

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Ахмедова О. О.

*Камышинский технологический институт (филиал) ВолгГТУ, Камышин
Камышин, Россия (403870, г. Камышин, ул. Ленина, 6^а) epp@kti.ru.*

Основными источниками акустических колебаний являются излучатели на основе пьезокерамики. Пьезокерамические излучатели обычно работают на мощностях до 1 кВт. Питание данных излучателей осуществляется от ультразвуковых генераторов, которые могут работать в двух режимах: ключевом и линейном. Условие оптимизации согласующей цепи при выполнении указанных критериев, а именно – минимальной массе, стабильности коэффициента передачи основной гармоники при изменении сопротивления нагрузки и максимальном коэффициенте мощности удовлетворяет схема с неявной продольной и поперечной компенсацией. Для повышения эффективности ультразвукового воздействия на сточные воды применяется амплитудная модуляция. Работа ультразвукового преобразователя на воду в непрерывном режиме приводит к тому, что около его излучающей поверхности на низких частотах образуется экранирующая область, которая состоит из множества пульсирующих и кавитационных пузырьков.

Ключевые слова: источники питания, кавитация, ультразвуковое воздействие, акустические колебания.

DEVELOPMENT OF THE POWER SUPPLY OF ULTRASONIC PIEZOKERAMICHESKY OF THE RADIATOR

Akhmedova O. O.

*Kamyshinsky institute of technology (branch) of VolgGTU, Kamyshin
Kamyshin, Russia (403870, Kamyshin, Lenin's street, 6a) epp@kti.ru*

The main sources of acoustic fluctuations are radiators on a basis piezoelectric ceramics. Piezokeramicheskyy radiators usually work at powers up to 1 kW. A food of these radiators is carried out from ultrasonic generators which can work in two modes: key and linear. To condition of optimization of a consistent chain when performing the specified criteria, namely the minimum weight, stability of coefficient of transfer of the main harmonica at change of resistance of loading and the maximum power factor the scheme, with implicit longitudinal and cross compensation satisfies. Amplitude modulation is applied to increase of efficiency of ultrasonic impact on sewage. Operation of the ultrasonic converter on water in a continuous mode leads to that about its radiating surface at low frequencies the shielding area which consists of a set of pulsing and cavitation bubbles is formed.

Keywords: power supplies, cavitation, ultrasonic influence, acoustic fluctuations.

Основными источниками акустических колебаний являются излучатели на основе пьезо-керамики. Пьезокерамические излучатели обычно работают на мощностях до 1 кВт [4], [3]. Питание данных излучателей осуществляется от ультразвуковых генераторов, которые могут работать в двух режимах: ключевом и линейном.

Основными параметрами пьезокерамики, применяемой в качестве ультразвуковых преобразователей, являются:

- 1) пьезомодуль d_{33} ,
- 2) модуль Юнга E ,
- 3) диэлектрическая проницаемость ϵ ,
- 4) тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$,

5) зависимость пьезомодуля и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и напряженности электрического поля,

б) стабильность физических параметров во времени.

После анализа применяемых пьезоэлектрически веществ можно сделать следующие выводы, что высокими качественными показателями обладают твердые растворы цирконата-титана свинца. Керамике цирконата-титана свинца присущ большой пьезомодуль, по сравнению с титаном бария, он имеет малые диэлектрические потери в сильных электрических полях и обладает высокой точкой Кюри.

Для обеспечения оптимального режима работы источника питания необходимо произвести согласование ультразвукового генератора с подключенной к нему нагрузкой, это производится с учетом стабилизации коэффициента передачи основной гармоники при изменении сопротивления нагрузки, коэффициента мощности и массогабаритных показателей.

Жесткость внешней характеристики согласующей цепи является важным параметром, так как эквивалентное электрическое сопротивление ультразвукового излучателя может изменяться в течение технологического процесса в десять раз и более [12].

