УДК 681.586

В. М. Шарапов[1], *д.т.н., профессор*,
О. Н. Петрищев[2], *д.т.н., профессор*,
А. Г. Лейко[2], *д.т.н., профессор*,
К. В. Базило[1], *к.т.н.*,
А. М. Салагор[1], *к.т.н.*
[1]Черкасский государственный технологический университет
б-р Шевченко, 460, г. Черкассы, 18006, Украина
v_sharapov@rambler.ru
[2]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
проспект Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА РАБОТУ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Робота присвячена актуальним питанням вдосконалення п'єзоелектричних трансформаторів. П'єзоелектричні трансформатори знаходять широке застосування при створенні мініатюрних пристроїв систем живлення завдяки своїм характеристикам. Основною особливістю роботи п'єзоелектричного трансформатора є резонансний характер перетворення енергії в порівняно вузькій смузі частот. Від характеру навантаження залежать характеристики п'єзоелектричного трансформатора. У статті досліджено вплив навантаження різного характеру на роботу п'єзоелектричних трансформаторів. Побудовано еквівалентну схему п'єзоелектричних трансформаторів з комплексним навантаженням. Використання запропонованої еквівалентної схеми дозволяє за допомогою прикладних програм проводити оцінювання характеристик, прогнозувати параметри і режим роботи п'єзоелектричних трансформаторів. Представлено результати порівняння характеристик експериментального зразка і еквівалентної схеми. Таким чином, шляхом зміни характеру та величини навантаження можлива оптимізація характеристик п'єзоелектричного трансформатора.

Ключові слова: *п'єзоелектричний перетворювач, трансформатор, навантаження, амплітудно-частотна характеристика, еквівалентна схема.*

Пьезоэлектрические преобразователи широко используются в электроакустике, гидроакустике, в ультразвуковой, медицинской, измерительной технике, в сканирующих зондовых наномикроскопах, пьезодвигателях, в других областях науки и техники [1-3].

Для изготовления пьезоэлектрических преобразователей используют пьезоэлементы в виде пьезорезонаторов и пьезотрансформаторов. Последние в ряде случаев позволяют улучшить характеристики преобразователей [2, 3].

Благодаря малым шумам, высокой гальванической развязке, хорошей изоляции и невоспламеняемости, возможности работы на высоких частотах и нечувствительности к магнитным полям пьезоэлектрические трансформаторы находят широкое применение при создании миниатюрных устройств систем питания [6].

Пьезоэлектрическим трансформатором условно может быть назван пьезоэлектрический элемент с тремя и более электродами, подключаемыми к одному или нескольким источникам электрического сигнала и нагрузкам. Часть пьезоэлектрического трансформатора, которая подключается к источнику электрического сигнала, будем называть входной, а часть, подключаемую к нагрузке – выходной [1-5].

Основной особенностью работы пьезоэлектрического трансформатора является резонансный характер преобразования энергии в сравнительно узкой полосе частоты. Максимальные значения основных параметров пьезоэлектрических трансформаторов – коэффициента трансформации, КПД, выходной мощности – достигаются при его работе на резонансной частоте [6].

Пьезоэлектрический элемент представляет собой электромеханическую колебательную систему с достаточно высокой добротностью. Присоединение к такой системе

механических или электрических элементов изменяет ее параметры [4].

В схемах с пьезоэлектрическим трансформатором последующая цепь может являться емкостной, индуктивной или активной нагрузкой. От характера нагрузки зависят характеристики пьезоэлектрического трансформатора.

Целью данной работы является исследование влияния электрической нагрузки на работу пьезоэлектрического трансформатора.

Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического трансформатора изображена на рис. 1 [1-3], где L_d, C_d, R_d – динамические индуктивность и емкость и активные потери в пьезоэлементе.

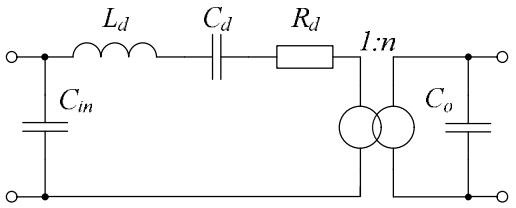


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического трансформатора

Эквивалентные схемы пьезоэлектрического трансформатора при подключении к нему нагрузки различного характера представлены на рис. 2.

