

# К Вопросу Согласования Электронных Генераторов и Ультразвуковых Колебательных Систем С Излучателями, Работающими в Режиме Изгибных Колебаний

Владимир Н. Хмелев, *Senior Member, IEEE*, Игорь И. Савин, Абраменко Д.С.  
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им И.И. Ползунова

**Аннотация** – Настоящая статья продолжает цикл работ, направленных на достижения максимальной энергетической эффективности ультразвукового воздействия на различные технологические среды за счет оптимизации согласования электронных генераторов и ультразвуковых колебательных систем. В статье рассматривается расчетная модель, описывающая зависимость полного входного электрического сопротивления ультразвуковой колебательной системы с излучателем, работающим в режиме изгибных колебаний от параметров технологической среды.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие ультразвуковых технологий требует совершенствования техники генерации и излучения ультразвуковых колебаний. В последнее время, как в России, так и за рубежом четко прослеживается тенденция перехода от экстенсивного развития ультразвуковой техники, когда увеличение энергии генерируемых колебаний достигается за счет масштабирования аппаратуры, к интенсивному развитию, заключающемуся в повышении энергетической эффективности аппаратуры.

В работах, опубликованных авторами ранее [1,2], указывалось, что важнейшим условием для достижения максимальной энергетической эффективности ультразвукового аппарата является оптимальное согласование компонентов его электроакустической системы между собой, равно как и с технологической средой.

В этих работах рассматривались вопросы оптимизации согласования применительно к ультразвуковой аппаратуре, содержащей пьезоэлектрические ультразвуковые

колебательные системы, работающие в режиме продольных колебаний.

В тоже время, ряд технологических процессов, связанных с вводом колебаний в среды с малым акустическим сопротивлением (газовые среды, жидкие среды в условиях развитой кавитации) могут эффективно реализовываться только при использовании ультразвуковых излучателей, работающих в режиме изгибных колебаний.

Общие принципы согласования всех типов электроакустических преобразователей с технологической средой и электронным генератором едины. Но при этом зависимости входного электрического сопротивления от параметров технологической среды для ультразвуковых колебательных систем с различными типами излучателей неодинаковы.

Это обстоятельство обусловило необходимость создания расчетной модели, описывающей зависимость входного электрического сопротивления от параметров технологической среды для ультразвуковой колебательной системы с излучателем, работающим в режиме изгибных колебаний.

## I. ОСОБЕННОСТИ ВВОДА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ С МАЛЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Технологические среды с малым акустическим сопротивлением, прежде всего газообразные используются в процессах сушки, гашения пены, акустической коагуляции и др.

Такие среды являются наиболее сложными с точки зрения ввода в них акустических

колебаний, генерируемых твердотельными преобразователями (пьезоэлектрическими, магнетострикционными).

Известно, что коэффициент выхода энергии акустических колебаний из одной среды в другую есть отношение акустических сопротивлений двух сред.

Так, например, акустическое сопротивление воздушной среды составляет  $r_1 = 442 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Акустическое сопротивление титана в режиме продольных колебаний составляет

$r_2 = 22 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Очевидно, что коэффициент выхода энергии продольных колебаний из титанового волновода в воздушную среду составляет всего 0,02%. То есть, для создания в воздушной среде колебаний с интенсивностью даже 140 дБ (нижний порог для осуществления процесса сушки), что соответствует  $100 \text{ Вт/м}^2$ , в титановом волноводе потребуется создать колебания с интенсивностью  $2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  ( $2000 \text{ Вт/см}^2$ ), что превышает предел усталостной прочности металла.

Линейный размер излучающей поверхности волновода, совершающего продольные колебания также ограничен, и на практике не превышает  $1/10$ - $1/7$  длины волны в материале волновода. Соответственно, площадь излучающей поверхности также ограничена. Например, для титанового волновода, работающего в режиме продольных колебаний на частоте 22 кГц длина волны составляет 240 мм. Диаметр излучающей поверхности, как правило не превышает 35 мм. Площадь излучающей поверхности составляет  $0,001 \text{ м}^2$ . Таким образом, мощность излучения акустических колебаний в воздух составит всего 0,1 Вт, при том, что потери энергии на внутреннее трение в материале волновода составят не менее 50 Вт.

Применение излучателей, работающих в режиме изгибных колебаний, позволяет преодолевать указанные выше трудности.

Во-первых, акустическое сопротивление металлов, в режиме изгибных колебаний в 10-1000 раз (в зависимости от толщины металла) меньше чем в режиме продольных колебаний. Соответственно, во столько же раз увеличивается коэффициент выхода энергии колебаний.