В качестве согласующихся цепей наиболее эффективно использовать фильтры нижних частот (ФНЧ) [1], [5], [6].

На рис. 1 приведена схема согласующихся цепей Г-образного LC-фильтра нижних частот, из которой исключается продольная и/или поперечная компенсации [5].

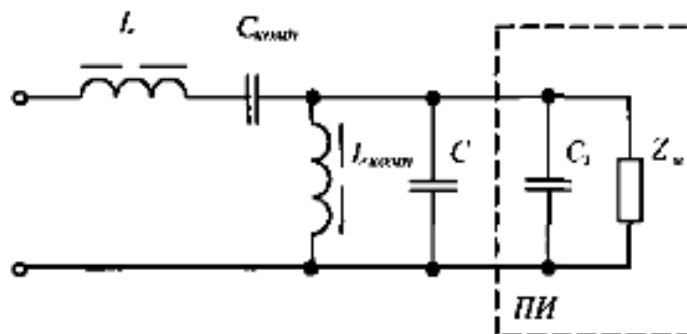


Рис. 1. Схема согласующихся цепей

На рис. 2.10 представлена схема возбуждения излучателя

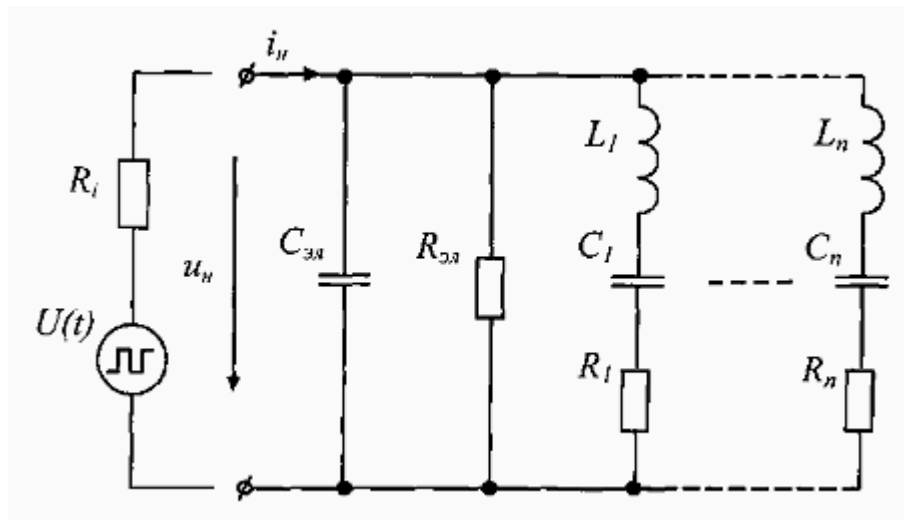


Рисунок 2. Схема возбуждения пьезокерамического преобразователя

Из рис. 2 следует, что подобную нагрузку необходимо питать переменным напряжением, так как при питании постоянным напряжением произойдет заряд емкостей C и $C_{\text{эя}}$, из-за чего перестанет течь электрический ток и соответственно затухнут механические колебания пьезокерамического излучателя.

На рис. 3 показано возбуждение пьезокерамического излучателя однократным импульсом напряжения.

