

Согласование электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами для повышения эффективности ультразвуковых аппаратов

[В.Н. Хмелёв](#), [Д.В. Генне](#), [Р.В. Барсуков](#), [Д.С. Абраменко](#), [А.Н. Сливин](#), А.А. Ромашкин

Для ультразвуковой обработки технологических сред и материалов используются специализированные или многофункциональные технологические аппараты, обеспечивающие преобразование электрической энергии промышленной сети в ультразвуковые колебания и ввод их в обрабатываемую среду. Независимо от назначения, ультразвуковые технологические аппараты состоят из электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы. Электронный генератор осуществляет преобразование энергии электрической сети переменного тока в электрические колебания ультразвуковой частоты для питания ультразвуковой колебательной системы. Ультразвуковая колебательная система (УЗКС) выполняет преобразование электрических колебаний в механические колебания рабочей поверхности и ввод их в обрабатываемую среду или материал.

Для реализации процесса преобразования в ультразвуковых технологических аппаратах используются магнитострикционные или пьезоэлектрические преобразователи.

В настоящее время, благодаря простоте изготовления и повышенному КПД наибольшее распространение получили ультразвуковые колебательные системы с пьезоэлектрическими преобразователями.

Пьезоэлектрическая колебательная система в общем случае является комплексной электрической нагрузкой на электронный генератор и её непосредственное подключение к нему не обеспечивает максимальной эффективности передачи энергии.

Для выявления причин неоптимального согласования пьезоэлектрического преобразователя и электронного генератора рассмотрим, представленную на рисунке 1 физическую (электрическую) эквивалентную схему замещения колебательной системы с пьезоэлектрическим преобразователем, работающей в нерезонансном режиме (вблизи резонанса) [1].

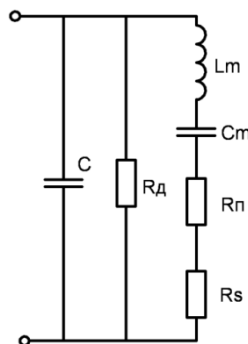


Рис. 1. Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы вблизи резонансной частоты

В представленной схеме - индуктивность L_m эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_m – гибкость, активное сопротивление R_p – сопротивление

механических потерь, R_s – сопротивление излучения колебательной системы, C – электрическая (статическая) емкость преобразователя, R_d – диэлектрические потери в пьезоматериале. Сопротивление механических потерь обусловлено внутренним трением частиц материала при колебаниях, а также потерями механической энергии в местах крепления колебательной системы. Сопротивление излучению определяется параметрами излучателя и пропорционально волновому сопротивлению среды. Электрическая емкость пьезоэлектрического преобразователя обусловлена геометрическими размерами и диэлектрической проницаемостью используемых пьезокерамических элементов.

На резонансной частоте механического колебательного контура (L_m, C_m) электрическая эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы преобразуется к виду, представленному на Рис. 2.

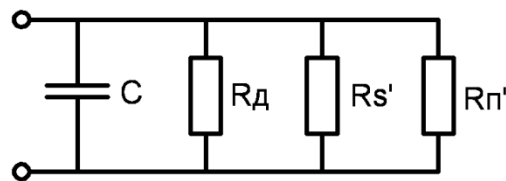


Рис 2. Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы на резонансной частоте

Здесь R_s' и $R_{п'}$ – сопротивления, приведенные к параллельной схеме [1]. Как видно из эквивалентной схемы пьезоэлектрической колебательной системы она является комплексной нагрузкой для электронного генератора, определяемой, в основном, электрической емкостью пьезоэлектрического преобразователя. Прямое подключение такой нагрузки к электронному генератору приводит к снижению эффективности передачи энергии в нагрузку, а, следовательно, и к снижению эффективности ультразвукового воздействия на обрабатываемые среды или материалы. Для обеспечения максимальной эффективности преобразования и передачи акустической энергии в обрабатываемые среды необходимо обеспечивать согласование электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы.