Во-вторых, площадь излучателей, работающих в режиме изгибных колебаний практически не ограничена – могут быть созданы излучатели, имеющие площадь до нескольких квадратных метров.

В самом простом случае излучатель, работающий в режиме изгибных колебаний – пластина или диск, возбуждаемые ультразвуковой колебательной системой продольных колебаний.

В тоже время, такие излучатели имеют существенный недостаток – колебания различных участков поверхности происходят в противоположных фазах. Это приводит к тому, что излучение, создаваемое различными участками поверхности взаимно компенсируется на расстоянии в несколько длин волн от излучателя.

Известны два способа устранения этого недостатка. Первый способ заключается в увеличении толщины металла участков, совершающих колебания в противофазе. Акустическое сопротивление этих участков увеличивается и интенсивность излучения с них падает. В результате полной компенсации излучения, создаваемого различными участками уже не происходит. Сам излучатель выполняется ступенчато переменного сечения.

Второй способ также связан с увеличением толщины металла в зонах, совершающих колебания в противофазе. За счет этого удается сместить излучающую поверхность участков, совершающих противофазные колебания на расстояние, равное половине длины волны, излучаемой в среду. В результате излучение волн со всей поверхности происходит в одной фазе.

Излучатели, работающие в режиме изгибных колебаний, позволяют вводить в технологические среды с малым акустическим сопротивлением акустические колебания значительной мощности. В настоящее время известны излучатели мощностью до 3 кВт при к.п.д., достигающем 60% [3]. Однако, для достижения столь высоких показателей необходимо выполнять условие оптимального электрического согласования излучателя и электронного генератора в условиях изменения свойств технологической среды.

Для этого необходима расчетная модель излучателя, работающего в режиме изгибных колебаний, совместно с возбуждающей его колебательной системой как электрической нагрузки электронного генератора.

## II. ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ

На рисунке 1 представлено поперечное сечение излучателя, работающего в режиме изгибных колебаний, возбуждаемого пьезоэлектрической ультразвуковой

колебательной системой, работающей в режиме продольных колебаний.

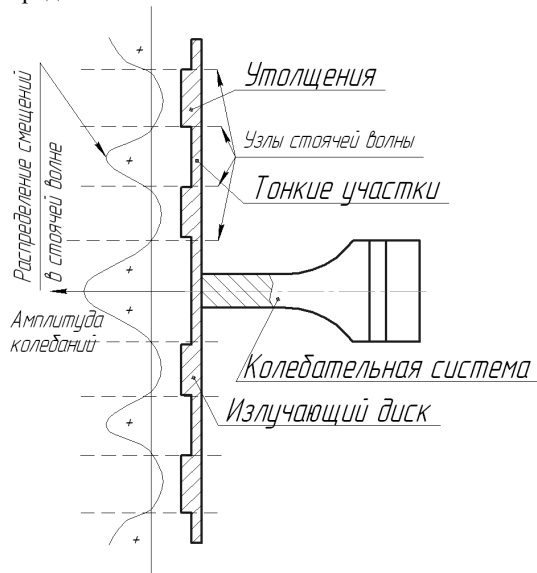


Рисунок 1 – Поперечное сечение излучателя, работающего в режиме изгибных колебаний

На рисунке 1 также показано распределение амплитуды колебательных смещений в изгибной стоячей волне.

Для обеспечения эффективной работы излучателя, при его проектировании стремятся выполнить расположение и ширину канавок и утолщений таким образом, чтобы узлы стоячей волны (при работе излучателя на расчетной частоте) располагались в зонах перехода от канавки к утолщению.

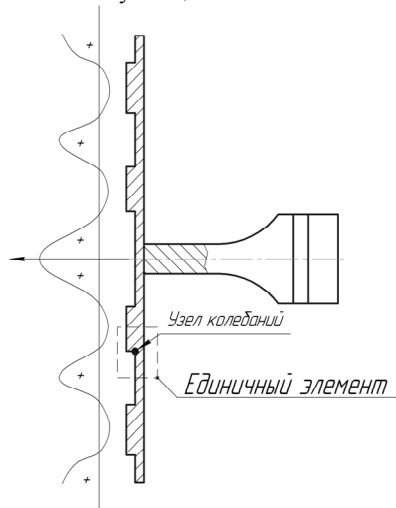


Рисунок 2 – Разбиение излучателя на единичные полуволновые элементы

Как видно из распределения амплитуд колебательных смещений в стоячей изгибной волне, излучатель может быть представлен как система, состоящая из симметрично

состыкованных единичных элементов, как это показано на рисунке 2.

