УДК 621.314.21

МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ И ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ ЧАСТОТ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА

А.Н.Соловьев, И.Н.Соловьев, А.А.Иванов

Институт электронных и информационных систем НовГУ, cah.zuljin@gmail.com

Приводятся результаты теоретического моделирования параметров пьезоэлектрического трансформатора конструкции Розена. Предложен метод по увеличению диапазона рабочих частот и коэффициента трансформации, суть которого заключается в представлении возбудителя в виде многослойной структуры с различной длиной слоев.

Ключевые слова: пьезоэлектрический эффект, пьезоэлектрический трансформатор, резонансная частота, коэффициент трансформации

In this article the theoretical modeling of the Rozen piezoelectric transducer's parameters is described. The method of increasing in working frequency range and turns ratio is proposed. The method consists in presenting the exciter in the form of a multilayer structure with layers of different lengths.

Keywords: piezoelectric effect, piezoelectric transducer, resonance frequency, turns ratio

1. Введение

В силовой электронной промышленности последних двух десятилетий актуальной стала миниатюризация источников питания. Появилась необходимость установки малогабаритных трансформаторов на печатную плату, чтобы уменьшить габаритные размеры преобразователей. В отличие от традиционных электромагнитных трансформаторов явными преимуществами обладают пьезоэлектрические трансформаторы (ПЭТ) из-за их малых габаритных размеров, отсутствия обмоточных элементов, пригодности для автоматизированного производства и установки на печатную плату, высокой степени изоляции, большого коэффициента полезного действия и низкой стоимости [1]. ПЭТ, безусловно, являются перспективными компонентами для компактных, высоковольтных и маломощных модулей — таких, как блоки питания ноутбуков, источники питания для холодных люминесцентных ламп, которые используются для подсветки экранов ноутбуков, и ламп неонового света. Наряду с достоинствами, указанными выше, ПЭТ имеет и свои недостатки — узкая полоса рабочих частот, низкий коэффициент трансформации на всем диапазоне частот и небольшая выходная мощность [2].

В качестве основного параметра для увеличения эффективности ПЭТ можно выделить полосу рабочих частот. Коэффициент трансформации (КТ) имеет максимальное значение в диапазоне рабочих частот (области резонанса). Отсюда следует необходимость нахождения способа по расширению диапазона рабочих частот. Целью данной статьи является определение метода увеличения КТ и диапазона рабочих частот ПЭТ. Суть метода заключается в применении многослойной структуры с различными геометрическими размерами слоев. Для эффективного увеличения диапазона рабочих частот были поставлены следующие задачи: анализ конструкции ПЭТ, составление электрической эквивалентной схемы (ЭЭС) ПЭТ, определение и последующий анализ формулы для расчета КТ, составление математической модели ПЭТ и проведение компьютерного моделирования в программе Maple. В конечном итоге получена теоретическую зависимость КТ от частоты для нескольких образцов ПЭТ с различным количеством слоев.

Теоретическое моделирование

Рассмотрим ПЭТ конструкции Розена [2]. Основными параметрами, характеризующими работу ПЭТ, являются резонансная частота, диапазон рабочих частот, коэффициент трансформации, коэффициент полезного действия (КПД) и выходная мощность. Особенно важно контролировать коэффициент трансформации и диапазон рабочих частот.

На рис.1 представлена конструкция и схема включения ПЭТ, который представляет собой каскадное соединение двух резонаторов (входной резонатор — возбудитель, выходной резонатор — генератор). Первый резонатор представляет собой многослойную конструкцию с разной длиной и толщиной слоев, так как диапазон частот и резонансная частота зависят от длины пьезоэлемента. Многослойная структура дает возможность расширения диапазона рабочих частот.

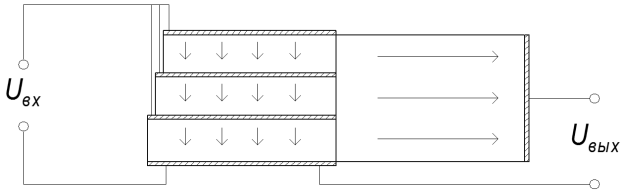

Рис.1. Конструкция ПЭТ с трехслойным возбудителем и схема включения

В данной работе исследуется однослойная, трехслойная и пятислойная структура возбудителя. При параллельном включении слоев первого резонатора происходит увеличение диапазона рабочих частот, так как возбуждаемые механические деформации складываются, при этом необходимо, чтобы механические колебания, создаваемые в каждом слое возбудителя, находились в фазе.

