

## Повышение нагрузочной способности пьезокерамических излучателей ультразвуковых аппаратов для травматологии и хирургии

### Аннотация

Предложен новый способ возбуждения пьезокерамического излучателя продольного типа, обеспечивающий разделение акустического и электрического резонансов излучателя с использованием эффектов как одного, так и другого. Проведено моделирование электрических процессов в пьезокерамическом излучателе продольного типа при использовании предложенного способа, показана эффективность его применения для повышения нагрузочной способности акустической системы, повышения устойчивости работы излучателя и расширения функциональных возможностей ультразвуковых медицинских аппаратов при работе на широкодиапазонную технологическую нагрузку.

Эффективность ультразвукового воздействия определяется стабильностью поддержания амплитуды колебаний рабочего окончания волновода-инструмента ультразвукового пьезокерамического излучателя при различных изменениях условий его взаимодействия с технологической средой. Эти изменения отражаются на эквивалентной нагрузке ультразвукового излучателя. Очевидно, что для каждого излучателя существует предельное значение допустимой нагрузки, определяемое целым рядом факторов, как конструктивных, так и технологических. В ряде работ [1]-[3] используется такое понятие, как нагрузочная способность акустического излучателя или даже волновода-инструмента. Это понятие связано с оценкой уровня изменения характеристик (амплитудных, частотных, фазовых) при изменении нагрузки. Естественно при этом желание разработчика по возможности достичь максимальной для данной конструкции нагрузочной способности излучателя, поскольку этот параметр позволяет существенно расширить технологические возможности используемого ультразвукового оборудования. Возможности эти зачастую оказываются крайне ограниченными как у серийно выпускаемых ультразвуковых аппаратов зарубежных фирм, таких как «Ultra-Drive» («Biomat») [4], «Sonoca 190» («Söring»), «OSCAR» и пр., так и у аппарата для травматологии и хирургии «Ярус», выпускаемого в России. Последний имеет преимущества перед зарубежными аналогами [5], однако при его работе в условиях операционной некоторые технологические задачи оказались невыполнимы вследствие недостаточной мощности аппарата и недостаточной устойчивости работы под нагрузкой.

К таким задачам следует отнести удаление костного цемента из бедренного канала при выполнении ревизионного эндопротезирования тазобедренного и коленного суставов, когда погружение волновода на глубину более 6 см и при толщине полимерной мантии более 3 мм сопровождается значительным ростом нагрузки. Это вызывает падение интенсивности ультразвуковых колебаний, уменьшение скорости деполимеризации полиметилметакрилата и прекращение продвижения волновода в толщине мантии [6]. Кроме того, быстрая реполимеризация ПММА на глубине свыше 7 см вызывает его налипание на торец волновода, фиксацию волновода в массе полимера, что приводит к техническим трудностям при его извлечении из канала. В некоторых случаях это даже приводило к необходимости формирования перфорационного окна в стенке бедра для извлечения ультразвукового волновода-инструмента. Для решения этой проблемы предложены корректирующие технологии [7]. Недостаточная мощность излучателя ограничивает также возможности применения аппарата для удаления фиксированных в костный цемент вертлужных компонентов. Легко выполняемые в условиях эксперимента фрагментация и удаление полиэтиленовой чашки Мюллера с полимерной мантией оказываются невыполнимы в условиях операционной, при погружении волновода-излучателя на глубину до 1...1,5 см, так как происходят налипание полиэтилена и ПММА на торец волновода, его фиксация в полимере и прекращение работы аппарата [8].

При решении еще одной важной задачи – ультразвуковой чистки бедренного канала, выполняемой после удаления кост-

ного цемента, особенно при наличии перипротезного инфекционного процесса, недостаток мощности излучателя приводит к снижению эффективности кавитации и звуковых потоков при его погружении в жидкость на глубину свыше 10 см, что снижает санационный эффект гидроакустического воздействия ультразвука в очаге инфекции.

Разработка аппарата высокой мощности позволит создать постоянно фиксированный в костной среде инструмент, обеспечивающий долговременную санацию и стимуляцию регенерации поврежденной костной ткани. Среди перспективных направлений использования этого аппарата можно прогнозировать ультразвуковую резку кости значительной толщины в жидкой среде, что обеспечит защиту ткани от температурного воздействия, возникающего при работе волновода-инструмента.