Каждый единичный полуволновой элемент включает в себя половину канавки и половину утолщения. Края единичных элементов совершают колебания относительно центров, которыми являются узлы стоячей волны.

При работе излучателя на основной собственной частоте, единичный элемент может быть заменен эквивалентной ему механической системой с сосредоточенными параметрами, схема которой представлена на рисунке 3.

В эквивалентной механической схеме, представленной на рисунке 3 сосредоточенная масса  $m1$  является эквивалентом колеблющейся массы канавки, сосредоточенная масса  $m2$  – эквивалентом колеблющейся массы утолщения, сосредоточенная жесткость  $k1$  – эквивалент колебательной жесткости канавки, сосредоточенная жесткость  $k2$  – эквивалент колебательной жесткости утолщения.

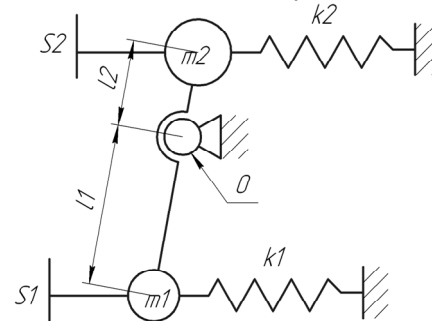


Рисунок 3 – Эквивалентная механическая система единичного элемента

Сосредоточенные поршни  $S1$  и  $S2$  являются эквивалентами поверхности излучения канавки и утолщения соответственно. Плечи рычага  $l1$  и  $l2$  определяют соотношение колебательных скоростей середины канавки и середины утолщения и не имеют прямой связи с геометрическими размерами этих элементов. Трение в опоре «O» является эквивалентом потерь энергии колебаний на внутреннее трение в материале излучателя.

Собственные частоты систем  $m1k1$  и  $m2k2$  должны быть равны. С учетом соотношения колебательных скоростей плеч рычага:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{l_2^2}{l_1^2}. \quad (1)$$

В эквивалентной механической схеме поршни  $S1$  и  $S2$ , площади которых равны соответственно половине площади канавки и площади утолщения, закреплены в точках максимальной колебательной скорости. Для обеспечения переносимости результатов на реальный излучатель, колебательная скорость эквивалентных поршней принимается равной

действующему значению колебательной скорости по поверхности канавки/углубления реального излучателя.

Так как в реальном излучателе колебательная скорость по поверхности участков излучателя распределена по закону, близкому к гармоническому, соотношение действующего значения колебательной скорости на участке излучателя и ее амплитудного значения на этом же участке соотносятся как:

$$X = \sqrt{2} \cdot X_a. \quad (2)$$

где  $X$  - действующее значение колебательной скорости,  $X_a$  - амплитудное значение колебательной скорости.

На рисунке 4 представлена схема электрического аналога единичного элемента излучателя.

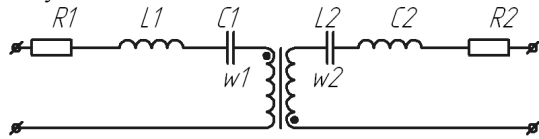


Рисунок 4 – Схема электрического аналога единичного элемента

Здесь  $L_1$  - эквивалент массы канавки,  $L_2$  - эквивалент массы утолщения,  $\tilde{N}_1$  - эквивалент гибкости канавки,  $\tilde{N}_2$  - эквивалент гибкости утолщения. Под гибкостью в данном случае понимается величина, обратная жесткости.  $R_1$  - эквивалент механических потерь на участке канавки,  $R_2$  - эквивалент механических потерь на участке утолщения.

Трансформатор является эквивалентом рычага. Количество витков его обмоток соотносятся также как плечи рычага.

На рисунке 5 представлена общая эквивалентная схема ультразвуковой колебательной системы с излучателем, работающим в режиме изгибных колебаний и нагруженным на технологическую среду.

На эквивалентной схеме излучателя присутствует входной участок с параметрами  $L_3$ ,  $C_3$ ,  $R_3$ . В общем случае они могут отличаться как от параметров канавок, так и от параметров выступов, что необходимо для оптимального согласования излучателя с ультразвуковой колебательной системой. В эквивалентной схеме это представлено трансформатором  $T_0$  с числом витков обмоток  $w_3$  и  $w_2$ . Ультразвуковая колебательная система представлена параметрами  $L_4$  (эквивалентная масса),  $C_4$  (эквивалентная гибкость),  $R_4$  (эквивалентное сопротивление потерь). Емкостная составляющая эквивалентного сопротивления среды обычно много меньше

индуктивной составляющей, поэтому, емкость  $C_0$  из расчетов может быть исключена. Все трансформаторы в эквивалентной схеме идеальные.

