

# Особенности Согласования Электронных Ультразвуковых Генераторов с Пьезоэлектрическими Колебательными Системами.

Хмелев В.Н., к.т.н., *Senior Member, IEEE*, Барсуков Р.В, к.т.н., Генне Д.Д., *Member, IEEE*,  
Хмелев М.В., *Member, IEEE*

Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»

**Аннотация** — Статья посвящена вопросам согласования электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами при помощи LC схем с перестраиваемыми реактивными элементами.

**Ключевые слова** — Ультразвуковые генераторы, согласующие цепи.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Наряду с выбором рациональных схем генераторов, конструкций колебательных систем, применением новых экономичных материалов для преобразователей и волноводов, немаловажное значение имеет оптимальное согласование системы, состоящей из генератора и колебательной системы, которая излучает ультразвуковую энергию в определенную технологическую среду. Под оптимальным согласованием следует понимать такой режим работы, при котором в нагрузку поступает мощность, близкая к максимальной. Создание высокоэнергетических ультразвуковых установок делает проблему согласования еще более актуальной и острой.

Существующие способы не обеспечивают оптимального согласования электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами, поскольку в процессе работы ультразвукового оборудования меняются параметры как обрабатываемых технологических сред (температура, акустическое сопротивление, давление и т.п.) так и электрические параметры элементов электронного генератора (электрическая емкость пьезоэлектрических элементов колебательной системы, номиналы элементов согласующих цепей).

Далее рассматривается один из способов согласования электронных ультразвуковых генераторов и пьезоэлектрических колебательных систем.

## II. ТЕОРИЯ

Ультразвуковую колебательную систему с пьезоэлектрическим преобразователем, в полосе ее

резонансной частоты, можно представить в виде последовательного колебательного контура [1] (рисунок 1,а). Элемент  $C_0$  определяется емкостью пьезоэлектрических элементов, входящих в состав ультразвуковой колебательной системы. Величина  $C_0$  зависит от количества пьезоэлементов, их геометрических размеров, диэлектрической проницаемости материала, из

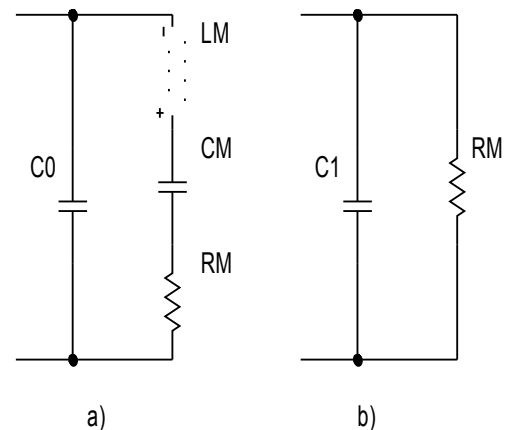


Рис. 1. Электрические схемы замещения колебательных систем с пьезоэлектрическим преобразователем.

которого они изготовлены, и способов их электрического соединения (параллельное, последовательное, параллельно-последовательное). Элементы  $R_M L_M C_M$  образуют механическую ветвь и на резонансной частоте (далее рассматривается только резонансный режим работы колебательной системы) ее сопротивление равно активному (рисунок 1,б).

Из рисунка 1 видно, что входное сопротивление колебательной системы, работающей в резонансном режиме, имеет активно-емкостной характер и определяется следующим выражением:

$$Z = \frac{R_M X_{C_0}}{R_M + X_{C_0}}, \quad (1)$$

где  $X_{C_0}$  - емкостное сопротивление, ветви образованной элементом  $C_0$ .

В общем случае входное сопротивление колебательной системы можно записать в виде следующего выражения:

$$Z = R + X_C, \quad (2)$$

где  $X_C$  - компонента емкостного сопротивления,  $R$  - компонента активного сопротивления.

Поскольку колебательная система подключается к электронному генератору, который имеет собственное выходное сопротивление, необходимо решать вопросы их согласованного подключения. Оптимальным условием согласования электронного генератора и колебательной системы с входным сопротивлением, определяемым выражением (2), является выполнение следующего условия:

$$R + X_C = R_G - X_L, \quad (3)$$

Оптимальным является такой режим работы, при котором частота  $\omega_0$  равна резонансной частоте ультразвуковой колебательной системы. При этом для электронного генератора входное сопротивление ультразвуковой колебательной системы с подключенной индуктивностью является чисто активным.