Для выяснения причин возникновения отмеченных недостатков был проведен анализ основных частотных и нагрузочных свойств используемых в подобного рода аппаратах ультразвуковых пьезокерамических излучателей продольного типа [9], в результате которого выяснилось, что влияние нагрузки приводит к вполне ожидаемым результатам:

- пропорциональному снижению полной проводимости ультразвукового пьезокерамического излучателя. Следует отметить, что параметр полной проводимости излучателя является наиболее информативным, поскольку при постоянном напряжении возбуждения излучателя этот параметр, по сути, представляет частотную характеристику входного тока, амплитуда которого, как показано в [10], соответствует амплитуде колебаний рабочего торца излучателя;
- снижению добротности системы с постепенным вырождением резонансных свойств по мере увеличения сопротивления нагрузки.

Для уменьшения влияния нагрузки на основные характеристики ультразвукового пьезоэлектрического излучателя продольного типа необходимо увеличивать его волновое сопротивление:

$$\rho = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}}.$$

Увеличение волнового сопротивления излучателя возможно двумя путями:

- 1) снижением упругой составляющей  $C_m$ , что является нежелательным моментом, поскольку, при прочих равных условиях, снижение  $C_m$  связано с увеличением площади поперечного сечения излучателя, что приведет лишь к увеличению весогабаритных показателей излучателя;
- 2) увеличением массовой составляющей  $L_m$ . При этом очевидно возрастание нагрузочной способности излучателя за счет снижения влияния  $R_n$  на изменение  $\omega_0$ . Это подтверждается и экспериментальными данными, поскольку с увеличением массы излучателя возрастает и его нагрузочная способность.

При рассмотрении и анализе общей изоморфной схемы излучателя было установлено [9], что необходимый эффект «кажущегося» увеличения его индуктивной (массовой) составля-

ющей может быть достигнут за счет включения в схему дополнительной индуктивности  $L_k$ , которая, вместе с  $C_k$ , образует новый резонансный контур  $L_k C_k$  (рис. 1а).

Оценивая данный эффект, следует отметить, что:

- введение дополнительной индуктивности  $L_k$  приводит к пропорциональному уменьшению влияния нагрузки  $R$  на колебательные свойства излучателя за счет увеличения его эффективной полной проводимости  $Y$ ;
- помимо увеличения полной проводимости излучателя, введение  $L_k$  приводит к частотному сдвигу резонансной частоты системы в целом пропорционально величине  $L_k$ ;
- сдвиг резонансной частоты системы приводит к снижению амплитуды колебаний рабочего торца ультразвукового пьезокерамического излучателя продольного типа (при постоянстве возбуждающего напряжения), что объясняется возникающей разницей между частотами механического (при  $L_k = 0$ ) и электрического (при  $L_k \neq 0$ ) резонансов акустической системы в целом.

Таким образом, с одной стороны, эффект «кажущегося» увеличения индуктивной (массовой) составляющей пьезокерамического излучателя продольного типа достигается за счет включения в схему дополнительной индуктивности  $L_k$ , обеспечивая так необходимое повышение нагрузочной способности, но с другой стороны, этот же фактор приводит к возникновению частотного рассогласования резонансов в излучателе и существенному снижению как амплитуды колебаний рабочего торца, так и эффективности применения ультразвука в технологическом процессе.

Для устранения данного противоречия нами был предложен новый способ возбуждения [11] пьезокерамического излучателя продольного типа, обеспечивающий разделение акустического и электрического резонансов излучателя с использованием эффектов как одного, так и другого. С этой целью нами был предложен вариант подключения излучателя к генератору, использующий дополнительный компенсирующий конденсатор, как показано на рис. 1а. Как видно из схемы, полный ток генератора  $I_{\text{общ}}$  делится на три составляющих:  $I_a$  – акустическая составляющая входного тока;  $I_c$  – электрическая составляющая, определяемая собственной емкостью пьезоматериала излучателя;  $I_e$  – электрическая составляющая, определяемая величиной дополнительного компенсирующего конденсатора  $C$ .