В общем случае, входной импеданс ультразвуковой колебательной системы и выходной импеданс электронного генератора являются комплексными величинами (1).

$$\begin{cases} Z_{узкс} = a_{узкс} + b_{узкс}j \\ Z_{г} = a_{г} + b_{г}j \end{cases} \quad (1)$$

где:

$Z_{узкс}$ - импеданс пьезоэлектрической колебательной системы;

$a_{узкс}$ - активная составляющая импеданса пьезоэлектрической колебательной системы;

$b_{узкс}$ - реактивная составляющая импеданса пьезоэлектрической колебательной системы;

$Z_{г}$ - выходной импеданс генератора;

$a_{г}$ - активная составляющая импеданса генератора;

$b_{г}$ - реактивная составляющая импеданса генератора

Активная составляющая импеданса пьезоэлектрической колебательной системы определяется конструктивной схемой (геометрическими размерами) УЗКС, а также средой в которую вводятся ультразвуковые колебания. Реактивная составляющая

импеданса ультразвуковой колебательной системы определяется размерами и свойствами материала системы (проявляется при работе УЗКС не на резонансной частоте), средой в которую вводятся ультразвуковые колебания. Кроме того реактивная составляющая включает в себя емкостную составляющую, обусловленную диэлектрическими свойствами пьезокерамического материала.

Таким образом для согласования необходимо работать на резонансной частоте УЗКС, при этом выходное активное сопротивление генератора должно быть минимальным для уменьшения рассеяния активной мощности (согласование по напряжению), а реактивные емкостные составляющие системы должны компенсироваться реактивными индуктивными составляющими выходного каскада генератора.

$$\begin{cases} a_G \ll a_{УЗКС} \\ |b_G| = |b_{УЗКС}| \\ f = f_{резонанса} \end{cases} \quad (2)$$

Выше было сказано, что колебательная система, работая на своей резонансной частоте, является электрической активно-емкостной нагрузкой для электронного генератора. Выходное сопротивление электронного генератора, как правило, является чисто активным сопротивлением. Поэтому, для компенсации статической емкости пьезоэлектрического преобразователя используется способ, представленный на Рис. 3. Последовательно с пьезоэлектрическим преобразователем колебательной системы включается дроссель [2]. Индуктивность дросселя выбирается такой, чтобы резонанс электрического последовательного колебательного контура, образованного индуктивностью дросселя и электрической емкостью пьезоэлектрического преобразователя находился на несколько (4-5) кГц выше частоты механического резонанса (резонансной частоты колебательной системы). Неполное согласование частоты электрического контура и частоты механических колебаний выполняется для уменьшения влияния изменений электрической емкости пьезоэлементов преобразователя [5]. Согласования активных составляющих сопротивления выходного каскада генератора и входного сопротивления системы (на резонансной частоте) обеспечивается выходным трансформатором генератора.

Такой способ компенсации электрической емкости позволяет приблизить характер электрической нагрузки, подключаемой к генератору, к активному (при работе на резонансной частоте УЗКС).

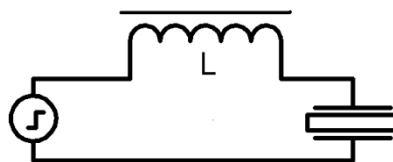


Рис 3. Компенсация статической емкости пьезоэлектрической колебательной системы

Рассмотренный способ согласования имеет существенные недостатки, снижающие эффективность согласования генератора и колебательной системы. Причины невозможности оптимального согласования заключаются в том, что при изменении температуры системы в процессе эксплуатации изменяется электрическая емкость пьезоэлементов, что влечет за собой изменение условия согласования. Кроме того, происходящие в процессе обработки изменения параметров среды (концентрация

растворенных веществ, эмульгирование, диспергирование, набухание (приводящие к изменению вязкости, акустического импеданса, температуры, давления и т.д.) изменяют параметры колебательной системы, что также приводит к изменению условия согласования.



