

УДК 537.226

## **ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРАХ С НИЗКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ**

**С. Г. Бочкарев, Б. Б. Педько, Е. Г. Точинский**

*Тверской государственный университет,  
кафедра физики сегнетоэлектриков и пьезоэлектриков*

В работе рассмотрена задача создания высоковольтных преобразователей малой мощности для питания различных электронных приборов со сниженными массогабаритными показателями и высоким КПД в широком диапазоне нагрузок на основе пьезоэлектрических трансформаторов.

Развитие современной техники идет по пути минимизации массогабаритных показателей радиоэлектронной аппаратуры с целью создания мобильных устройств, способных работать от портативных источников энергии. Выходные напряжения таких источников составляют 1,2 В на один элемент (свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, никель-кадмиевые и никель-металлгидридные элементы питания), либо 3,6 В для литий-ионных и литий-полимерных элементов питания. Таким образом, все чаще встает задача создания высоковольтных преобразователей малой мощности с коэффициентом преобразования напряжения 1000...10 000 раз и мощностью менее 0,5 Вт для питания различных электронных приборов. Использование в основе таких устройств пьезоэлектрических трансформаторов (ТПЭ) приводит к усложнению электрической схемы, однако позволяет снизить массогабаритные показатели (по сравнению с электромагнитными трансформаторами), а также получить более высокий КПД в широком диапазоне нагрузок [1; 2]. При отсутствии жестких требований к стабилизации выходного напряжения предпочтительней применять одномерные способы управления ТПЭ. Наиболее распространенные схемы управления ТПЭ основаны на использовании микросхем для управления импульсными источниками питания (например, TL494), интегральных таймеров (серия 555), операционных усилителей и включают в себя достаточно большое количество дискретных радиоэлементов. Поскольку эта элементная база рассчитана на достаточно высокое напряжение питания (не менее 5 В), авторы ставили задачи как минимизации количества элементов схемы, так и использования активных элементов с питанием от 2 В, потребляющих минимальный ток. Микроконтроллеры фирмы Microchip серий PIC16FXXX, PIC18FXXX не только соответствуют этим требованиям,

но и предоставляют возможность гибкого управления параметрами высоковольтного преобразователя.

Выбор способа управления ТПЭ также зависит от характера изменения нагрузки и питающего напряжения. При отсутствии резкого изменения тока в нагрузке (в том числе и режима короткого замыкания) целесообразно применять частотный способ управления ТПЭ. Для реализации этого способа управления в состав микроконтроллера должны входить порты ввода/вывода, аналого-цифровой преобразователь, источник опорного напряжения (можно использовать внешний), супервизор питания.

Функциональная схема устройства представлена на рис.1. Она состоит из следующих элементов: управляемый генератор с возможностью перестройки частоты (Г), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с источником опорного напряжения (ИОН), блока коррекции (БК), усилителя мощности (УМ), ТПЭ, умножителя напряжения (ВУН) и цепи обратной связи (ОС). Управляемый генератор, АЦП и блок коррекции реализованы в микроконтроллере. Сигнал обратной связи снимается с помощью резистивного делителя с первого каскада высоковольтного умножителя, что делает возможным получение высокого КПД преобразователя, хотя и приводит к некоторому снижению коэффициента стабилизации.