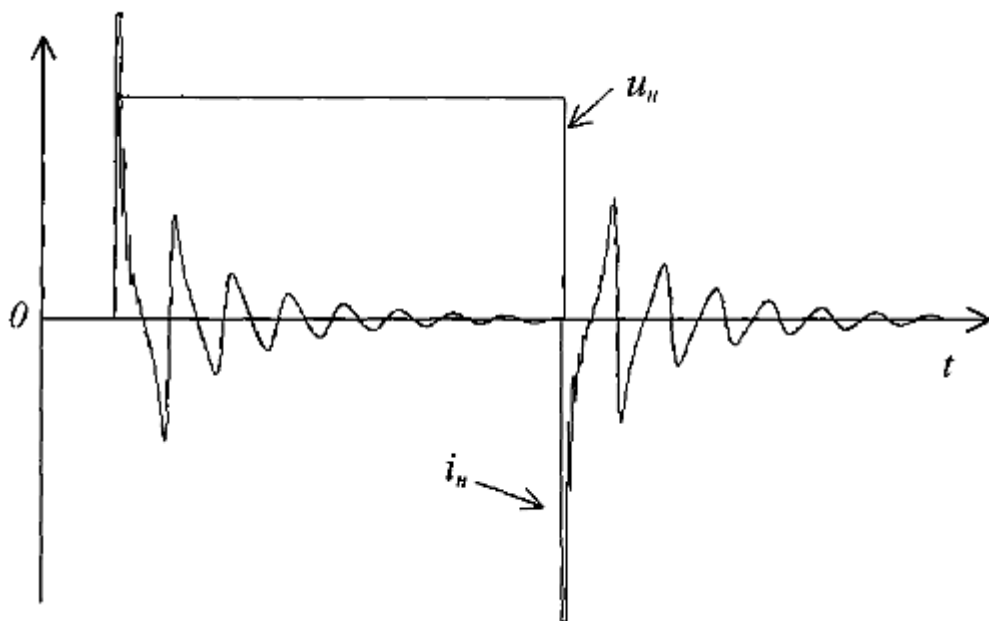


Рис. 3. Процесс возбуждения излучателя однократным импульсом напряжения

При возбуждении излучателя прямоугольным напряжением ток имеет большую часть высших гармоник и большой ток перезаряда собственной электрической ёмкости, что приводит к нагреву пьезокерамического излучателя и к динамическим потерям в вентильных элементах источника питания.

Определим коэффициент передачи напряжения первой гармоники

$$|K_{U1}| = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{|1 + Z_{\text{noc}} G_{\text{пар}}|} \quad (1)$$

где Z_{noc} – полное сопротивление последовательной ветви фильтра, равное

$$Z_{\text{noc.n}} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C_{\text{комн}}} \quad (2)$$

$G_{\text{пар}}$ – проводимость параллельной ветви фильтра, равное

$$G_{\text{пар.n}} = j\omega(C + C_{\text{эл}}) + \frac{1}{j\omega L_{\text{комн}}} \quad (3)$$

Для оценки поперечной и продольной компенсации применим следующие коэффициенты

$$a_1 = \frac{Z_C / Z_{C_{\text{эл}}}}{Z_L} = \frac{(1/\omega(C + C_{\text{эл}}))}{\omega L_{\text{комн}}} \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{Z_{C_{\text{комн}}}}{Z_L} = \frac{(1/\omega Z_{C_{\text{комн}}})}{\omega L} \quad (5)$$

Тогда

$$|K_{U1}| = \frac{1}{\sqrt{[1 - \omega_*^2(1 - a_1 - a_2 + a_1 a_2)]^2 + \rho_*^2 \omega_*^2(1 - a_2)^2}} \quad (6)$$

где $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega \sqrt{L(C + C_{\text{эл}})}$, $\rho_* = \frac{\rho}{R_n} = \frac{\sqrt{L(C + C_{\text{эл}})}}{R_n} = \frac{\omega_0 L}{R_n} = \frac{1}{\omega_0 C R_n}$

R_n – эквивалентное электрическое сопротивление механической ветви $L_n C_n R_n$ при работе её на резонансе.

Схема, представленная на рис. 2.9, обладает коэффициентом передачи $K_U=1$ во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки.

Основным параметром, характеризующим энергетические свойства согласующихся цепей, является коэффициент мощности χ .

$$\chi = \frac{P}{S} \quad (7)$$

где P – активная мощность ультразвуковых колебаний в первой гармонике, равная

$$P = I_{1\partial}^2 R_n = \frac{U_{1\partial}^2}{R_n} \quad (8)$$

где $I_{1\partial}^2$ – действующее значение тока первой гармоники через нагрузку; $U_{1\partial}^2$ – напряжение первой гармоники на нагрузке; S – полная мощность согласующейся цепи.