Рис 4. Способ уменьшения влияния изменения статической емкости пьезоэлектрической колебательной системы

Для частичного решения рассмотренной проблемы большинство разработчиков [] УЗ оборудования рекомендуют уменьшать влияние изменений электрической емкости пьезоэлектрического преобразователя за счет использования дополнительной электрической емкости, подключаемой параллельно пьезоэлементам (Рис. 4.) Такой подход позволяет уменьшить влияние изменяющейся собственной электрической емкости преобразователя на положение резонанса электрического колебательного контура, однако компенсировать влияние изменений параметров среды на параметры колебательной системы такой способ обеспечить не может.

Очевидно, что для обеспечения непрерывного согласования ультразвуковой колебательной системы с электронным генератором при всех возможных изменениях параметров системы и среды необходимо изменять индуктивность компенсирующего дросселя.

Далее рассматривается несколько вариантов реализации этого способа согласования.

На Рис. 5 представлен наиболее просто реализуемый способ ступенчатой перестройки параметров согласующего дросселя, выполненного в виде отдельных, последовательно включенных секций. При его реализации изменение индуктивности обеспечивается отключением (замыканием накоротко) необходимого числа дросселей.

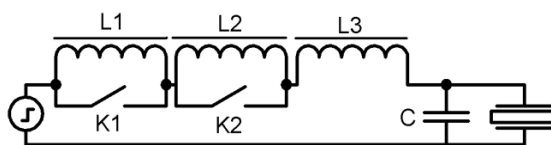


Рис 5. Способ ступенчатой регулировки индуктивности согласующего дросселя.

Такой способ управления индуктивностью не является оптимальным, так как не позволяет производить плавную корректировку в процессе работы .

Второй из возможных вариантов подобного согласования (реализуемый на практике при использовании в составе УЗ аппаратов нескольких колебательных систем) представлен на Рис. 6.

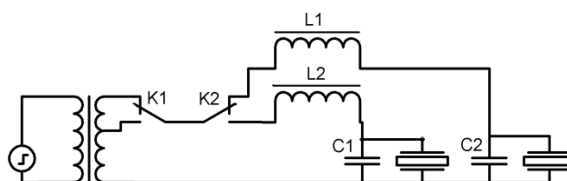


Рис 6. Согласующий контур для подключения двух колебательных систем.

В этом случае каждая колебательная система подключена к своему согласующему звену. Переключение колебательных систем осуществляется контактами реле К2. Реле К1 позволяет изменять напряжение питания колебательной системы при необходимости. Этот способ используется при необходимости подключения к электронному генератору двух колебательных систем с существенно отличающимися параметрами.

На Рис. 7 представлен вариант согласующего звена с перестраиваемым дросселем, позволяющим плавно изменять индуктивность согласующего дросселя в процессе работы.

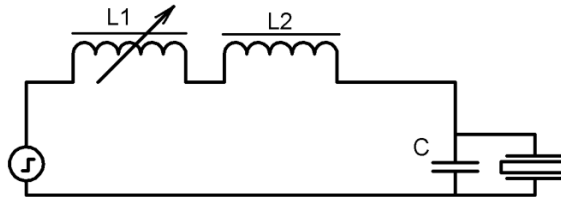


Рис 7. Согласующий контур с перестраиваемым дросселем.

В качестве перестраиваемого дросселя здесь может быть применен дроссель с изменяемым воздушным зазором [3], управляемый шаговым двигателем посредством винтовой передачи (рисунок 8). В конструкции (рисунок 8) использовано два дросселя (включаемых последовательно или параллельно) управляемых одним шаговым двигателем. Металлическая пластина на которой закреплены подвижные части сердечников перемещается по стальным направляющим, что предотвращает перекося и позволяет добиться равномерного изменения зазора магнитопровода во всем диапазоне перестройки. Использование шагового двигателя позволяет управлять индуктивностью дросселя посредством изменения зазора магнитопровода в процессе работы, а также устанавливать минимальный зазор в сердечнике, предотвращая насыщение магнитопровода. Благодаря жёсткой зависимости угла поворота вала двигателя от числа управляющих импульсов нет необходимости в применении датчиков положения подвижных сердечников.