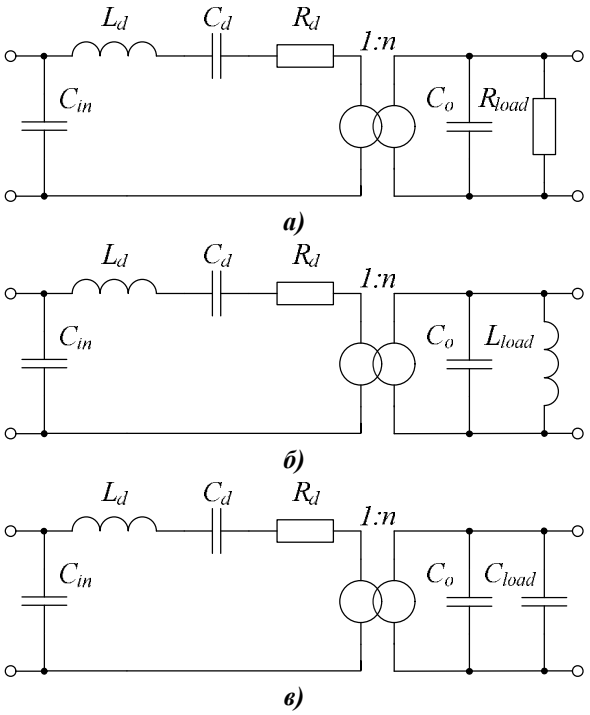


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического трансформатора:
а) с активной нагрузкой; *б)* с индуктивной нагрузкой; *в*) с емкостной нагрузкой

Эквивалентная схема (рис. 2) может быть упрощена путем отражения цепи вторичной обмотки на первичную (рис. 3).

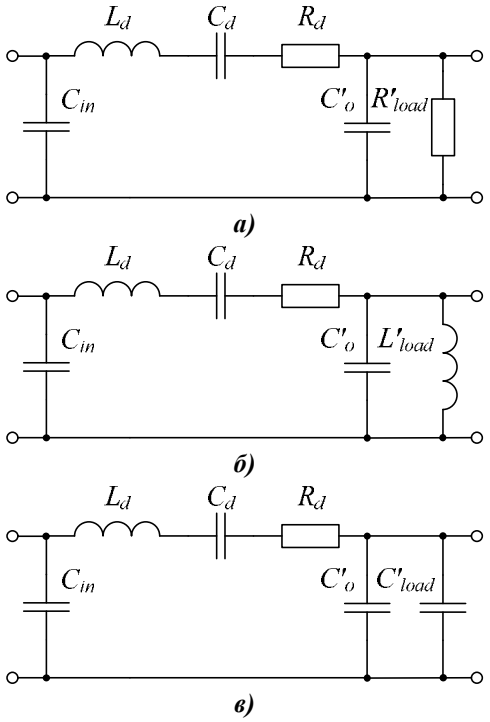


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического трансформатора при отражении вторичной обмотки на первичную:
а) с активной нагрузкой; *б)* с индуктивной нагрузкой; *в*) с емкостной нагрузкой

Значения отраженного сопротивления R'_{load}, отраженных емкостей C'_{load} и C'_o, отраженной индуктивности L'_{load} и отраженного выходного напряжения U'_{out} будут равны:

$$R'_{load} = \frac{R_{load}}{n^2}; \quad (1)$$

$$L'_{load} = \frac{L_{load}}{n^2}; \quad (2)$$

$$C'_o = n^2 \cdot C_o; \; C'_{load} = n^2 \cdot C_{load}; \quad (3)$$

$$U'_{out} = \frac{U_{out}}{n^2}, \quad (4)$$

где R_{load} – активное сопротивление нагрузки; C_o – выходная емкость; C_{load} – емкостная нагрузка; L_{load} – индуктивная нагрузка; U_{out} – выходное напряжение; n – коэффициент передачи идеального трансформатора.

Эквивалентная схема пьезоэлектрического трансформатора при подключении к нему комплексной нагрузки, построенная с помощью метода электромеханических аналогий [7], представлена на рис. 4.

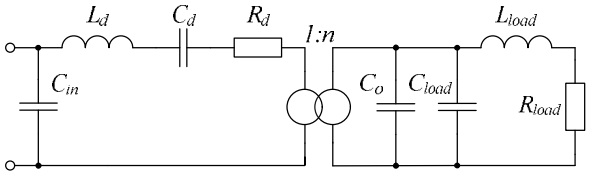
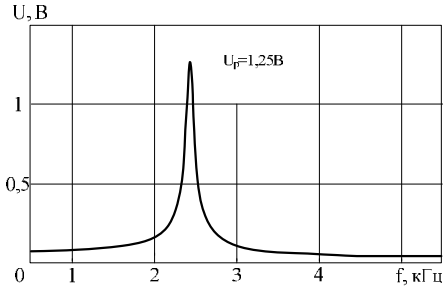
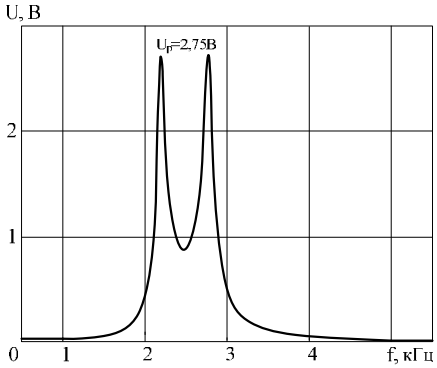


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема пьезоэлектрического трансформатора с комплексной нагрузкой

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) пьезоэлектрического трансформатора на основе биморфного элемента от преобразователя ЗП-19 и трансформатора с комплексной нагрузкой показаны на рис. 5.



