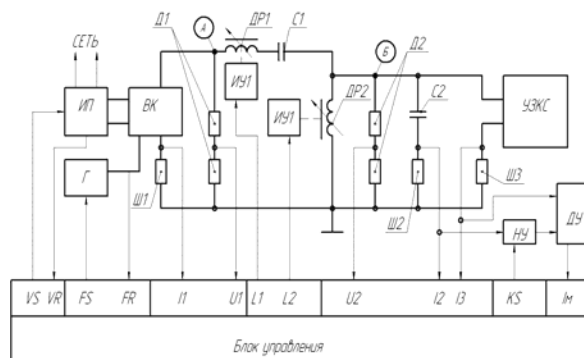


Рисунок 4 – Схема системы автоматического регулирования

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.

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

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

то 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.

Таблица 2

Назначение измерительных и управляющих сигналов

Название сигнала	Передаваемая информация
Измерительные сигналы	
VR	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
Управляющие сигналы	
VS	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

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, протекающий через 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 близким 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 $C_3 = KC_2$.

8. Производится изменение температуры пьезоэлектрического преобразователя.

После последовательного выполнения действий 1–8 осуществляется переход в режим поиска частоты механического резонанса УЗКС. Это действие блок управления также реализует в автоматическом режиме. Для этого амплитуда выходного напряжения 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

КС, устанавливают 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.

Предложенный способ был реализован на практике в промышленном образце ультразвукового технологического аппарата. Опытная эксплуатация 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 достигает 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

Проведенные исследования позволили заложить основу решения проблемы согласования и получить следующие практические результаты.

1. Установлено, что снижение эффективности ультразвуковых технологических аппаратов в ходе технологических процессов обусловлено электрическим рассогласованием электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы.

2. Показано, 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. 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. – С.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. Khmelev V.N., Savin I.I., Barsukov R.V., Tsyganok S.N., Lebedev A.N., Slivin A.N. 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; Опубл. 20.06.99, Бюл. №13. – 4 с.
9. W. Mason et al. Electromechanical transducers and filters. New York, 1942.