Поскольку изменение значения индуктивности дросселя от величины зазора нелинейно, применение шагового двигателя дает возможность контролировать текущий зазор в сердечнике, а также линеаризовать скорость изменения индуктивности дросселя посредством управления скоростью изменения зазора.

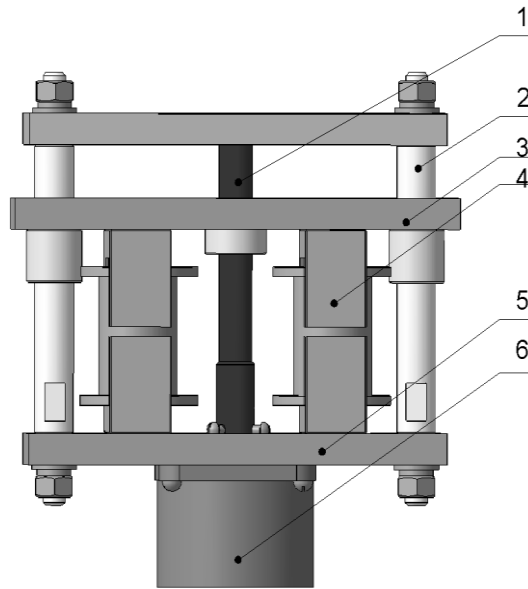


Рисунок 8 – Дроссель с регулируемым зазором

1- перемещающий винт , 2- направляющая, 3- подвижная пластина 4- подвижный ферритовый сердечник, 5- неподвижная пластина (основание), 6- шаговый двигатель.

Применение дросселя с изменяемым зазором в сердечнике в малогабаритных и маломощных аппаратах нецелесообразно из-за малого быстродействия, больших массогабаритных характеристик и относительно большого энергопотребления.

Поэтому, для обеспечения процесса перестройки дросселя при проектировании маломощных УЗ аппаратов (до 1000 ВА) наиболее эффективным является применение дросселей насыщения, в которых индуктивность зависит от тока в обмотке подмагничивания. Работа такого дросселя основана на зависимости величины магнитной проницаемости от величины прикладываемого магнитного поля $\mu = f(H)$ [4].

На рисунке 9 представлена схема дросселя насыщения с последовательным соединением рабочих обмоток.

Как видно из схемы, дроссель состоит из двух дросселей, силовые обмотки которых соединены последовательно, а обмотки подмагничивания соединены встречно, что позволяет в случае идентичности обмоток дросселей избавиться от переменной составляющей в цепи подмагничивания.

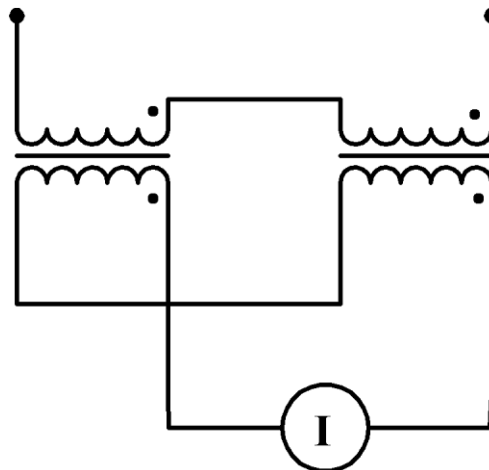


Рисунок 9 дроссель насыщения

Для управления процессом перестройки дросселя необходимо непрерывное получение информации о величине реактивной составляющей импеданса колебательной системы, который необходимо компенсировать. Для практической реализации способа непрерывного контроля и управления процессом компенсации разработан специальный управляющий блок, структурная схема которого представлена на рисунке 10.