Собственная электрическая емкость пьезоэлектрического элемента представлена емкостью  $C_e$ .

Технологическая среда представлена элементами  $L_0$  (эквивалент плотности среды),  $C_0$  (эквивалент гибкости среды),  $R_0$  (эквивалент волнового сопротивления среды). Коэффициенты трансформации  $S_1 - S_N$  учитывают площади канавок и утолщений.  $N$  - общее количество излучающих участков, включая входной.  $N=K+G+1$ , где  $K$  - количество канавок,  $G$  - количество утолщений. Трансформатор  $TM$  - является эквивалентом пьезоэлектрического преобразователя.

Коэффициент трансформации идеального трансформатора  $TM$  определяется выражением:

$$M = \frac{d_{31} \cdot s_{33} \cdot S_e}{H_e}, \quad (3)$$

где  $d_{31}$  - пьезомодуль,  $s_{33}$  - модуль упругости пьезоэлектрика,  $S_e$  - площадь пьезоэлементов,  $H_e$  - толщина пьезоэлементов.

Коэффициенты трансформации идеальных трансформаторов  $TS_2-TSN$  определяются выражением:

$$S_i = \left( \frac{s_i}{s_1} \right)^2 \quad (4)$$

где  $i=1..N$  - номер участка, начиная от входного,  $s_i$  - площадь  $i$ -го участка,  $s_1$  - площадь входного участка.

Эквивалентное сопротивление  $R_0$ , связанное с волновым сопротивлением среды определяется выражением.

$$R_0 = r_0 c_0 s_1 \quad (5)$$

При работе излучателя в газовых средах, а также в жидких средах в режиме кавитации эквивалентной индуктивностью  $L_0$  можно пренебречь [4].

При работе излучателя в жидких средах без кавитации, эквивалентная индуктивность  $L_0$  будет определяться выражением

$$L_0 = r_0 c_0 s_1 \frac{l_s}{f} \quad (6)$$

где  $l_s = 0,5...1$ , коэффициент, учитывающий режим акустического воздействия на жидкую среду,  $f$  - частота колебаний, генерируемых излучателем.

Эквивалентная индуктивность, приведенная к входу ультразвуковой колебательной системы равна :

$$L = \frac{1}{M^2} (L_4 + L_3 + \frac{w_3^2}{w_2^2} (2KL_1 + 2GL_2 \frac{w_2^2}{w_1^2} + \sum_{i=1}^K S_{2K} L_0 + \sum_{j=1}^G S_{1+2(j-1)} L_0 \frac{w_2^2}{w_1^2})) \quad (7)$$

где  $M$  – коэффициент трансформации трансформатора ТМ.

С учетом того, что:

$$w_1^2 / w_2^2 = L_2 / L_1, \quad (8)$$

выражение (3) может быть переписано в виде:

$$L = L_4 + L_3 + \frac{w_3^2}{w_2^2} (2(K + G)L_1 + L_0 \left( \sum_{i=1}^K S_{2K} + \sum_{j=1}^G S_{1+2(j-1)} \frac{w_2}{w_1} \right)) \quad (9)$$

Для емкостей  $C_1$  и  $C_2$  справедливо следующее соотношение:

$$w_1^2 / w_2^2 = C_1 / C_2, \quad (10)$$

Электрическая емкость, приведенная к входу ультразвуковой колебательной системы равна:

$$C = \frac{1}{M^2 \left( \frac{1}{C_4} + \frac{w_2^2}{w_3^2 C_3} + \frac{2(G + K)}{C_1} \right) + C_e} \quad (11)$$

Активное сопротивление, приведенное к входу ультразвуковой колебательной системы равно:

$$R = R_4 + R_3 + \frac{w_3^2}{w_2^2} (2R(K + G \frac{w_2^2}{w_1^2} + R_0 \left( \sum_{i=1}^K S_{2K} + \sum_{j=1}^G S_{1+2(j-1)} \frac{w_2}{w_1} \right)) \quad (12)$$

Составляющие расчетную модель, выражения (9), (11), (12), описывают взаимосвязь входного электрического сопротивления ультразвуковой колебательной системы с излучателем, работающим в режиме изгибных колебаний, и параметров технологической среды.