Мощностью колебаний высших гармоник не принимается, так как она преобразуется в тепло [1,4].

Прямоугольное выходное напряжение с одним импульсом в полупериоде и паузой в нуле содержит нечетные гармоники с номером n , напряжение которых определяется [5]

$$U_n = \left(\frac{4}{\pi n} \right) U_m \sin\left(\frac{\gamma \pi}{2} \right) \sin(n\omega t) \quad (9)$$

где U_m – амплитуда прямоугольного напряжения; γ – относительная длительность импульса прямоугольного напряжения, равная

$$\gamma = \frac{2t_u}{T} \quad (10)$$

где t_u – длительность импульса; T – период повторения импульсов.

Определяется действующее значение напряжения первой гармоники на нагрузке

$$U_{1\partial} = U_{\text{ex}1\partial} \cdot K_{U1} \quad (11)$$

где $U_{\text{ex}1\partial}$ – действующее напряжение первой гармоники во входном прямоугольном напряжении; K_{U1} – коэффициент передачи, согласующийся цепи для первой гармоники.

Полная мощность цепи равна среднеквадратичному значению входной мощности всех гармоник

$$S = U_{\text{ex},\partial} \cdot I_{\text{ex},\partial} \quad (12)$$

где $U_{\text{ex},\partial}$ – действующее значение входного напряжения, равное для прямоугольной характеристики с паузой в нуле $U_{\text{ex},\partial} = \sqrt{\gamma} U_m$

Действующее значение входного тока равно среднеквадратичному значению всех гармоник, его составляющих [8]

$$I_{\text{ex},\partial} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{\text{ex},\partial n}^2} \quad (13)$$

Входной ток n -й гармоники

$$I_{\text{ex},\partial n} = \frac{U_{\text{ex},\partial n}}{Z_{\text{ex},n}} \quad (14)$$

где $U_{\text{ex},\partial n}$ – входное действующее напряжение n -й гармоники; $Z_{\text{ex},n}$ – входное сопротивление согласующей цепи с учётом нагрузки R_n для n -й гармоники.

Определяется для схемы, представленной на рис. 1, комплексное входное сопротивление для первой гармоники

$$\dot{Z}_{\text{ex}} = R_n \left[\frac{1}{1 + \frac{\omega_*^2}{\rho_*^2} (1 - a_1)^2} + j \left[\rho_* \omega_* (1 - a_2) - \frac{\frac{\omega_*}{\rho_*} (1 - a_1)}{1 + \frac{\omega_*^2}{\rho_*^2} (1 - a_1)} \right] \right] \quad (15)$$

Модуль входного сопротивления согласующей цепи для n -й гармоники

$$Z_{ex} = R_n \sqrt{\left[\frac{1}{1 + \frac{n^2 \omega_*^2}{\rho_*^2} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)^2} \right]^2 + \left[n \rho_* \omega_* \left(1 - \frac{a_2}{n^2}\right) - \frac{\frac{n \omega_*}{\rho_*} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)}{1 + \frac{n^2 \omega_*^2}{\rho_*^2} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)^2} \right]^2} \quad (16)$$

С учётом выше приведённых формул определяется полная мощность

$$S = \frac{\gamma U_m^2}{R_n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1}{1 + \frac{n^2 \omega_*^2}{\rho_*^2} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)^2} \right]^2 + \left[n \rho_* \omega_* \left(1 - \frac{a_2}{n^2}\right) - \frac{\frac{n \omega_*}{\rho_*} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)}{1 + \frac{n^2 \omega_*^2}{\rho_*^2} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)^2} \right]^2}} \quad (17)$$