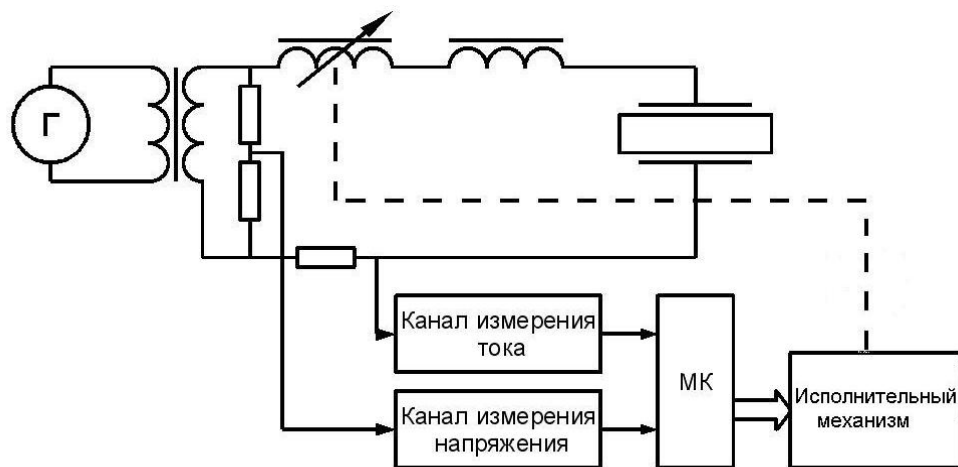


Рисунок 10 Структурная схема управляющего блока

Схема электрическая принципиальная блока управления, предназначенного для работы с дросселем с изменяемым зазором представлена на рисунке 11

