

УДК 621.317

*к.т.н. Паэранд Ю. Э., к.т.н. Потапов В. Д., Зинченко В. Л.
(ДонГТУ, г. Лисичанск, Украина)*

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРА

Получены аналитические выражения позволяющие количественно оценить влияние емкостной составляющей нагрузки на энергетические параметры пьезотрансформатора. Приведены результаты исследования влияния емкостной составляющей на энергетические параметры пьезотрансформатора. Показана возможность целенаправленного изменения энергетических параметров пьезотрансформатора.

***Ключевые слова:** пьезотрансформатор, согласованный режим, коэффициент полезного действия, выходная емкость.*

Пьезоэлектрические трансформаторы (ПТ) находят все более широкое применение при построении новой электронной аппаратуры в различных устройствах для преобразования уровней сигналов. Они характеризуются высокой надежностью, для их производства не требуется уникального оборудования. На основе единого технологического процесса можно обеспечить выпуск больших партий пьезоэлементов с различными электрическими параметрами.

Отсутствие обмоток, невозгораемость, высокая надежность, компактная и монолитная конструкция, стойкость к радиации – все это явилось причиной широких исследований пьезоэлектрических трансформаторов.

Одним из перспективных направлений является использование ПТ в газонаполненных осветительных приборах в качестве резонансных DC-AC конверторов. Последние исследования показали целесообразность использования многослойных пьезокерамических трансформаторов в новой осветительной технике. Разработчиков осветительной техники интересуют не только сравнительные характеристики конверторов по напряжению или по потребляемой мощности, но и размеры, позволяющие устанавливать их в цоколе лампы [1].

ПТ применяются в портативных компьютерах и жидкокристаллических мониторах. Кроме того, они используются в цифровых камерах, копировальных машинах, лазерных принтерах, портативных устройствах для определения географических координат, приборах ночного видения, ионизаторах, озонаторах и воздухоочистителях [2, 3].

Перспективным направлением использования ПТ является их применение в силовых устройствах для пьезотрансформаторной развязки электрических цепей управления [4].

Задачей данной работы является исследование режимов работы ПТ и особенностей его работы, в частности влияния емкостной составляющей нагрузки на его энергетические характеристики.

Пьезоэлектрический трансформатор представляет собой твердое тело, в котором входным электрическим напряжением возбуждаются механические колебания. Эти колебания на выходе трансформатора преобразуются снова в электрический сигнал. Прямое и обратное преобразование электрической энергии осуществляется за счет прямого и обратного пьезоэлектрического эффекта. Двойное преобразование энергии и резонансный характер явлений,

© Паэранд Ю. Э., 2016

© Потапов В. Д., 2016

© Зинченко В. Л., 2016

положенных в основу работы пьезотрансформатора, требует учета как механических, так и электрических явлений. Дифференциальные уравнения, описывающие механические явления в преобразователе, одинаковы по своей форме с уравнениями, описывающими процессы в электрической схеме. Использование электромеханических аналогий и понятия электромеханического трансформатора [5], позволяет заменить рассмотрение реального ПТ рассмотрением его эквивалентной электромеханической схемы с сосредоточенными параметрами, которая в области частот резонанса без учета диэлектрических потерь имеет вид, показанный на рисунке 1.