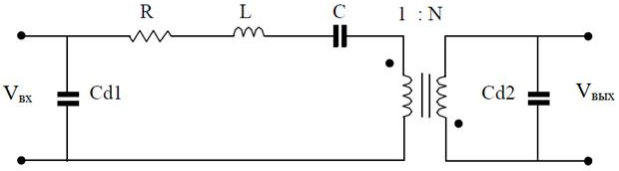

Рис.2. Упрощенная электрическая эквивалентная схема ПЭТ

На рис.2 представлена упрощенная электрическая эквивалентная схема (ЭЭС) ПЭТ. Она была составлена методом электромеханических ассоциаций [1]. ЭЭС характеризуется статической емкостью (C) и индуктивностью (L), входной и выходной динамическими емкостями (C_{d1} и C_{d2} соответственно), входным (R) и внутренним (z_0) сопротивлением, пьезоэлектрическим коэффициентом трансформации (N). После анализа данной схемы были получены уравнения для расчета ее параметров.

Динамические емкости возбудителя C_{d1} и генератора C_{d2} описываются следуюшими выражениями:

$$C_{d1} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1-k_{31}^2) \cdot b \cdot l_1}{a},\ C_{d2} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1-k_{33}^2) \cdot b \cdot a}{l_2},$$

где ε_{33}^T — диэлектрическая проницаемость материала; k_{31} — коэффициент электромеханической связи поперечной моды; k_{33} — коэффициент электромеханической связи продольной моды; b — ширина ПЭТ; a — толщина ПЭТ; l_1 — длина возбудителя; l_2 — длина генератора.

Статическая индуктивность генератора L определяется формулой

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{d2}},$$

где ω — частота генератора.

Статическая емкость C является емкостью механической фазы:

$$C = \frac{l_1}{\pi^2 \cdot a \cdot b \cdot Y_1^E},$$

где Y_1^E — модуль Юнга пьезоэлектрического материала.

Внутреннее сопротивление z_0 ПЭТ выражается равенством

$$z_0 = a \cdot b \cdot \sqrt{\rho \cdot Y_1^E},$$

где ρ — плотность материала.

На основной моде колебаний пьезоэлемента коэффициент трансформации имеет максимальное значение. Динамическая индуктивность механической фазы основной моды $L_2 = 4 \cdot a \cdot b \cdot l_1 \cdot \rho$. Сопротивление механической фазы $R = \frac{2\pi \cdot z_0}{Q_M}$, где Q_M — механическая добротность пьезоэлектрического материала.

Резонанс продольных по длине волн имеет место для случая, когда длина пластины кратна половине длины волны λ [2], поэтому формулу для расчета резонансной частоты f_p имеет вид

$$f_p = \frac{n}{2 \cdot l_1} \cdot \sqrt{\frac{Y_1^E}{\rho}},$$

где n — целое число (1, 2, 3, …), определяющее номер резонанса, т.е. номер моды колебаний.

Диапазон рабочих частот Δf для продольных по длине колебаний определяется по формуле [1]:

$$\Delta f = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{k_{31}^2}{1-k_{31}^2} \cdot f_p.$$

Коэффициент трансформации K_T ПЭТ конструкции Розена рассчитывается по формуле [1]

$$K_T = \frac{4 \cdot Q_M \cdot k_{33}^2 \cdot d_{31} \cdot l_1}{\pi^2 \cdot (1-k_{33}^2) \cdot d_{33} \cdot a},$$

где d_{31} и d_{33} — пьезоэлектрические константы материала, а КПД данного трансформатора — по формуле

$$\eta = \frac{2 \cdot Q_M \cdot k_{33}^2}{2 \cdot Q_M \cdot k_{33}^2 + \pi^2}.$$

Коэффициент трансформации в режиме максимума КПД

$$K_{T\eta} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{K_T \cdot \eta}{Q_M \cdot k_{33}^2}.$$

Выходная мощность ПЭТ

$$P = U_{вых}^2 \cdot K_{T\eta} \cdot \omega \cdot C_{d2},$$

где $U_{вых}$ — выходное напряжение генератора.

С использованием вышеприведенных формул была составлена математическая модель ПЭТ конструкции Розена в программе Maple. В качестве материала пьезоэлектрического трансформатора был выбран цирконат-титанат свинца марки ПКВ-460, его параметры приведены в табл.1. По сравнению с традиционным пьезоэлектрическим материалом марки ЦТС-19 у ПКВ-460 на порядок выше механическая добротность. Известно, что величина K_T и диапазон рабочих частот сильно зависят от добротности пьезоэлектрического материала. Результаты расчета параметров ЭЭС приведены в табл.2, а параметров трансформатора — в табл.3.