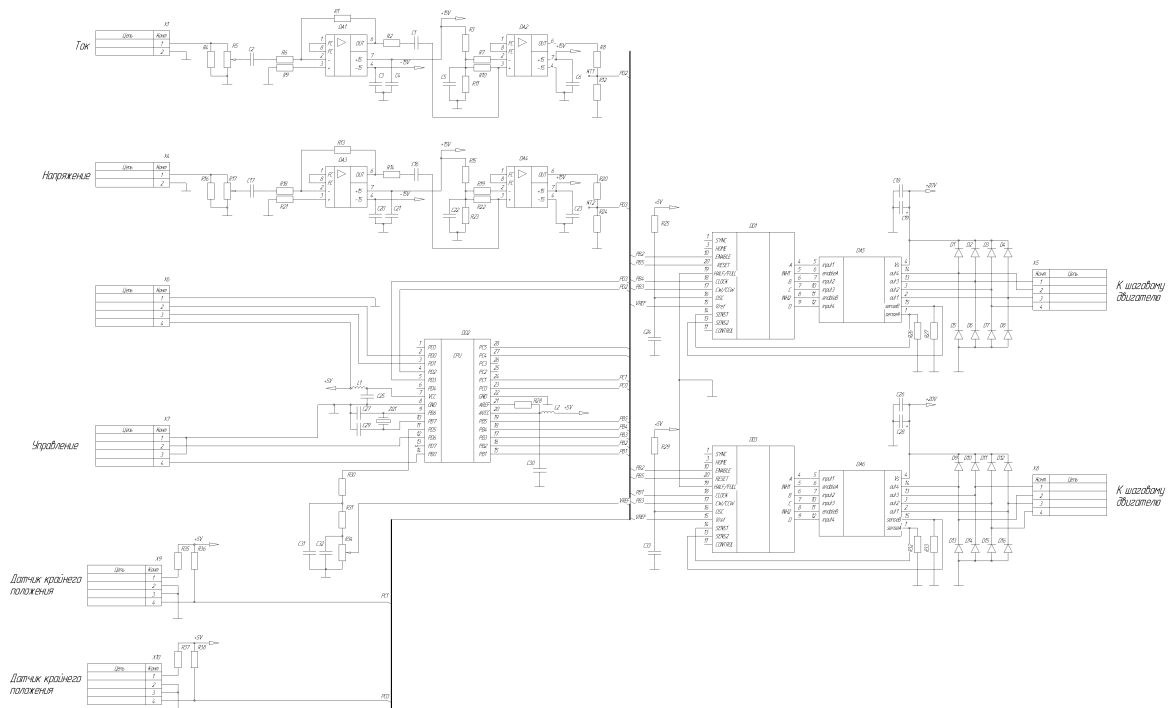


Рисунок 11 Схема электрическая принципиальная блока управления

Блок правления состоит из двух компараторов для канала напряжения и канала тока, управляющего микроконтроллера и драйвера шагового двигателя. На рисунке 12 представлен один из возможных алгоритмов работы управляющего микроконтроллера.

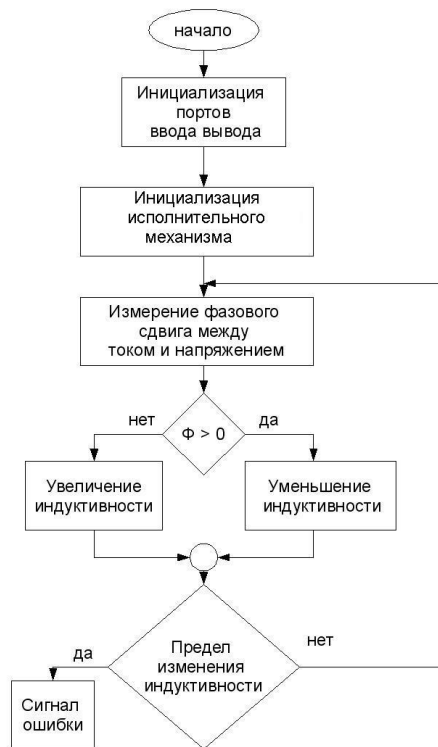


Рисунок 12 Блок схема алгоритма работы блока управления

При инициализации исполнительного механизма происходит последовательное сведение сердечников дросселя и установка начального зазора в сердечниках дросселя. Далее, после разрешения работы системы согласования начинается цикл корректировки индуктивности управляемого дросселя (изменение зазора в сердечники), для этого происходит последовательное измерение фазового сдвига между током в цепи УЗКС и напряжением на входе согласующего устройства. На основании результатов непрерывного контроля принимается решение о направлении и скорости изменения индуктивности. Далее цикл повторяется до запрета работы системы согласования или при достижении предела изменения индуктивности. В последнем случае выдается сигнал об ошибке.

Для экспериментальной проверки эффективности согласования проведен ряд исследований по измерению акустической мощности вводимой в жидкую среду (вода) при фиксированной настройке согласующего контура и при использовании системы корректировки согласующего контура в процессе работы результаты представлены на рисунке 13.