В данной ситуации инженерное решение задачи обеспечения работы излучателя на частоте акустического резонанса при наличии дополнительной индуктивности  $L_k$  очевидно: достаточно подобрать компенсирующую емкость  $C$  равной собственной емкости пьезоматериала излучателя  $C_k$  и из суммы токов  $I_a$  и  $I_c$  вычесть ток  $I_e$ , что достигается установкой в схему одного токового трансформатора с двумя встречно включенными первичными обмотками, как показано на рис. 1б. Такое схемотехническое решение позволяет в дальнейшем рассматривать эквивалентную схему подключенного подобным образом излучателя к генератору в виде двух практически независимых участков, где выходное напряжение первого является входным для второго, как показано на рис. 2.

Первый участок (рис. 2а) представляет собой фактически схему «подкачки» напряжения, подаваемого на излучатель при увеличении технологической нагрузки. Несложный расчет дает следующее выражение для соотношения выходного и входного напряжений:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ген}} \frac{R \left[ R(1 - \omega^2 LC) - j\omega L \right]}{R^2 (1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 L^2},$$

где  $R = R_a + R_m$ ;  $C = C_k + C_d$ ;  $L = L_k$ .

Поскольку фазовые соотношения входного и выходного напряжений нас не интересуют, уходим от комплексной формы представления:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ген}} \sqrt{\frac{R^2 \left[ R(1 - \omega^2 LC) \right]^2 + \omega^2 L^2}{R^2 (1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Полученное выражение позволяет оценить влияние изменения сопротивления нагрузки ультразвукового излучателя на уровень «подкачки» напряжения возбуждения, а также возможности управления этим процессом за счет изменения параметров  $C = C_k + C_d$  и  $L = L_k$  (см. графики рис. 3).

Анализ полученных характеристик свидетельствует об эффективности процесса «подкачки», особенно при работе излучателя на частотах, соответствующих (или относительно близких) резонансу подкачивающего контура. Более того, даже 5...10%-ное частотное рассогласование хоть и снижает эффек-

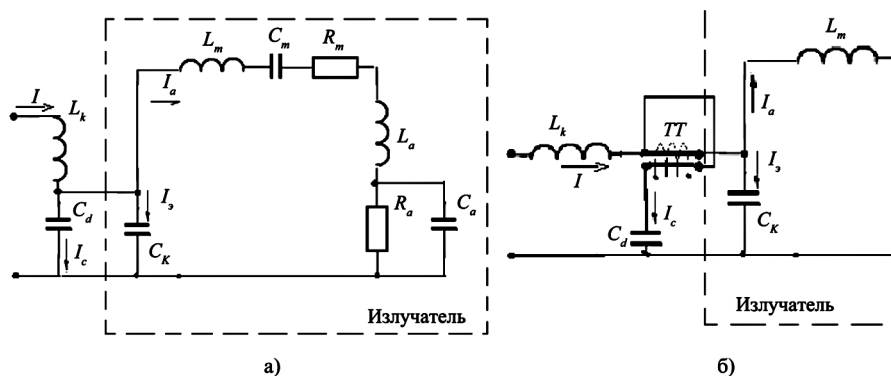


Рис. 1. Схема подключения излучателя (а); схема включения токового трансформатора (б)

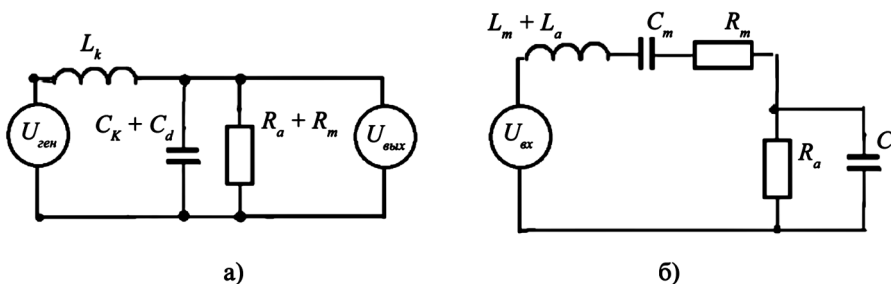


Рис. 2. Разбиение эквивалентной схемы излучателя на независимые участки

тивность процесса «подкачки» при изменении нагрузки, тем не менее положительный эффект сохраняется.