а)



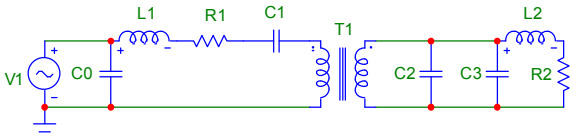
б)

Рис. 5. АЧХ трансформатора без (*а*) и с комплексной нагрузкой (*б*)

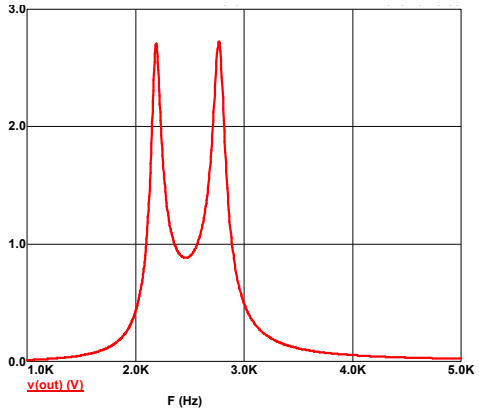
Как видно из рис. 5, подключение нагрузки к выходу пьезоэлектрического трансформатора изменяет его характеристики.

Аналитические выражения для расчета АЧХ таких колебательных систем отсутствуют, поэтому определение АЧХ зачастую проводят экспериментальным путем, что не всегда удобно и приводит к увеличению времени проектирования пьезоэлектрических трансформаторов. Использование моделей позволяет при помощи прикладных программ производить оценку характеристик и прогнозирование параметров и режимов работы пьезоэлектрических трансформаторов.

Поэтому для трансформатора с комплексной нагрузкой была построена схемотехническая модель (рис. 6, *а*) и проведено ее моделирование в программе Micro-Cap (рис. 6, *б*).



а)



б)

Рис. 6. Схемотехническая модель пьезоэлектрического трансформатора с комплексной нагрузкой (*а*) и результаты моделирования АЧХ в программе Micro-Cap (*б*)

Матрицы сопротивлений и напряжений для данной эквивалентной схемы (рис. 6, *а*) могут быть записаны как:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n} & -1 \\ R_g & X_{in} & 0 & 0 \\ 0 & X_{in} & Z_d & \frac{Z_{out}}{n} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E \\ 0 \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Выходное напряжение пьезоэлектрического трансформатора равно:

$$U_{out} = \frac{E \cdot X_{in} \cdot X_{out}}{n\left(\left(X_{in}\right)^2 - \left(R_g + X_{in}\right)\left(X_{in} + Z_d + X_{out}/n^2\right)\right)}, \qquad (6)$$

где

$$Z_d = j\omega L_d + \frac{1}{j\omega C_d} + R_d; \; X_{in} = \frac{1}{j\omega C_{in}};$$

$$Z_{out} = \frac{X_{Cout} \cdot Z_{load}}{X_{Cout} + Z_{load}}; \; X_{Cout} = \frac{1}{j\omega C_{out}}; \; \omega = 2\pi f;$$

$$Z_{load} = j\omega L_{load}; \frac{1}{j\omega C_{load}}; R_{load};$$

L_d, C_d, R_d – динамические электрические параметры пьезоэлектрического трансформатора; C_{in}, C_{out} – входная и выходная емкости пьезоэлектрического трансформатора; n – коэффициент передачи идеального трансформатора; R_g – сопротивление генератора; L_{load}, C_{load}, R_{load} – индуктивная, емкостная или активная нагрузки пьезоэлектрического трансформатора.

Согласно (5), (6) проведено моделирование амплитудно-частотной характеристики пьезоэлектрического трансформатора с комплексной нагрузкой в программе Mathcad (рис. 7).

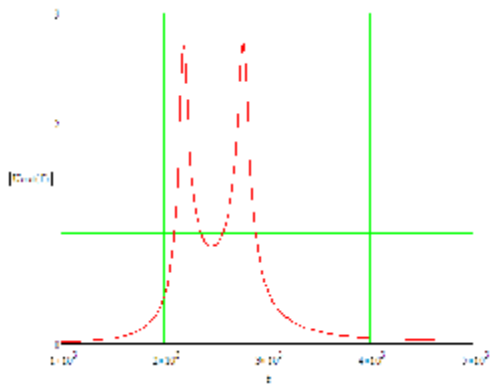


Рис. 7. Результаты моделирования АЧХ в программе Mathcad

Как видно из рис. 5-7, амплитудно-частотные характеристики построенных моделей практически совпадают с характеристиками экспериментального образца.