Таблица 1

Параметры пьезоэлектрического материала марки ПКВ-460

ρ (×10³), кг/м³	d_{31} (×10¹²), Кл/Н	d_{33} (×10¹²), Кл/Н	Q_M	ε_{33}^T	k_{31}	k_{33}
7,6	145	315	1200	1400	0,33	0,68

Таблица 2

Результаты расчетов параметров ЭЭС пьезоэлектрического трансформатора

z_0, Ом	C_{d1}, нФ	C_{d2}, пФ	L, пГн	C, нФ	L_2, мкГн	R, Ом
17,8	2,2	0,53	18	19	243	0,093

Таблица 3

Результаты расчетов параметров ПЭТ

Кол-во слоев возбудителя	f_p, кГц	Δf, кГц	K_T ($U_{вх}$=1В)	$U_{вых}$, кВ	η, %
1	150	0,7	4880	5	95
3	150	2,2	7200	7	95
5	150	3,6	8500	8,5	95

На рис.3 представлена зависимость K_T от частоты для трех ПЭТ с разным количеством слоев (получена в программе Maple).

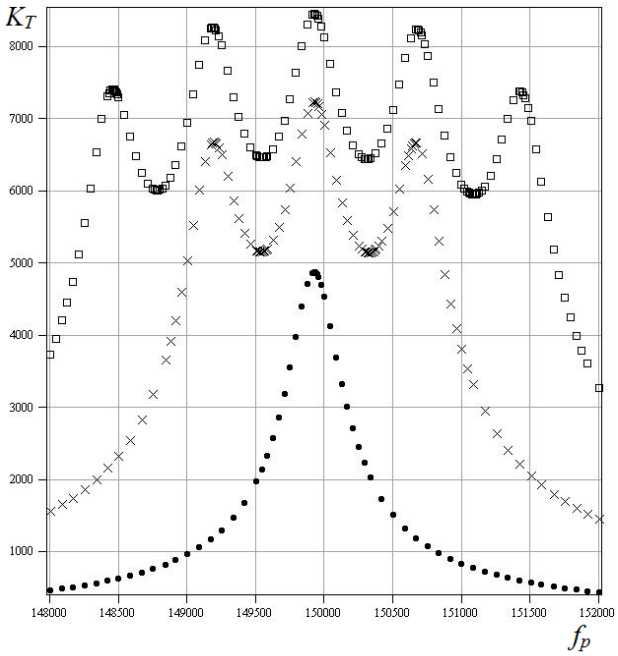

Рис.3. График зависимости коэффициента трансформации от частоты для однослойной, трехслойной и пятислойной структуры возбудителя (точка — однослойный возбудитель, крест — трехслойный, квадрат — пятислойный)

При анализе данной зависимости было обнаружено, что с увеличением количества слоев возбудителя происходит существенное увеличение K_T и расширение диапазона рабочих частот. При этом ширина диапазона рабочих частот и K_T для однослойной структуры составили 0,7 кГц и 4800 соответственно, для трехслойной — 2,2 кГц и 7200, для пятислойной — 3,6 кГц и 8500. Также было определено, что коэффициент полезного действия образцов не зависит от количества слоев и составляет 95%.

Полученные результаты показывают возможность увеличения диапазона рабочих частот более чем в 3 раза и коэффициента трансформации более чем на 77%. КПД остается неизменным на всем диапазоне рабочих частот, тем самым улучшается эффективность ПЭТ конструкции Розена.

Заключение

В ходе выполнения работы была рассмотрена многослойная структура, представляющая собой пьезоэлектрический трансформатор с расширенным диапазоном рабочих частот. Было проведено математическое моделирование в программе Maple, при котором были получены зависимости коэффициента трансформации от частоты для однослойного, трехслойного и пятислойного возбудителя пьезоэлектрического трансформатора. Применение многослойной структуры ПЭТ позволило существенно расширить диапазон рабочих частот и увеличить коэффициент трансформации.

1. Лавриненко В.В. Пьезоэлектрические трансформаторы. М., 1975. 215 с.
2. Lin C.Y. and Lee F.C. Piezoelectric Transformer and its applications. VPEC Power Electron. Sem. Proc., 1995. 114 p.

Bibliography (Transliterated)

1. Lavrinenko V.V. P'ezoehlektricheskie transformatory. M., 1975. 215 s.
2. Lin C.Y. and Lee F.C. Piezoelectric Transformer and its applications. VPEC Power Electron. Sem. Proc., 1995. 114 p.