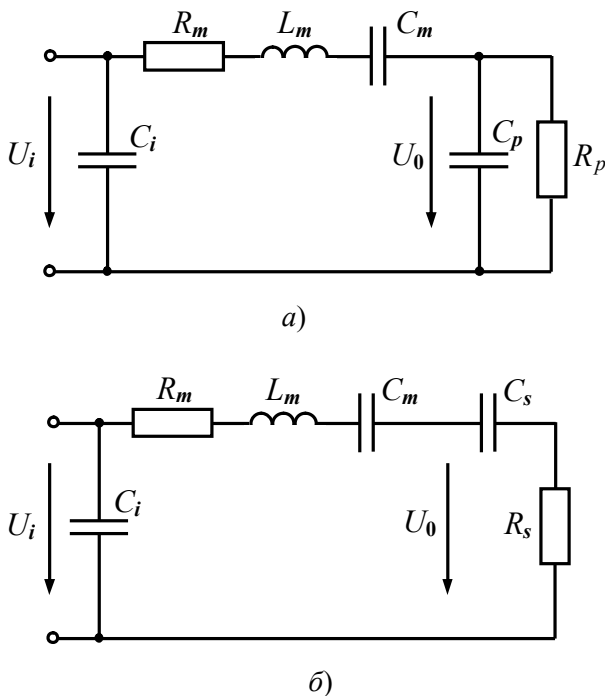


Рисунок 1 – Эквивалентные электрические схемы ПТ: а) параллельная, б) последовательная

Приведенные схемы с механической стороны характеризуются динамической емкостью C_m , динамической индуктивностью L_m и сопротивлением механических потерь R_m , а с электрической – входной емкостью C_i , выходными эквивалентными емкостями C_p (для параллельной схемы) и C_s (для последовательной схемы), а также

эквивалентными сопротивлениями электрической нагрузки R_p и R_s соответственно для параллельной и последовательной схем.

Величины эквивалентных емкостей и сопротивлений последовательной схемы замещения определяются из выражений [6]:

$$C_p = n^2 \cdot C_0, \quad (1)$$

$$R_p = \frac{R_e}{n^2}, \quad (2)$$

$$C_s = n^2 \cdot C_0 \cdot \frac{1 + (\omega \cdot C_0 \cdot R_e)^2}{(\omega \cdot C_0 \cdot R_e)^2}, \quad (3)$$

$$R_s = \frac{R_e}{n^2} \cdot \frac{1}{1 + (\omega \cdot C_0 \cdot R_e)^2}, \quad (4)$$

где C_0 – выходная емкость ПТ; R_e – сопротивление электрической нагрузки; n – пьезоэлектрический коэффициент трансформации; ω – частота входного сигнала.

В соответствии с эквивалентной схемой ПТ (рис. 1б), выражение для КПД трансформатора на резонансной частоте ω_p :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{ПТ}} = \frac{1}{1 + \frac{R_m}{R_s}}, \quad (5)$$

где $P_{ПТ}$ – потери мощности в ПТ.

После подстановки выражения (4) в (5) получим:

$$\eta = \frac{R_e}{R_m n^2 + R_m n^2 (\omega_p C_0 R_e)^2 + R_e}. \quad (6)$$

Потери мощности в ПТ

$$P_{ПТ} = \frac{U_i^2 R_m}{(R_m + R_s)^2}. \quad (7)$$

Они определяются соотношением сопротивления механических потерь R_m , и вносимым нагрузкой эквивалентным сопротивлением R_s .

Потери максимальны в режимах короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ):

$$P_{ПТ XX} = P_{ПТ КЗ} = U_i^2 / R_m. \quad (8)$$

В согласованном режиме мощность потерь в 4 раза меньше чем в режиме КЗ и XX:

$$P_{ПТ СР} = U_i^2 / 4. \quad (9)$$

В зависимости от режима работы сопротивление потерь R_m может составлять десятую и даже сотую часть вносимого сопротивления R_s [5]. Поэтому КПД пьезоэлектрических трансформаторов может достигать 99%. При таком соотношении сопротивлений добротность, которая обычно без нагрузки равна 50-1000, может быть уменьшена за счет сопротивления нагрузки до 10-30. Этим пользуются для расширения полосы пропускания узкополосных пьезоэлектрических трансформаторов [7].

Анализ выражений (3) и (4) показал, что при изменении сопротивления нагрузки R_e от 0 до ∞ величина эквивалентной емкости C_s для последовательной схемы замещения изменяется монотонно от ∞ до $n^2 C_0$. Эквивалентное сопротивление R_s изменяется выпукло от 0 до 0.