Таким образом, путем изменения характера и величины нагрузки возможна оптимизация характеристик пьезоэлектрического трансформатора.

Выводы:

1. Проведено исследование пьезоэлектрического трансформатора с емкостной, индуктивной и активной нагрузкой.

2. Построена эквивалентная схема замещения (схемотехническая модель) пьезоэлектрического трансформатора с нагрузкой различного характера.

3. Предложенная эквивалентная схема позволяет при помощи прикладных программ производить оценку характеристик, прогнозировать параметры и режим работы пьезоэлектрических трансформаторов.

4. Путем изменения характера и величины нагрузки возможна оптимизация характеристик пьезоэлектрического трансформатора.

Список литературы

1. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 498 p.
2. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / [В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула и др.] ; под ред. В. М. Шарапова. – Черкассы : Вертикаль, 2010. – 278 с.
4. Шарапов В. М. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула // Электроника (Москва). – 2012. – № 5. – С. 96–102.
5. Лавриненко В. В. Пьезоэлектрические трансформаторы / В. В. Лавриненко. – М. : Энергия, 1975. – 112 с.
6. Климашин В. М. Новые области применения пьезотрансформаторов / В. М. Климашин, В. Г. Никифоров, А. Я. Сафронов, В. К. Казаков // Компоненты и технологии. – 2004. – № 1. – С. 56–60.
7. Ольсон Г. Динамические аналогии / Г. Ольсон. – М. : Гос. изд-во иностр. лит., 1947. – 224 с.
8. Котельников В. А. Основы радиотехники / В. А. Котельников, А. М. Николаев. – М. : Гос. изд-во литературы по вопросам связи и радио, 1950. – Ч. I. – 372 с.

References

1. Sharapov, V. (2011) Piezoceramic sensors. Heidelberg, Dordrecht, London, New York : Springer Verlag, 498 p.
2. Sharapov, V. M., Musienko, M. P. and Sharapova, E. V. (2006) Piezoelectric sensors. Moscow: Technosphera, 632 p. [in Russian].
3. Sharapov, V. M, Minaev, I. G., Sotula, Zh. V. et al. (2010) Piezoceramic transformers and sensors. Cherkasy : Vertical, 278 p. [in Russian].
4. Sharapov, V. M. and Sotula, Zh. V. (2012) Piezoceramic transducers. New design technologies. *Electronika* (Moscow), (5), pp. 96-102 [in Russian]
5. Lavrinenko, V. V. (1975(Piezoelectric transformers. Moscow: Energy, 112 p. [in Russian].

6. Klimashin, V. M., Nikiforov, V. G., Safronov, A. Ya. and Kazakov, V. K. (2004) New applications for piezoelectric transformers. *Komponenty i technologii*, (1), pp. 56-60 [in Russian].
7. Olson, H. (1947) Dynamical analogies. Moscow: Hos. izd-vo inostr. lit., 224 p. [in Russian].
8. Kotel'nikov, V. A. and Nikolaev, A. M. (1950) Fundamentals of radio engineering. Moscow: Hos. izd-vo literatury po voprosam svyazi i radio, P. I, 372 p. [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 15.04.2014.

ELECTRICAL LOAD INFLUENCE ON THE WORK OF PIEZOELECTRIC TRANSFORMER

V. M. Sharapov[1], *Dr.Tech.Sc.*, *professor*,
O. N. Petrishchev[2], *Dr.Tech.Sc.*, *professor*,
A. G. Leiko[2], *Dr.Tech.Sc.*, *professor*,
K. V. Bazilo[1], *Ph.D.,*
A. M. Salagor[1], *Ph.D.*
[1]Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
v_sharapov@rambler.ru
[2]National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

The work is devoted to actual problems of the improvement of piezoelectric transformers. Piezoelectric transformers are widely used in the creation of miniature devices of power systems due to their characteristics. The main feature of the work of piezoelectric transformer is resonant nature of energy transformation in relatively narrow band. The changes of piezoelectric transformers characteristics are possible due to external circuit for piezoelectric element – electrical, mechanical or acoustic one. Characteristics of piezoelectric transformer depend on the nature of the load. The paper describes the influence of various kinds load on the work of piezoelectric transformers. The equivalent circuit modeling of piezoelectric transformers with complex load is made. The use of the offered equivalent circuit allows with the application of programs to assess characteristics, to predict the parameters and operation mode of piezoelectric transformers. The results of the comparison of characteristics of experimental sample and equivalent circuit are shown. So by changing the nature and value of the load it is possible to optimize the characteristics of piezoelectric transformer.

Keywords: *piezoelectric transducer, transformer, load, amplitude-frequency response, equivalent circuit.*