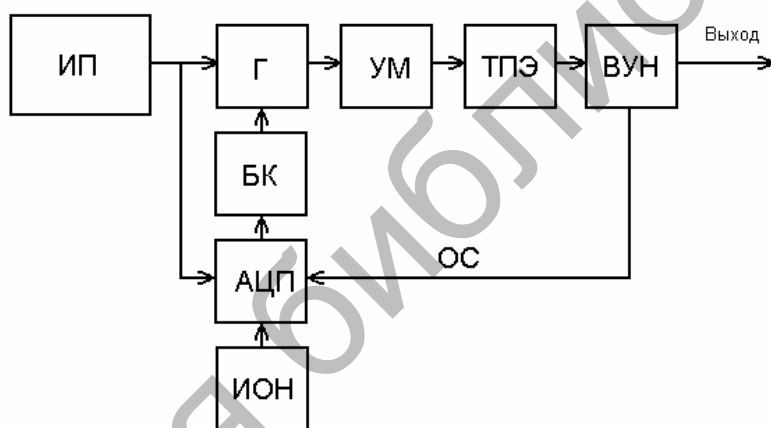


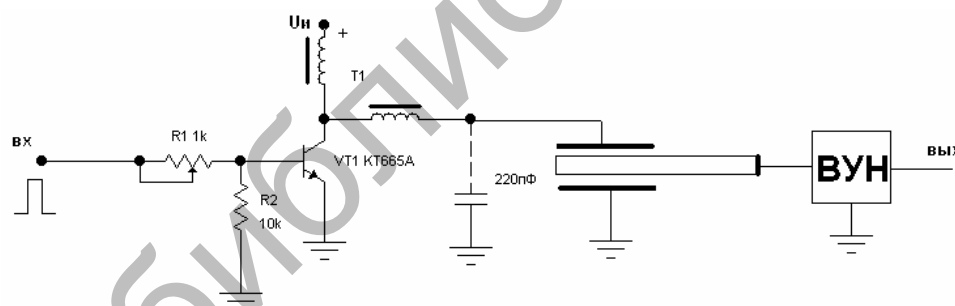
Рис. 1. Функциональная схема ИВЭП

При включении питания микроконтроллер запускает генератор с начальным значением частоты накачки ТПЭ. Через определенные интервалы времени аналого-цифровой преобразователь подключается к цепи источника питания и цепи обратной связи ТПЭ и значение сигнала поступает на вход микроконтроллера. На основании результатов двух следующих друг за другом измерений сигнала обратной связи вычисляется так называемый сигнал ошибки, по знаку и абсолютному

значению которого микроконтроллер корректирует значение рабочей частоты генератора в соответствии с АЧХ ТПЭ и напряжением источника питания схемы. После корректировки частоты проводятся еще два измерения сигнала обратной связи для определения правильности направления изменения частоты. При обнаружении ошибки происходит возврат к установленной до этого частоте и производится еще одна корректировка, но с другим знаком.

Период между измерениями напряжения обратной связи, начальная рабочая частота и шаг изменения частоты накачки зависят от типа применяемого ТПЭ (его АЧХ, добротности), определяются экспериментально и задаются при программировании. В зависимости от требуемого коэффициента стабилизации выходного напряжения и добротности ТПЭ выбирается разрядность АЦП и тактовая частота контроллера. Следует отметить, что минимальное напряжение питания современных микроконтроллеров составляет 2 В, а максимальная тактовая частота – 150 МГц, причем с увеличением тактовой частоты возрастает потребляемый ток, что необходимо учитывать при проектировании высоковольтного преобразователя.

В совокупности с ТПЭ обычно применяются оконечные каскады с индуктивной нагрузкой (трансформаторные и автотрансформаторные) одноктактные и двухтактные.



Р и с . 2. Одноктактный каскад на биполярном транзисторе

Одноктактные каскады на биполярных и МОП-транзисторах имеют свои особенности применения. До недавнего времени одноктактные каскады на биполярных транзисторах (рис. 2) использовались при напряжении питания менее 4-х вольт. При этом в качестве магнитопровода сердечника выбирался молибденовый пермаллой. Кольцевые сердечники из Мо-пермаллоя, имеющие узкую петлю гистерезиса при однополярном перемагничивании, в совокупности с ТПЭ поперечно-продольного типа имеют меньшие потери, чем ферритовые, особенно при работе преобразователя в режимах, близких к холостому ходу, когда входное сопротивление ТПЭ

невелико. Использование ТПЭ с модифицирующими добавками позволяет несколько сдвинуть максимум КПД к режиму холостого хода. Для оконечных каскадов на МОП-транзисторах потери при малых напряжениях питания были несколько больше, что объясняется нелинейностью крутизны на начальном участке стоко-затворной характеристики транзистора. Поэтому их использовали при напряжениях питания более 4 В. Однако появление транзисторов с нормируемым сопротивлением канала (от 8 мОм) при напряжении на затворе 2,5 В (например фирмы International Rectifier) открывает возможность построения схем на их основе с номинальным питанием 3,6 В, то есть от одного элемента литий-полимер. В сочетании с микросхемой драйвера нижнего ключа того же производителя динамические потери усилителя мощности минимизируются, хотя несколько возрастают габариты изделия.

Наилучшие энергетические параметры получаются при использовании двухтактного выходного каскада с трансформаторным включением ТПЭ, причем сам ТПЭ должен быть двухслойным с заземленным центральным электродом секции возбуждения (рис. 3). При таком построении схемы реализуется максимальное выходное напряжение ТПЭ при большом коэффициенте трансформации и достаточно высоком КПД. Кроме того, стабилизируется фазо-частотная характеристика ТПЭ при изменении сопротивления нагрузки, резком переходе в режим короткого замыкания (пробой в нагрузке) и других нестандартных ситуациях, что облегчает работу генератора в режиме синхронизации.