Используя эти выражения в методиках, описанных в работах [2,5] определяются необходимые диапазоны корректировки параметров электронных генераторов в зависимости от изменения свойств технологической среды для обеспечения режима оптимального согласования.

Сами способы обеспечения оптимального согласования электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы с излучателем, работающим в режиме изгибных колебаний принципиально не отличаются от описанных в [2,5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил создать расчетную модель, описывающую взаимосвязь входного электрического сопротивления ультразвуковой колебательной системы с излучателем, работающим в режиме изгибных колебаний, и параметров технологической среды. Использование созданной расчетной модели в совокупности с ранее разработанными способами управления работой ультразвукового технологического аппарата позволит обеспечить максимально высокую энергетическую эффективность ультразвукового воздействия на технологические среды с малым акустическим сопротивлением.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Vladimir N. Khmelev, Igor I. Savin, Roman V. Barsukov, Sergey N. Tsyganok, Andrey N. Lebedev, Alexey N. Slivin Developing The Method And Devices For A Controlling Of The Working Process In Multifunctional Ultrasonic Apparatus // International Workshop and Tutorials on Electronic Devices and Materials EDM'2005: Workshop Processing. – Novosibirsk: NSTU, 2005.
- [2] Vladimir N. Khmelev, Igor I. Savin, The Electrical Matching in Ultrasonic Technological Devices For Increasing Efficiency of Ultrasonic Technologies // International Workshop and Tutorials on Electronic Devices and Materials EDM'2006: Workshop Processing. – Novosibirsk: NSTU, 2006.
- [3] J.A. Gallego-Juarez New-technologie in high-power ultrasonic industrial applications // Ultrasonic symposium – New York, IEEE, 1994, p. 1343-1352.
- [4] Барсуков, Р.В. Исследование ультразвукового воздействия на технологические среды и повышение эффективности технологических аппаратов: дис. канд. тех. наук.: 05.17.08: защищена 28.10.05: утверждена 20.02.06 / Р.В. Барсуков. – Бийск, 2005. – 135 с.
- [5] Савин И.И. Повышение эффективности ультразвуковых процессов и аппаратов на базе согласования параметров компонентов электроакустических систем и технологических сред: дис. канд. тех. наук: 05.17.08: защищена 04.07.06, утверждена 10.11.06.

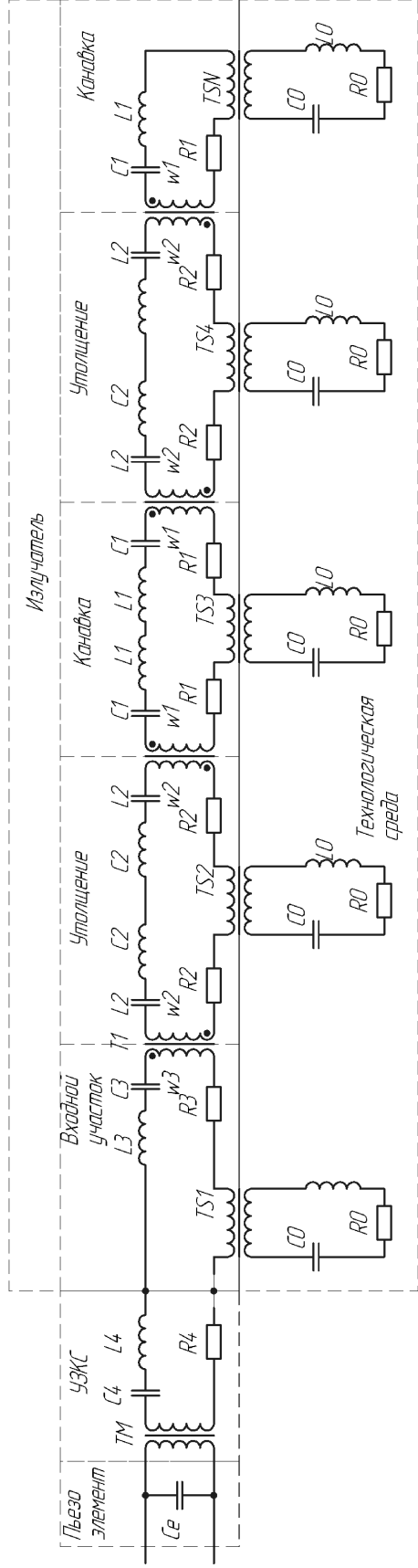


Рисунок 5 – эквивалентная электрическая схема ультразвуковой колебательной системы с излучателем изгибных колебаний