Тогда коэффициент мощности будет равен

$$\chi = \frac{8\pi^2 \gamma \left[1 - \omega_*^2 (1 - a_1 - a_2 + a_1 a_2)^2 + \omega_*^2 \rho_*^2 (1 - a_1)^2 \right]}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1}{1 + \frac{n^2 \omega_*^2}{\rho_*^2} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)^2} \right]^2 + \left[n \rho_* \omega_* \left(1 - \frac{a_2}{n^2}\right) - \frac{\frac{n \omega_*}{\rho_*} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)}{1 + \frac{n^2 \omega_*^2}{\rho_*^2} \left(1 - \frac{a_1}{n^2}\right)^2} \right]^2}}} \quad (18)$$

Зависимости коэффициента мощности χ от относительной частоты ω , для различных вариантов согласующейся цепи при $\gamma=1$, представлены на рис. 4.

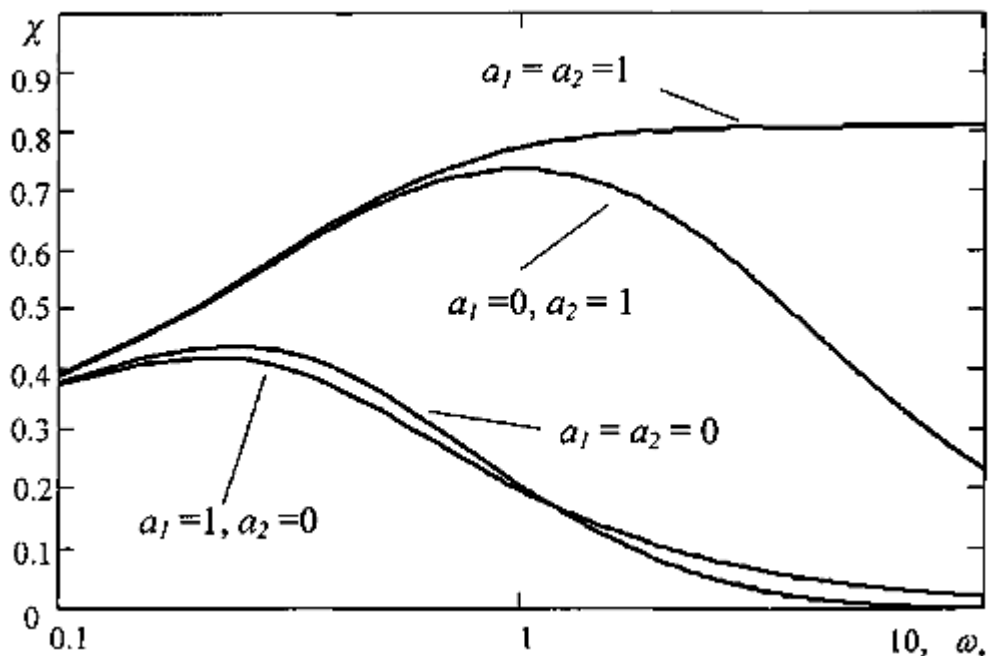


Рис. 4. Для различных вариантов схем зависимость коэффициента мощности от изменения относительной частоты

Следовательно, наибольший коэффициент мощности имеет схема с полной продольной и поперечной компенсацией, при $a_1=1$ и $a_2=1$.

При увеличении нагрузки содержание высших гармоник во входном токе согласующейся цепи увеличивается, что приводит к снижению коэффициента мощности, из-за снижения первой гармоники и, как следствие, роста относительного содержания высших гармоник и снижения модуля суммы проводимости параллельной ветви согласующейся цепи и нагрузки и, как следствие, увеличение коэффициента передачи высших гармоник [5], [7].

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента мощности от изменения нагрузки для цепей с различной компенсацией.