Исследование выражения (4) на экстремум показал, что максимальное значение активного сопротивления $R_{s \max}$, вносимого со стороны выхода ПТ, достигается при сопротивлении электрической нагрузки R_e на выходе ПТ равном $R_{e \text{кр}} = 1 / \omega_p C_0$. Значение этого сопротивления определится из выражения

$$R_{s \max} = \frac{1}{2n^2 \omega_p \cdot C_0}. \quad (10)$$

Такому режиму соответствует локальный минимум выходной мощности (при заданном входном напряжении)

$$P_{2 \min} = U_i^2 \frac{2n^2 \omega_p C_0}{1 + 2n^2 R_m \omega_p C_0}, \quad (11)$$

и максимальное значение КПД:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + 2n^2 R_m \omega_p C_0}. \quad (12)$$

На рисунке 2 приведены графики изменения зависимости КПД (кривая 1), нормированного значения мощности, отдаваемой нагрузке $P_{2 \text{ норм}} = P_2 / P_{ПТ КЗ}$ (кривая 2), нормированного значения мощности потерь в ПТ $P_{ПТ \text{ норм}} = P_{ПТ} / P_{ПТ КЗ}$ (кривая 3) и нормированного значения мощности потребляемой ПТ $P_{1 \text{ норм}} = P_1 / P_{ПТ КЗ}$ (кривая 4) от соотношения $k = R_e / R_m$. Графики приведены для многослойного пьезотрансформатора ТП-РМ 200402.

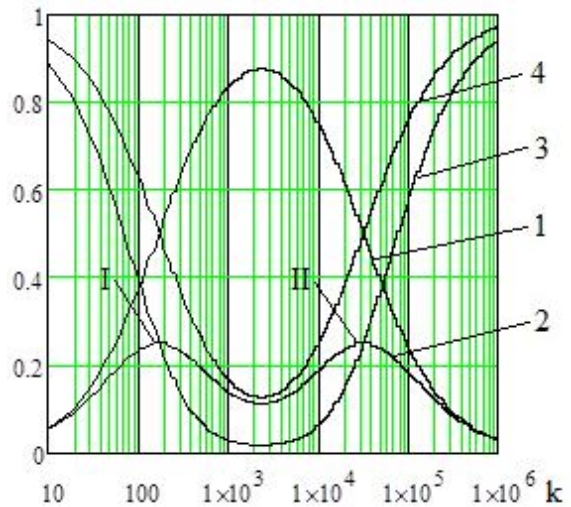


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента полезного действия ПТ (кривая 1), нормированного значения мощности потребляемой нагрузкой (кривая 2), нормированного значения мощности потерь в ПТ (кривая 3) и нормированного значения мощности, потребляемой ПТ (кривая 4), от величины k

Анализ приведенных зависимостей показывает, что области максимума КПД соответствуют минимальное значение мощности, потребляемой ПТ, при минимальных потерях в нем, а зависимость мощности, потребляемой нагрузкой, имеет два максимума (т. I и т. II) соответствующих определенным значениям сопротивления нагрузки.

В режиме согласованной нагрузки мощность, рассеиваемая на ПТ уменьшается (по сравнению с режимом XX) в 4 раза. Исходя из условия, что мощность, выделяемая в согласованном режиме (СР)

на сопротивлении механических потерь R_m в виде тепла, не должна превышать мощность в режиме холостого хода, входное напряжение в режимах согласованных нагрузок можно повысить в 2 раза по сравнению с режимом холостого хода, что приведет к увеличению мощности на нагрузке в 4 раза без риска перегрева и разрушения ПТ.

При произвольной нагрузке R_e доля мощности, передаваемой нагрузке на резонансной частоте, определяется соотношением сопротивлений R_s и R_m . Максимальная мощность отдаваемая нагрузке (согласованный режим P_{2CP}) наблюдается при $R_s = R_m$. Сопротивление R_s изменяется от нуля до нуля не монотонно, оно два раза достигает значения равного R_m , следовательно имеется два согласованных режима. Величина R_e в согласованном режиме:

$$R_{e\text{cp}} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4n^4 R_m^2 \omega_p^2 C_{02}^2}}{2n^2 R_m \omega_p^2 C_{02}^2}. \quad (13)$$

Из выражения (12) следует, что согласованный режим наступает при двух значениях сопротивления нагрузки, подключенной к выходу ПТ:

$$R_{e1cp} = n^2 R_m,$$

$$\text{СР при } R_{e1cp} < \omega_p C_0; \quad (14)$$

$$R_{e2cp} = 1 / R_m n^2 \omega_p^2 C_0,$$

$$\text{СР при } R_{e2cp} > \omega_p C_0. \quad (15)$$

Анализ выражения (15) показывает, что изменение значения емкости C_0 приводит к смещению точки второго СР в область меньших или больших значений нагрузки. Следовательно, выходной импеданс пьезотрансформатора может быть подстроен путем изменения емкости выходной секции ПТ под конкретную нагрузку.