Также интересно оценить влияние на процесс «подкачки» параметров подкачивающего контура  $C = C_k + C_d$  и  $L = L_k$ , поскольку, с одной стороны, величина  $R$  определяется по отношению к волновому сопротивлению контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

изменение которого сильно влияет на процессы раскачки, а с другой стороны, изменение этих параметров сопровождается частотной расстройкой контура, что также неоднозначно влияет на процессы раскачки. Процесс подкачки теряет в кратности изменения, но сохраняет положительный эффект, перенося основную его часть в область пониженных нагрузок ( $R \leq 3$ ).

Второй участок (рис. 2б) представляет собой несколько упрощенную (без собственной емкости пьезоматериала излучателя) эквивалентную схему пьезокерамического ультразвукового излучателя продольного типа [12], расчет которой дает следующие выражения для активной и реактивной составляющих сопротивления данной эквивалентной схемы:

$$r = R_m + \frac{R_a}{1 + \omega^2 C_a^2 R_a^2};$$

$$x = \omega(L_m + L_a) - \frac{1}{\omega C_m} - \frac{\omega C_a R_a^2}{1 + \omega^2 C_a^2 R_a^2}.$$

Для дальнейшего анализа схемы необходимо определить полное сопротивление и фазовую характеристику:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} =$$

$$= \sqrt{\left[ R_m + \frac{R_a}{1 + \omega^2 C_a^2 R_a^2} \right]^2 + \left[ \omega(L_m + L_a) - \frac{1}{\omega C_m} - \frac{\omega C_a R_a^2}{1 + \omega^2 C_a^2 R_a^2} \right]^2};$$

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{x}{r} = \frac{\omega(L_m + L_a) - \frac{1}{\omega C_m} - \frac{\omega C_a R_a^2}{1 + \omega^2 C_a^2 R_a^2}}{R_m + \frac{R_a}{1 + \omega^2 C_a^2 R_a^2}}.$$

Соответствующие полученным выражениям частотные и фазовые характеристики второго участка схемы (рис. 2б) представлены для разных значений нагрузки на рис. 4.

Поскольку для высокочастотных цепей наиболее информативным является представление характеристик проводимости, а не сопротивления, на рис. 4б представлены частотные характеристики изменения проводимости, которые при постоянном входном напряжении отражают ток возбуждения излучателя, который, в свою очередь, для пьезокерамических излучателей тесно коррелирован с амплитудой акустических колебаний рабочего торца излучателя. Из представленного графика видно, что увеличение технологической нагрузки излучателя  $R_a$  сопровождается соответствующим уменьшением тока возбуждения и соответственно амплитуды акустических колебаний, являющейся основным технологическим параметром. В то же время использование предложенной схемы подкачки (рис. 2) обеспечивает не только сохранение необхо-

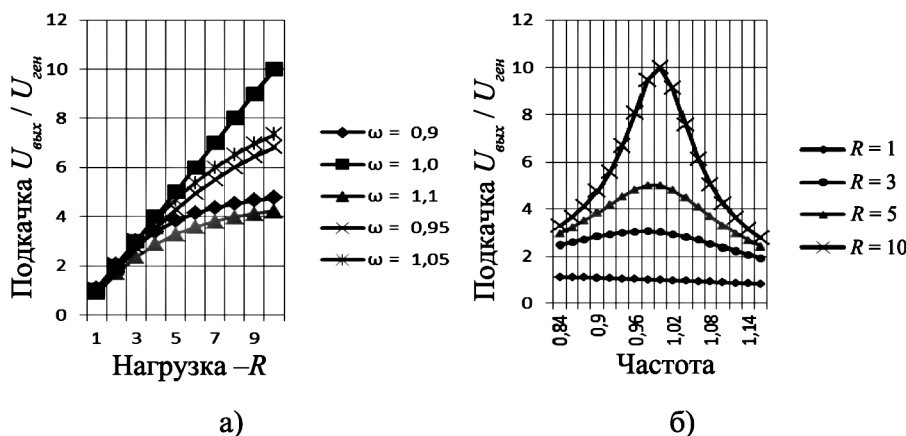


Рис. 3. Изменение уровня «подкачки» напряжения возбуждения излучателя в зависимости от нагрузки при различных уровнях частотного рассогласования (а) и частотные характеристики контура «подкачки» при разных нагрузках (б)