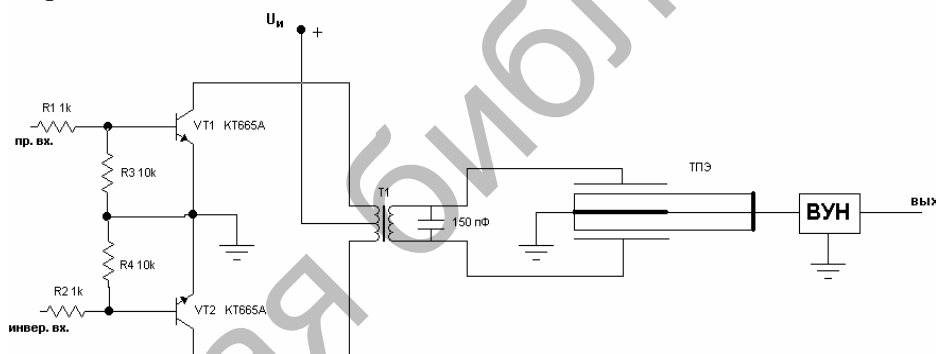


Рис. 3. Двухтактный каскад при работе с двухслойным ТПЭ.

В результате проведенных работ было отмечено, что при напряжениях питания до 3 В и необходимым выходным напряжением более 10 кВ целесообразно применение двухступенчатого принципа преобразования напряжения. Это позволяет использовать оконечный каскад с ТПЭ в оптимальном режиме, тем самым повышая общий КПД

преобразователя. Применение микроконтроллера существенно снижает массо-габаритные показатели, увеличивает надежность и упрощает настройку схемы. Использование ТПЭ с модифицирующими добавками смещает максимум КПД в область меньших токов нагрузки и более высокого коэффициента трансформации (рис. 4).

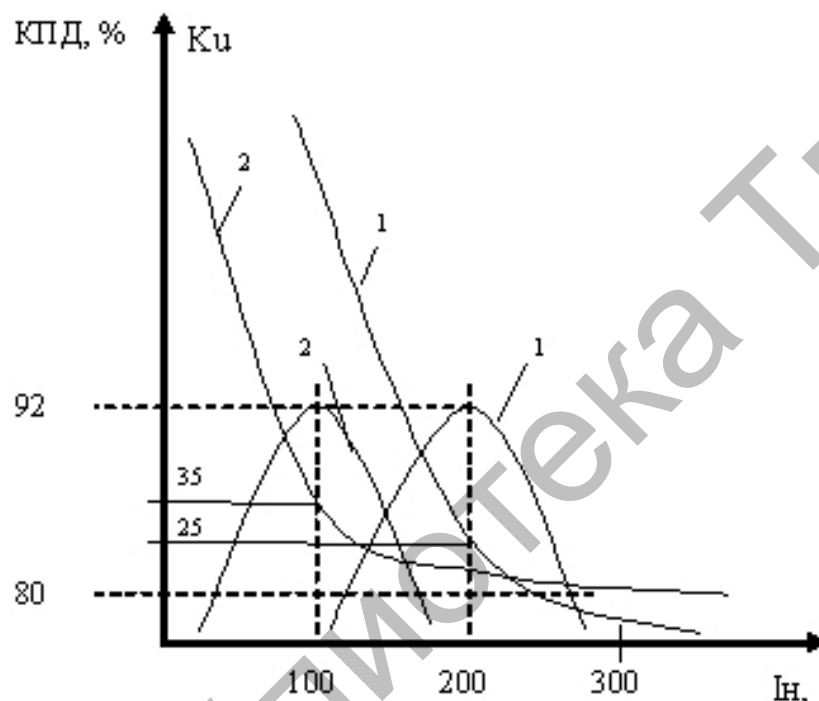


Рис. 4. График  $K_u$  и КПД для 2-й моды продольных колебаний ТПЭ поперечно-продольного типа, системы ЦТС: 1 – без модифицирующих добавок, 2 – с модифицирующими добавками.

#### Список литературы

1. Ivensky G., Zafrany I., Ben-Yaakov S. Generic operational characteristics of piezoelectric transformers // IEEE Trans. Power Electronics. 2002. V. 17. P. 1049-1057.
2. Flynn A. M., Sanders S. R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers // IEEE Trans. Power Electronics. 2002. V. 17. P. 8-14.