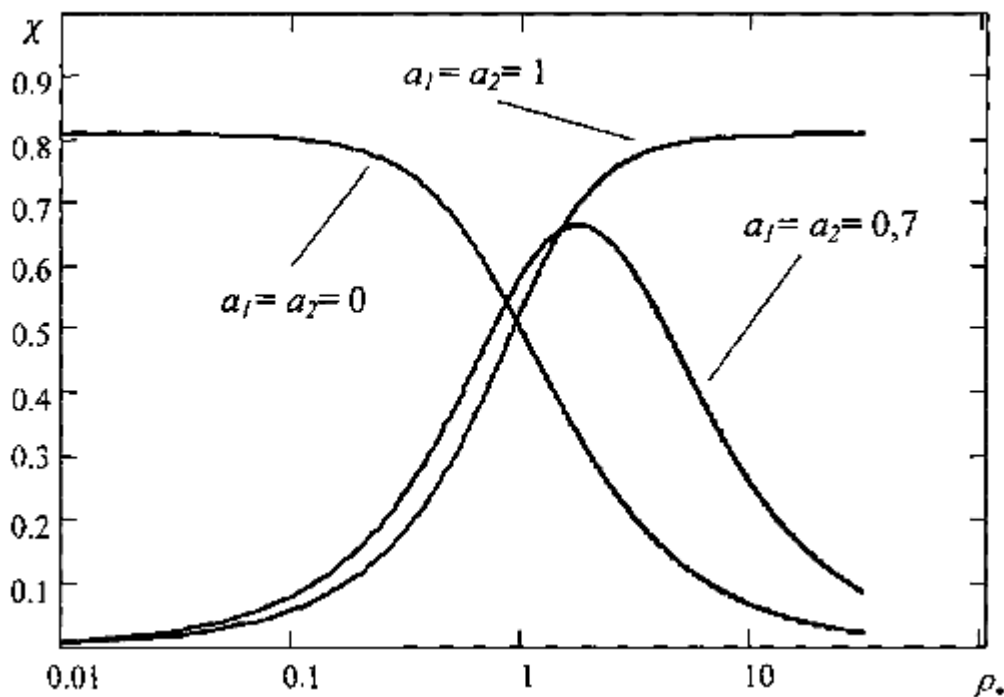


Рис. 5. Зависимость коэффициента мощности от изменения нагрузки для согласующихся цепей с различной компенсацией

Из выше представленных зависимостей можно сделать вывод, что схема, изображенная на рис. 1, обладает наилучшим сочетанием коэффициента передачи напряжения первой гармоники и коэффициентом мощности с полной продольной и поперечной компенсацией.

Список литературы

1. Донской А. В. и др. Ультразвуковые Электротехнологические установки / А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш. – 2-изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат; Ленинградское отд., 1982.
2. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966.
3. Келлер О. К., Кратыш Г. С., Лубяницкий Г. Д. Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977.
4. Матаушек И. Ультразвуковая техника. – М.: Металлургиздат, 1962.

5. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – Энергоатомиздат, 1986.
6. Моин В. С., Лаптев Н. Н. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергия, 1972.
7. Никитин В. Б. Транзисторные преобразователи постоянного напряжения в синусоидальное // Полупроводниковые приборы и их применение: сб. ст. – М.: Советское радио, 1965. – Вып. 14.
8. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г. В. Зевеке. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. Печатников М. Н., Гриневич В. И., Батков Г. С. Способ ибрационного формирования изделий из порошка // Авторское свидетельство. № 954184, 1981.
10. Редько В. В. Источники питания ультразвуковых пьезокерамических преобразователей: дис... канд. тех. наук. – Т., 2002. – 131 с.
11. Физика и техника мощного ультразвука: в 3 т. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга, 1970.
12. Электрические и ультразвуковые способы обработки материалов / Под ред. И. Г. Космачева. – Л.: Лениздат, 1958.

Рецензенты:

Артюхов И. И., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., г. Саратов.

Угаров Г. Г., д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., г. Саратов.