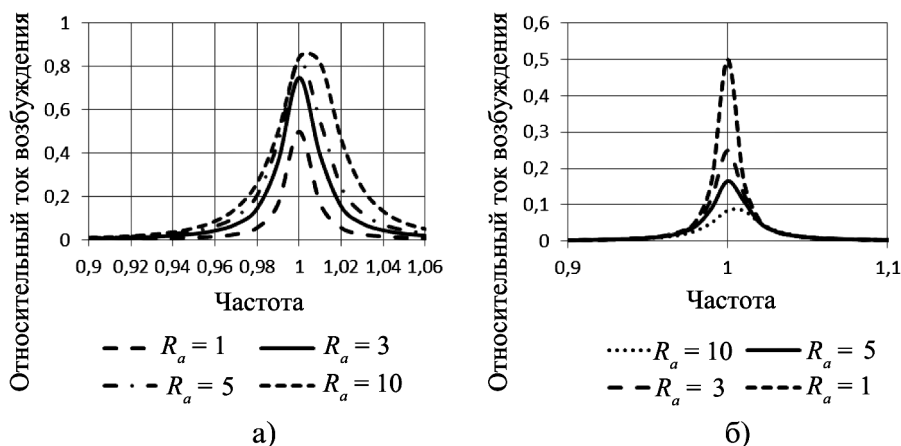


Рис. 4. Частотные характеристики второго участка схемы рис. 6. Характеристики собственно участка (б) и характеристики участка с учетом «подкачки» входного напряжения за счет первого участка (а)

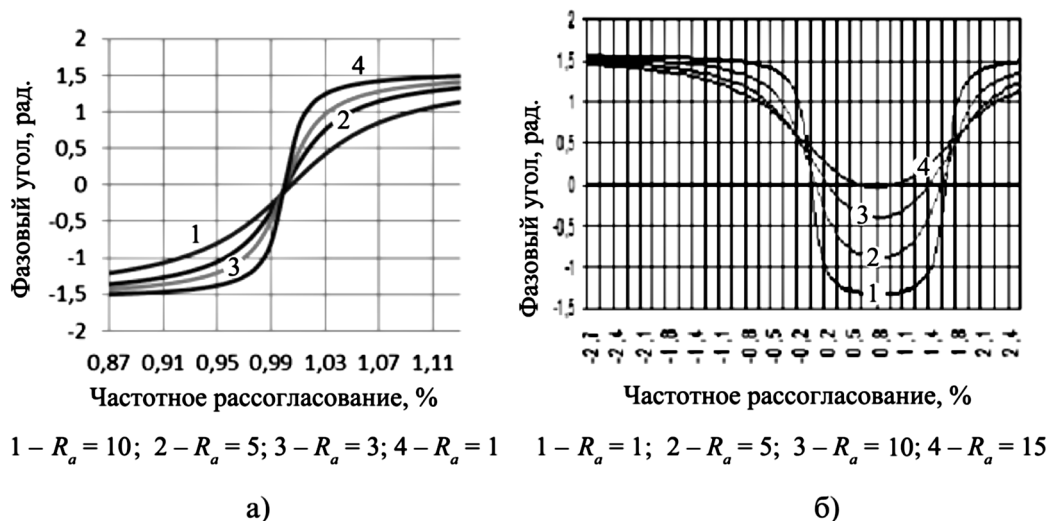


Рис. 5. Фазовые характеристики пьезоизлучателя при стандартной схеме включения (б) и при предложенном способе подключения (а)

димого для успешного протекания технологического процесса тока возбуждения излучателя при возрастании нагрузки, но даже некоторое превышение его над заданным уровнем (см. рис. 4а). При сравнении фазовых характеристик излучателя, включенного по обычной схеме (рис. 5б), и характеристик излучателя, работающего по предложенному авторами способу подключения (рис. 5а), очевидна разница в отсутствии второго перехода через нуль фазовой характеристики (появляется однозначность в работе), что обеспечивает повышенную устойчивость фазовой автоподстройки частоты и расширение диапазонов захвата и удержания систем АПЧ, а также отсутствие такого влияния увеличения нагрузки, которое приводит к невозможности использования систем фазовой АПЧ в принципе.

