

---

---

## ТЕХНОЛОГІЯ РАДІОАПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.647.23

### ВЫБОР КРИТЕРИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ РЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Мовчанюк А.В., к.т.н., доцент,  
Антипенко Р.В., к.т.н., доцент,  
Семинский А.О., к.т.н., доцент,*

*Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина*

#### Введение

На сегодняшний день ультразвуковые технологии нашли самое широкое применение при производстве радиоэлектронной аппаратуры. К ним можно отнести ультразвуковую кавитационную очистку деталей и печатных плат от остатков флюса [1], раскройку кремниевых заготовок при производстве полупроводниковых компонентов [2], ультразвуковую сварку [3] и многое другое.

Ультразвуковое технологическое оборудование состоит (рис.1) из ультразвукового преобразователя, который работает в резонансном режиме и ультразвукового генератора, который преобразует энергию источника питания в электрическое напряжение с частотой близкой или равной резонансной частоте ультразвукового преобразователя. Так же ультразвуковой генератор поддерживает амплитуду колебаний ультразвукового преобразователя на заданном уровне и (или) в заданных пределах, которые определяются требованиями технологического процесса.

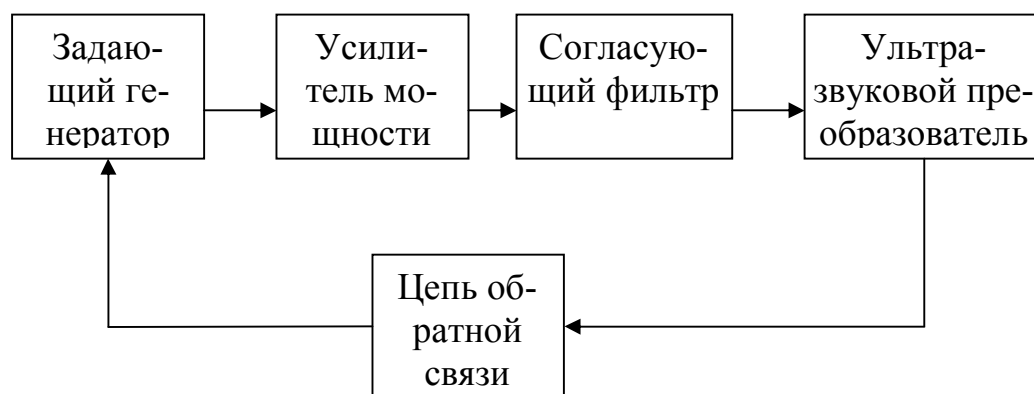


Рис.1. Обобщённая структурная схема ультразвуковой технологической установки

Ультразвуковые генераторы можно условно разделить на генераторы с ударным возбуждением, генераторы с внешним возбуждением и генерато-

ры с обратной связью [4]. Следует отметить, что генераторы с ударным возбуждением в основном применяются в установках предотвращения инкрустирования трубопроводов и на сегодняшний день уже практически не используются в технологическом оборудовании, в связи с плохой контролируемостью параметров технологического процесса. Однако, они нашли применение в ультразвуковой измерительной технике.

Ультразвуковые генераторы с внешним возбуждением широко применяются в технологическом оборудовании для ультразвуковой очистки. Это связано с тем, что для ультразвуковой очистки используются преобразователи с малой добротностью, а, следовательно, относительно широкой рабочей полосой. Небольшие отклонения от резонансной частоты могут быть скомпенсированы введением частотной модуляции сигнала задающего генератора [5].

На сегодняшний день наиболее универсальными являются ультразвуковые генераторы с обратной связью, которые способны поддерживать резонансный режим работы ультразвуковых преобразователей. Они не требуют вмешательства оператора при изменении параметров технологического процесса и компенсируют изменение акустических параметров ультразвукового преобразователя.

Целью статьи является анализ возможных схем построения ультразвуковых генераторов с обратной связью и выбора критерия поддержания резонансного режима работы ультразвукового преобразователя.

#### Анализ схем и выбор критерия поддержания резонансного режима

Рассмотрим эквивалентную схему ультразвукового преобразователя, построенную методом электромеханических аналогий в окрестностях частоты основного резонанса (рис.2) [6]. Эквивалентная схема состоит из двух ветвей – электрической и механической.