Для анализа эквивалентной схемы, представленной на рисунке 2,а, преобразуем ее, как показано на рисунке 2,б, при этом значение реактивных элементов остается неизменным, а элемент  $R_M$  преобразуется в элемент  $R_{M1}$ . При этом:

$$R_{M1} = \frac{\rho^2}{R_M}, \quad (5)$$

где  $\rho$  - характеристическое сопротивление электрического колебательного контура образованного элементами  $L$  и  $C_0$ , и определяется как:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C_0}}. \quad (6)$$

Таким образом, для электрического колебательного контура, представленного на рисунке 2,б, работающего в

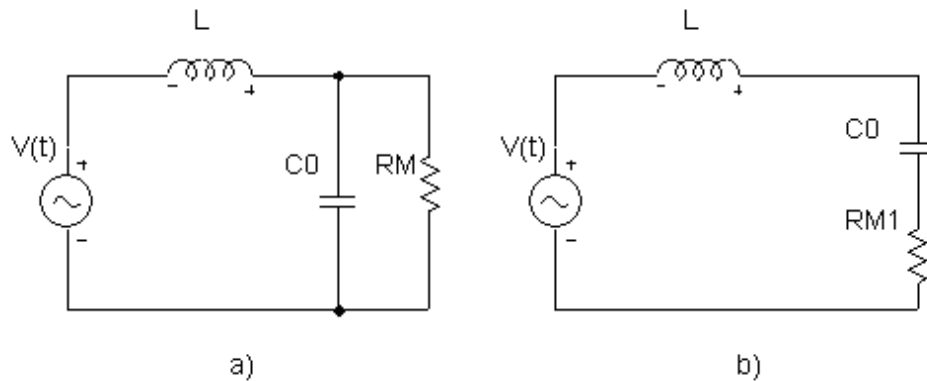


Рис. 2. Один из способов согласования электронных ультразвуковых генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами.

где  $R_G$  - активная составляющая выходного сопротивления электронного генератора,  $X_L$  - индуктивная составляющая выходного сопротивления электронного генератора.

Поскольку выходное сопротивление электронных транзисторных генераторов, оконечные каскады которых работают в режиме переключения, имеет активный характер, то используются подключение дополнительных индуктивных элементов [2], как показано на рисунке 2.

Индуктивность  $L$  образует с емкостью  $C_0$  электрический резонансный контур с собственной частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}. \quad (4)$$

режиме вынужденных колебаний на резонансной частоте ультразвуковой колебательной системы, можно записать следующее уравнение [3]:

$$L \frac{di}{dt} + R_{M1}i + \frac{1}{C_0}q = U_m \cos(\omega_0 t), \quad (7)$$

где  $i$  - ток, протекающий в контуре,  $q$  - электрический заряд,  $U_m$  - амплитуда сигнала источника напряжения  $V(t)$ .

На основе уравнения (7) можно получить выражение для амплитудного значения тока, протекающего в рассматриваемом электрическом контуре:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_{M1}^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C_0}\right)^2}} \quad (8)$$

Ток  $I_m$  принимает максимальное значение в случае выполнения условия  $\omega_0 = \omega_r$ , где  $\omega_r$  - резонансная частота колебательной системы, при этом сдвиг фаз между током  $i$  и напряжением на выходе электронного генератора равен нулю. В случае не выполнения условия  $\omega_0 = \omega_r$  величина  $I_m$  падает, поскольку условия согласования нарушаются.

Помимо согласования,  $LC_0$  контур обладает усилительными свойствами. Его передаточная функция по напряжению (для рисунка 2,а) определяется следующим выражением:

$$K = \frac{\dot{U}_{C_0}}{\dot{U}_G} = -jQ, \quad (9)$$

где  $Q$  - добротность электрического колебательного контура, которая в основном зависит от потерь, вносимых в электрический контур активными полезными и паразитными потерями в ультразвуковой колебательной системе.

Поскольку механическая ветвь  $R_M L_M C_M$  проявляется только в резонансном режиме работы колебательной системы, то параметр  $Q$  является частотнозависимым.