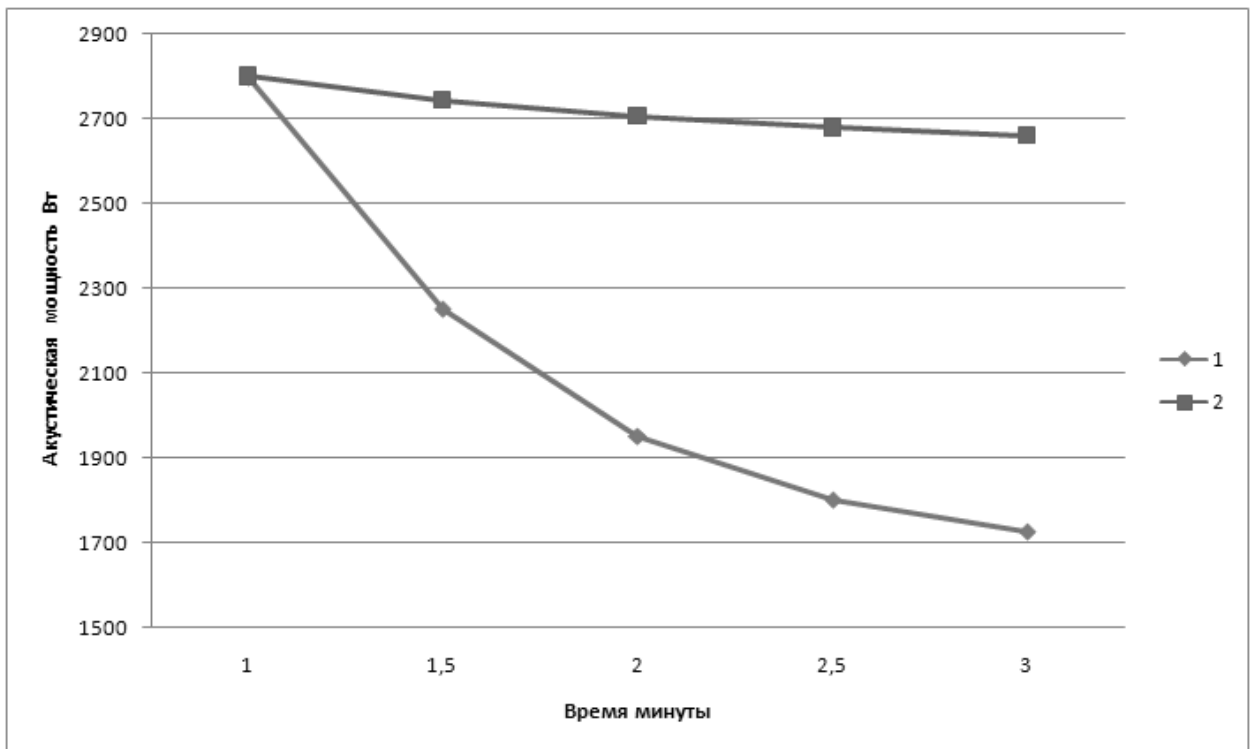


Рисунок 13 - Изменение акустической мощности в процессе реализации технологического процесса при фиксированной настройке согласующего контура (1) и при использовании перестраиваемого согласующего контура (2)

Как следует из представленных зависимостей, вводимая акустическая мощность при фиксированной настройке согласующего контура достаточно быстро снижается, это связано в основном с рассогласованием вызванным изменением температуры пьезоэлектрического преобразователя УЗКС, и изменением свойств обрабатываемой среды. Вместе с тем, при корректировке согласующего контура вводимая с обрабатываемую среду акустическая мощность снижается незначительно. В целом КПД аппарата с корректируемым дросселем возрастает не менее чем на 10-15% по сравнению с ультразвуковыми аппаратами в которых дроссель согласующего контура настроен на некоторое среднее значение.

На рисунке 14 представлены фотографии блока управления и дросселя.