На рисунке 3 приведены графики изменения зависимости КПД (кривая 1), нормированного значения мощности, отда-

ваемой нагрузке (кривая 2), нормированного значения мощности потерь в ПТ (кривая 3) и нормированного значения мощности потребляемой ПТ (кривая 4) от k при подключении дополнительных емкостей $C_{d1}=20$ пФ (рис. 3а) и $C_{d2}=140$ пФ (рис. 3б).

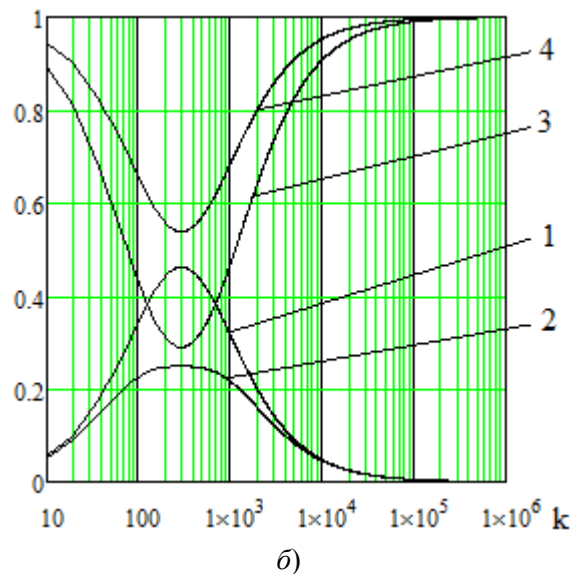
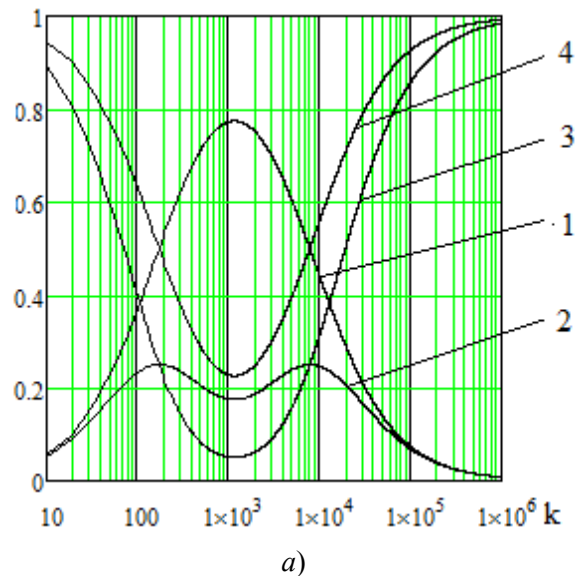


Рисунок 3 – Зависимости мощности, потребляемой нагрузкой, от удельного сопротивления нагрузки при подключении дополнительных емкостей $C_{d1}=20$ пФ (а) и $C_{d2}=140$ пФ (б)

Анализ приведенных зависимостей показывает, что при увеличении емкости выходной цепи второй максимум (т. II) смещается в сторону первого (т. I) и при некотором значении емкости (рис.3 б) они сливаются. Следовательно, выходной импеданс пьезотрансформатора может быть подстроен путем изменения емкости выходной секции ПТ под конкретную нагрузку.

Так, например, для достижения согласованного режима, при заданной нагрузке R_e и известных параметрах схемы замещения ПТ, необходимо подключить параллельно нагрузке дополнительную емкость

$$C_d = \sqrt{\frac{1}{R_m R_e \omega_p^2 n^2}} - C_0. \quad (16)$$

При определенных значениях C_d первый и второй СР сливаются, при дальней-

шем увеличении C_d согласованный режим вообще не наступает. На положение первого СР изменение емкостной составляющей нагрузки влияния не оказывает.