Таким образом, настроенный колебательный  $LC_0$  контур усиливает входное напряжение, поступающее от электронного генератора, причем коэффициент усиления равен  $Q$ .

### III. ОБСУЖДЕНИЕ

Практическое использование рассмотренного выше способа согласования электронных генераторов и пьезоэлектрических колебательных систем указало на ряд недостатков этого способа согласования.

Ниже представлены параметры и условия, влияющие на начальную настройку согласующего контура, а так же параметры и условия, обуславливающие рассогласование согласующего контура в процессе работы УЗ аппарата, что, в конечном счете, снижает эффективность ультразвукового воздействия на технологический объект.

На исходную настройку согласующего контура влияют следующие факторы:

1. Количество пьезокерамических элементов.
2. Геометрические параметры пьезоэлементов.
3. Способы электрического соединения пьезоэлементов.
4. Начальная температура окружающей среды.
5. Диэлектрические свойства материала пьезокерамики.

6. Суммарная электрическая емкость проводников, объединяющих колебательную систему с электронным генератором  $C_W$ .

7. Наличие дополнительной электрической емкости, подключенной параллельно пьезокерамическим элементам  $C_{ADD}$ .

8. Исходная (при нормальных начальных тепловых условиях) резонансная частота колебательной системы, которая воздействует на определенную технологическую среду в режиме малых колебаний (до 3 мкм).

9. Индуктивная и емкостная компоненты выходного сопротивления электронного генератора.

Предварительный расчет согласующей индуктивности  $L$  осуществляется при помощи выражения (4), в котором элемент  $C_0$  объединяет собой суммарную входную электрическую емкость колебательной системы с учетом емкости соединительных проводов  $C_W$  и дополнительно подключенных емкостей  $C_{ADD}$ .

В процессе ультразвукового воздействия на технологический объект эффективность ультразвукового воздействия на объект снижается. Это связано с нижеследующими факторами и условиями, а именно:

1. Происходит изменение резонансной частоты колебательной системы, которая зависит от ее температуры, свойств обрабатываемых сред (акустические свойства обрабатываемой среды так же могут изменяться в процессе УЗ воздействия), режима работы колебательной системы (режимы малых, средних, больших амплитуд механических колебаний).
2. Происходит изменение диэлектрической проницаемости (следовательно, и электрической емкости) материала пьезокерамических элементов.
3. Происходит изменение частоты электронного генератора, обусловленное работой системы АПЧ, которая непрерывно отслеживает изменение резонансной колебательной системы.

Все это обуславливает необходимость корректировки, в процессе работы ультразвукового аппарата, согласующей индуктивности  $L$ .

Для практических расчетов элементов согласующего звена рассмотрим более полную схему согласования, представленную на рисунке 3. Источник синусоидального или прямоугольного напряжения  $V(t)$  посредством трансформатора TR подключается к согласующей LC схеме. Трансформатор TR, кроме гальванической развязки цепей электронного генератора и колебательной системы, выполняет так же роль согласующего элемента, согласуя активные выходное и входное сопротивления электронного генератора и колебательной системы соответственно.

Для автоматизации процесса расчета параметров согласующего звена была разработана программа, диалоговое окно которой представлено на рисунке 4.

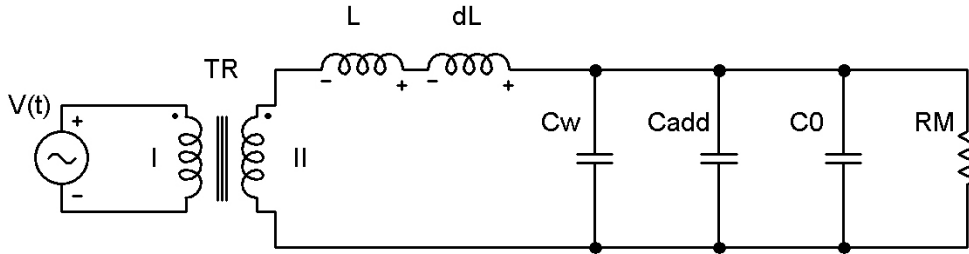


Рис. 3. Полная схема согласующего звена.