Таким образом, предложенный способ повышения нагрузочной способности пьезокерамического излучателя продольного типа при общей простоте реализации обеспечивает целый комплекс положительных качеств, достигаемых как в акустической, так и электрической областях работы ультразвукового технологического оборудования:

- обеспечивает значительное повышение нагрузочной способности акустической системы при сохранении ее основных технологических характеристик;
- определяет однозначную фазовую характеристику, сохраняющую свой вид при значительных колебаниях технологической нагрузки, что позволяет с высокой эффективностью использовать простейшие системы ФАПЧ;
- позволяет поддерживать в системе режим работы на частоте акустического резонанса излучателя, обеспечивая тем самым его максимальную технологическую эффективность.

#### Список литературы:

1. Сенченков И.К., Нестеренко Н.П., Кораб Г.Н., Шкарупа П.И. Влияние технологической нагрузки на резонансные характеристики электромеханической системы при ультразвуковой сварке пластмасс // Автоматическая сварка. 1999. № 2. С. 11-15.
2. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. – М.: Химия, 1986. 256 с.
3. Машков Ю.К., Шустер Я.Б., Новиков А.А., Негров Д.А. Разработка волноводных систем для прессования изделий из полимерных материалов // Омский научный вестник. 2005. № 1 (30). С. 106-108.
4. Ultra-drive® Technical Support. «Ultra-drive». 1999, 2010 / <http://www.biomet.com>.
5. Новиков А.А., Клюев В.И., Резник Л.Б. Новые разработки высокоамплитудных ультразвуковых аппаратов с адаптивными системами для терапии и хирургии // Медицинская техника. 2007. № 4. С. 56-57.

6. Резник Л.Б., Дзюба Г.Г., Новиков А.А. Эффективность применения ультразвука для удаления костного цемента при ревизионном эндопротезировании // Травматология и ортопедия России. 2012. № 1 (63). С. 30-35.
7. Fletcher M., Jennings G.J., Warren P.J. Ultrasonically driven instruments in the transfemoral approach – an aid to preservation of bone stock and reduction of implant length // Arch. Orthop. Trauma. Surg. 2000. Vol. 120 (10). PP. 559-561.
8. Резник Л.Б., Дзюба Г.Г. Современные подходы к выполнению первого этапа ревизионного эндопротезирования тазобедренного сустава при поздних инфекционных осложнениях // Травматология и ортопедия России. 2009. № 3. С. 127-129.
9. Новиков А.А. Способ увеличения нагрузочной способности ультразвукового пьезокерамического излучателя // Омский научный вестник. 2008. № 2 (68). С. 106-112.
10. Новиков А.А. К вопросу определения фактора электроакустического изоморфизма для ультразвукового излучателя продольного типа // Доклады Академии наук высшей школы России. 2006. № 1 (6). С. 114-121.
11. Новиков А.А., Шустер Я.Б., Хазанов М.А., Лебедева Д.А. Транзисторный генератор для резонансных нагрузок / Патент 2510919 РФ, МПК H03B; заявитель и патентообладатель – ОмГТУ (RU). № 2012152570; заявл. 06.12.2012; опубл. 10.04.2014. Бюл. № 10.
12. Ультразвуковые преобразователи / Под. ред. Е. Кикучи. – М.: МИР, 1972. 424 с.

Алексей Алексеевич Новиков,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра материаловедения и машиностроения,  
ГБОУ ВПО «Омский государственный  
технический университет»,  
Леонид Борисович Резник,  
д-р мед. наук, зав. кафедрой,  
Герман Григорьевич Дзюба,  
канд. мед. наук, ассистент кафедры,  
кафедра травматологии, ортопедии и ВПХ,  
ГБОУ ВПО «Омская государственная  
медицинская академия»,  
Дарья Александровна Лебедева,  
ассистент, аспирант,  
кафедра материаловедения и машиностроения,  
ГБОУ ВПО «Омский государственный  
технический университет»,  
г. Омск,  
e-mail: yarus 952@ mail.ru