Выводы. Проведенные исследования показали, что максимально достижимому значению КПД соответствуют минимальное значение мощности, потребляемой ПТ, при минимальных потерях в нем, а зависимость мощности, потребляемой нагрузкой, имеет два максимума, соответствующих определенным значениям сопротивления нагрузки. При этом увеличение емкости выходной цепи приводит к смещению второго максимума в сторону первого вплоть до их слияния. Поддержание согласованного режима при изменении сопротивления нагрузки возможно осуществить путем подключения дополнительной емкости параллельно выходной цепи.

Бібліографічний список

1. Дослідження експериментальних характеристик комплексу п'єзотрансформатор-люмінесцентна лампа [О. Шкодзінський, І. Беякова, В. Пісьціо, В. Медвідь] // *Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми і перспективи»* (травень 2008). – Тернопіль: ТДТУ, 2008. – 148 с.
2. Новые области применения пьезотрансформаторов / В. М. Климашин, В. Г. Никифоров, А. Я. Сафронов, В. К. Казаков // *Компоненты технологии*. – 2004. – №1. – С. 56–59.
3. Паэранд Ю. Э. Вторичные источники электропитания с пьезоэлектрическими трансформаторами / Ю. Э. Паэранд, Д. А. Кривошей // *Електроніка і зв'язок: Тем. вип. Електроніка і нанотехнології*. – 2011. – № 3. – С. 121–125.
4. Wei Kuang. Development of piezoelectric transformer-coupled solid state relays for electrical circuit control in railway systems / Wei Kuang, Siu Wing Or, Chung Ming Leung // *International Journal of Rail Transportation*. – Department of Electrical Engineering The Hong Kong Polytechnic University. Published online <http://www.tandfonline.com/loi/tjrt20>: 29 May 2013. – pp. 74–86.
5. Лавриненко В. В. Пьезоэлектрические трансформаторы / В. В. Лавриненко. – М.: «Энергия», 1975. – С. 112.
6. Влияние емкостной составляющей нагрузки на коэффициент трансформации пьезотрансформатора / Ю. Э. Паэранд, В. Д. Потапов, П. В. Охрименко // *Материалы Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии»* (май 2014). – Одесса, 2014. – С. 204.
7. Ерофеев А. А. Пьезоэлектрические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике / А. А. Ерофеев, Г. А. Данов, В. Н. Фролов. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 128.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. НУБиП Заблудским Н. Н., д.т.н., проф. КНУТД Шавелкиным А. А.

Статья поступила в редакцию 01.02.16.

**к.т.н. Паеранд Ю. Е., к.т.н. Потапов В. Д., Зинченко В. Л. (ДонДТУ, м. Лисичанськ, Україна)
ВПЛИВ ЄМНІСНОЇ СКЛАДОВОЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ
П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА**

Отримано аналітичні вирази що дозволяють кількісно оцінити вплив ємнісної складової навантаження на енергетичні параметри п'єзотрансформатора. Показана можливість цілеспрямованої зміни енергетичних параметрів ПТ. Наведено результати дослідження впливу ємнісної складової на енергетичні параметри п'єзотрансформатора.

Ключові слова: п'єзотрансформатор, узгоджений режим, коефіцієнт корисної дії, вихідна ємність.

PhD (Engineering) Paerand Yu. E., PhD (Engineering) Potapov V. D., Zinchenko V. L. (DonSTU, Lisichansk, Ukraine)

**INFLUENCE OF CAPACITIVE LOAD COMPONENT ON PIEZOELECTRIC
TRANSFORMER POWER OPTIONS**

The analytical expressions allow to quantify the effect of the capacitive component of the load on the energy parameters of piezoelectric transformer. The results of studies of the effect of the capacitive component in the energy parameters of the piezoelectric transformer. The possibility of purposeful change power settings piezoelectric transformer.

Key words: piezoelectric transformer, agreed mode, efficiency, output capacitance.