В качестве исходных параметров указывается начальная резонансная частота колебательной системы, диапазон ее возможной девиации, диапазон рабочих температур, емкость соединительных проводников, величина добавочной емкости (при наличии таковой), начальная электрическая емкость пьезоэлементов, тип используемой пьезокерамики, среднееквадратичное значение выходного напряжения электронного генератора, активное входное сопротивление колебательной системы на ее резонансной частоте в режиме номинальной нагрузки, требуемая выходная мощность, сечение трансформатора TR.

#### IV.3 АКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика была опробована при расчете элементов согласующего звена ультразвукового аппарата для обработки жидких сред «Булава» [4] мощностью 3000 Вт.

Поскольку для оптимального согласования



Рис. 5. Adjustable inductance with a changeable clearance in the magnetic core.

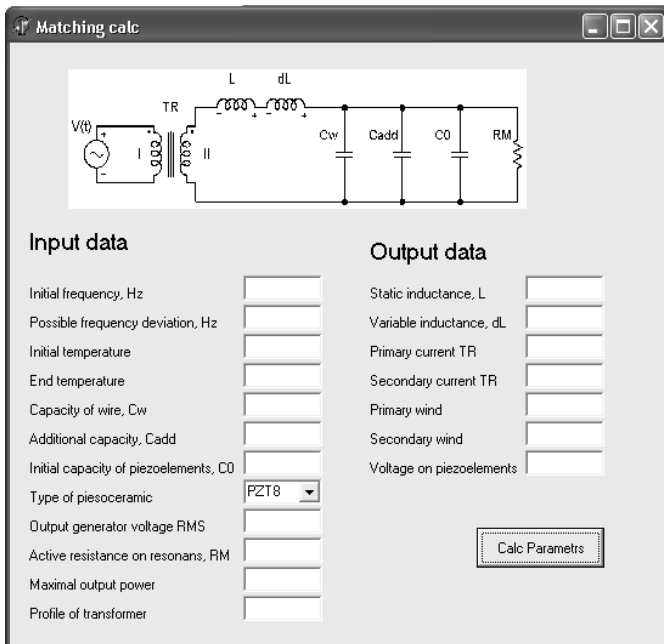


Рис. 4. Диалоговое окно программы для расчета элементов согласующего звена

В качестве выходных параметров выступают величина статической индуктивности  $L$ , диапазон изменения индуктивности переменного индуктивного элемента  $dL$ , количество витков трансформатора TR, ток в первичной и вторичной цепи трансформатора TR, напряжение на пьезоэлектрических элементах колебательной системы.

электронного генератора и пьезоэлектрической колебательной системы в процессе работы УЗ аппарата необходимо корректировать индуктивность в некотором диапазоне, был разработан механизм, представляющий собой управляемый индуктивный элемент, внешний вид которого представлен на рисунке 5.

Был разработан специальный контроллер, встраиваемый в ультразвуковой технологический аппарат, позволяющий контролировать условия согласования электронного генератора с колебательной системой, и подстраивать соответствующим образом индуктивность  $dL$ .

Критерием настройки согласующего звена является равенство нулю сдвига фаз между током и напряжением на выходе генератора.

Система управления, в процессе работы ультразвукового генератора, независимо от работы других электронных систем (система АПЧ, система управления мощностью) непрерывно осуществляет измерение фазового сдвига, вырабатывает управляющие сигналы для драйвера двигателя, управляя тем самым зазором в

магнитопроводе сердечника перестраиваемого индуктивного элемента согласующего модуля.

Процесс корректировки элементов согласующего звена продолжается до тех пор, пока не наступит установившийся тепловой режим работы колебательной системы и стационарный режим УЗ воздействия. В случае нестационарных процессов, происходящих в обрабатываемой среде в непосредственной близости от излучающей поверхности, процесс корректировки параметров согласующего звена не прекращается.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пьезоэлектрические преобразователи: Справочник/ Под. Ред. Пугачева.- Л.: Судостроение, 1984.-256с.
- [2] Piezoelectric transducers modeling and characnerization Miodrag Prokic Published 2004 in Switzerland by MPI.
- [3] Н. В. Зернов, В.Г. Карпов Теория радиотехнических цепей / – Л.: Энергия, 1972 – 816 с.
- [4] Аппарат ультразвуковой технологический «Булава» <http://ultrasonic.ru/devices/bulava.shtml>.