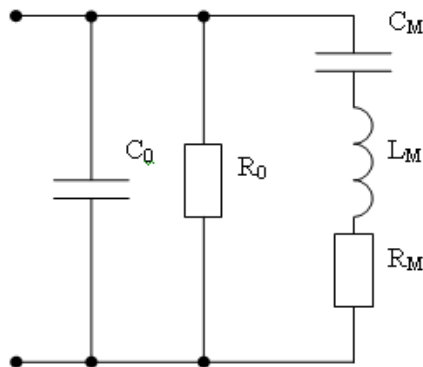


Рис.2. Схема замещения ультразвукового преобразователя

$C_0$  – статическая электрическая емкость;  
 $R_0$  – сопротивление электрических потерь;  
 $C_M$  – механическая емкость, пропорциональная жесткости;  
 $L_M$  – механическая индуктивность, пропорциональная упругости;  
 $R_M$  – сопротивление механических потерь)

Как известно, резонансный режим работы будет соответствовать случаю, когда частота внешнего воздействия будет совпадать с собственной частотой резонансной ультразвуковой колебательной системы. При этом ультразвуковой преобразователь может работать на последовательном или параллельном резонансе. Для ультразвукового оборудования технологиче-

ского назначения наиболее часто используют работу преобразователя на последовательном резонансе. При этом можно использовать низкие питающие напряжения и преобразователь хорошо согласовывается с низким выходным сопротивлением ультразвуковых генераторов на транзисторах.

При последовательном резонансе реактивные сопротивления механической ветви  $L_M$  и  $C_M$  взаимно компенсируют друг друга. С электрической точки зрения преобразователь может рассматриваться как параллельно включенные статическая емкость  $C_0$  и механическое сопротивление  $R_M$ . Следует отметить, что за счет влияния технологической среды, изменения вносимого сопротивления нагрузки, температурного дрейфа пьезоэлементов все параметры схемы замещения изменяются при работе технологической установки, а, следовательно, изменяется и рабочая частота ультразвукового преобразователя. Для компенсации изменения параметров преобразователя вводят систему автоматической подстройки частоты ультразвукового генератора.

В связи с тем, что условием резонансного режима работы является совпадение собственной частоты ультразвукового преобразователя и частоты напряжения, поступающего от ультразвукового генератора, необходимо рассмотреть, по каким косвенным признакам можно определить наличие резонансного режима работы.

Для параллельного резонанса ультразвукового преобразователя происходит полная компенсация реактивных сопротивлений и сдвиг фаз между током и напряжением равняется нулю. Для последовательного резонанса компенсируется реактивное сопротивление механической ветви - входное сопротивление носит активно-емкостной характер. Для компенсации реактивной составляющей тока используют корректирующие LC-фильтры. Однако, такое техническое решение можно использовать в системах, где не происходит значительного изменения активного сопротивления механической ветви, например, в системах ультразвуковой очистки.

Для выделения сигнала обратной связи для системы ФАПЧ используют мостовые схемы, в которых происходит компенсация емкостного сопротивления электрической ветви (рис.3).

При этом трансформатор  $T_1$  играет роль токового дифференциального трансформатора на котором происходит вычитание из тока протекающего через  $VQ1$  составляющей, определяемой статической емкостью преобразователя. Так для симметричных первичных обмоток  $T_1$  добавочная емкость  $C_0$ , включаемая в одно из плеч моста, должна быть равна статической емкости преобразователя. На вторичной обмотке трансформатора  $T_1$  выделяется сигнал, пропорциональный току через механическую ветвь преобразователя. Следовательно, для поддержания резонансного режима работы преобразователя достаточно поддерживать нулевой сдвиг фаз между сигналом от УЗГ и сигналом обратной связи.

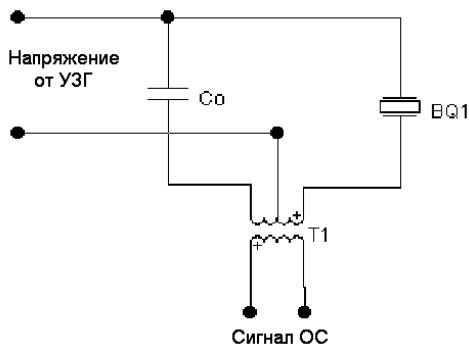


Рис.3. Мостовая схема выделения сигнала обратной связи

Известна разновидность рассмотренной схемы, в которой мостовая схема выделения сигнала обратной связи объединена с корректирующим LC фильтром. Однако, как отмечалось, данный подход является весьма чувствительным к изменению статической емкости преобразователя, например, вследствие изменения температуры пьезоэлемента. Тем не менее, данное техническое решение на сегодняшний день является одним

из самых распространенных.