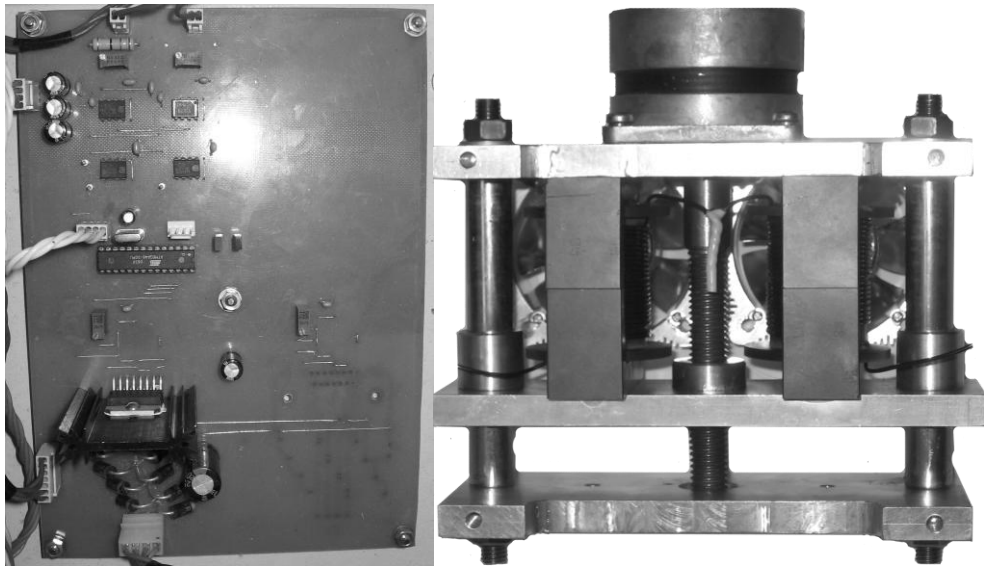


Рисунок 14 элементы системы согласования
Слева блок управления, справа управляемый дроссель с изменяемым зазором.

На рисунке 15 представлены фотография электронного генератора малой мощности, с реализованной в нем системой согласования на основе дросселя насыщения.

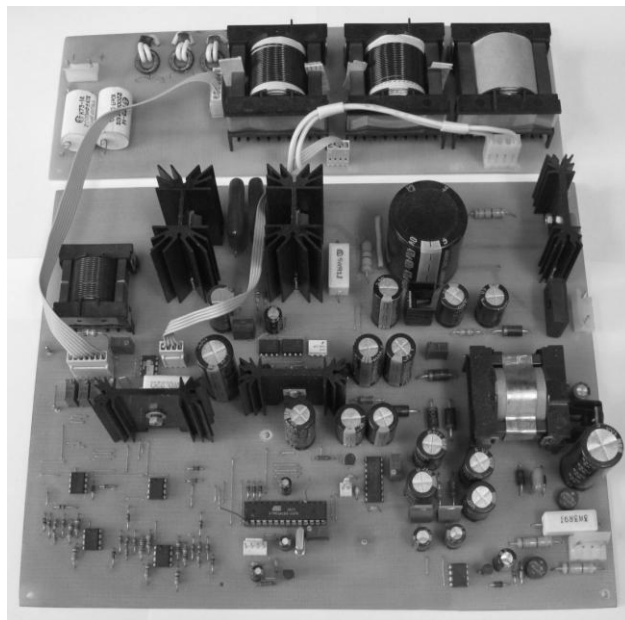


Рисунок 15 Ультразвуковой генератор с системой согласования

Заключение

Разработка системы оптимального согласования выходного сопротивления электронного генератора и входного сопротивления пьезоэлектрической колебательной системы, основанной на реализации непрерывного контроля входных электрических

параметров колебательной системы и непрерывного изменения индуктивности компенсирующего дросселя обеспечила повышение эффективности ультразвукового воздействия при использовании ультразвуковых технологических аппаратов мощностью до 8 кВА при реализации различных технологических процессов за счет:

1. Обеспечения оптимального режима работы выходного каскада генератора путем постоянного приведения импеданса нагрузки к активной величине при изменяющихся режимах работы;
2. Обеспечения оптимальных режимов введения ультразвуковой энергии при любых изменениях в обрабатываемой среде (вязкость, давление, температура);
3. Повышения электроакустического КПД ультразвуковых технологических аппаратов на 10-15%.

Список использованной литературы

- [1] Донской А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки Л.:Энергоиздат, 1982 208с. Ил.
- [2] Зернов Н.В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей / – Л.: Энергия, 1972 – 816 с.
- [3] Vladimir N. Khmelev, Senior Member, IEEE, Roman V. Barsukov, Dmitry V. Genne, Student Member, IEEE "[The self-action agreement system of electronic generator with the piezoelectric oscillatory system](#)" Intrnational Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2007.
- [4] Львов Е. Л. Магнитные усилители в технике автоматического регулирования. М., «Энергия», 1972. 552 с. Ил.
- [5] Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. [Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве.](#) – Алт ГТУ: Бийск 2007 414с.