Весьма перспективным является использование систем прямого цифрового синтеза DDS для формирования сигнала возбуждения ультразвукового преобразователя. В связи с тем, что управление интегральными схемами DDS осуществляется с помощью цифрового кода, существующие подходы для построения систем ФАПЧ не всегда являются рациональными. Так, например, интегральная схема под управлением микроконтроллера может рассматриваться в виде задающего генератора (рис.1). При этом сигнал рассогласования с фазового детектора после АЦП может рассматриваться как управляющий сигнал рассогласования. При этом сохраняется достаточно сильное влияние статической емкости пьезоэлементов, подверженных температурному дрейфу, что не всегда приемлемо.

Наличие в системе микроконтроллера с АЦП открывает новые возможности по выбору критерия поддержания резонансного режима преобразователя. Например, для последовательного резонанса достаточно поддерживать максимальный ток через преобразователь. В случае если в системе ультразвукового генератора предусмотрена регулировка и (или) поддержание амплитуды колебаний преобразователя возможно поддержания режима работы с максимальной потребляемой мощностью. При этом необходимо одновременное измерение тока через преобразователь (рис.3) и питающего напряжения выходного каскада ультразвукового генератора. Следует отметить, что дифференциальный трансформатор может быть заменен токовым, что снизит реактивные токи через выходной каскад ультразвукового генератора. При выборе критерия максимальной мощности или максимального тока дрейф статической емкости преобразователя практически не будет сказываться.

### Выводы

При построении схем ультразвуковых генераторов технологического назначения с системой автоматического поддержания резонансного режима работы возможен выбор нескольких вариантов выделения и обработки

сигналов обратной связи. При этом выбор критерия поддержания резонансного режима работы полностью подчинен выбранной структуре ультразвукового генератора. Так, для систем ФАПЧ целесообразно поддерживать нулевой сдвиг фаз между током и напряжением на ультразвуковом преобразователе при условии компенсации статической емкости. При использовании систем с DDS целесообразно в качестве параметров использовать либо абсолютное значение тока через преобразователь, либо абсолютное значение потребляемой им мощности.

### Литература

1. Попилов Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. Л., «Машиностроение», 1971 г., 544 с.
2. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. М., «Наука», 1970. 688 с.
3. Холпов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов.- Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1988.-224 с.
4. Донской А.В. и др. Ультразвуковые электротехнологические установки / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш./ Л.: Энергоиздат. Ленинград. отд-ние, 1982.-208с.
5. А.Ф. Луговской, А.В. Мовчанюк, В.И. Чорный, М.Ф. Омелич, И.Н.. Берник Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной очистки в ваннах малого объема // Промислова гідравліка і пневматика. - № 1 (15), 2007,с. 40-43
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

*Мовчанюк А.В., Антипенко Р.В., Семінський О.О. Вибір критерію підтримки резонансного режиму роботи п'єзоперетворювача* Проведено аналіз можливих схем побудови ультразвукових генераторів із зворотним зв'язком, обґрунтовано вибір критерію підтримки резонансного режиму роботи ультразвукового перетворювача

**Ключові слова:** ультразвук, п'єзоперетворювач, генератор, резонансний режим

*Мовчанюк А.В., Антипенко Р.В., Семинский А.О. Выбор критерия поддержания резонансного режима работы пьезопреобразователя* Проведен анализ возможных схем построения ультразвуковых генераторов с обратной связью, обоснован выбор критерия поддержания резонансного режима работы ультразвукового преобразователя.

**Ключевые слова:** ультразвук, пьезопреобразователь, генератор, резонансный режим

*Movtchanjuk A.V., Antypenko R.V., Seminskyj O.O. Choice of maintaining the resonant mode piezoelectric transducer* Analyzed the possible schemes for constructing ultrasonic generators with feedback, justified the choice of maintaining the resonant mode ultrasonic transducer

**Key words:** ultrasonics, piezoelectric transducer, oscillator, resonant mode