

УДК 621.314:621.382

Ю.Э. Паэранд, канд. техн. наук, Д.А. Кривошей

Вторичные источники питания с пьезоэлектрическими трансформаторами

Статья посвящена вопросу построения вторичных источников питания на основе пьезоэлектрических трансформаторов. Приведены технические решения с частотным и амплитудным способами регулирования, выполнен анализ их структуры. Предложена обобщенная модель вторичного источника питания с пьезоэлектрическим трансформатором. Выполнен анализ его работы по результатам моделирования. Даны рекомендации относительно оптимальной формы входного возбуждающего сигнала для источника питания.

The article is devoted to a problem of constructing of secondary power supplies on the basis of piezoelectric transformers. Technical decisions with frequency and peak ways of regulation are resulted and the analysis of its structure is made. The generalized model of the secondary power supply with the piezoelectric transformer is proposed. The analysis of its operation by results of modelling is made. Recommendations concerning the optimum form of an entrance exciting signal for the power supply are given.

Ключевые слова: *вторичный источник питания, пьезоэлектрический трансформатор, частота резонанса, скважность импульса, коэффициент заполнения, инвертор, выпрямитель, фильтр, нагрузка, коэффициент передачи, меандр.*

Введение

Исследованию пьезоэлектрических трансформаторов (ПТ) как приборов функциональной электроники посвящен ряд работ. Однако материала по данной тематике в открытых изданиях представлено мало. Особенно следует констатировать факт, что в Украине соответствующее научное направление почти не развито. Более того, практически не ведется исследований по данной тематике, отечественные публикации отсутствуют.

Учитывая современные требования к проектированию электронных устройств и систем, нацеленные на повышение их эффективности, оптимизацию их массогабаритных параметров, принимая во внимание актуальность энергосберегающих технологий, построение вторичных

источников питания (ВИП) на основе ПТ, являющихся априори эффективными преобразовательными приборами, представляет собой актуальную научную проблему.

На сегодняшний день устройства преобразования электроэнергии в основном представлены импульсными преобразователями на основе привычных электромагнитных трансформаторов. Однако встречаются немногочисленные зарубежные публикации, посвященные вопросам построения преобразовательных устройств на базе ПТ [1–6].

Основываясь на предыдущих исследованиях авторов [7], следует констатировать факт, что построение ВИП на основе ПТ является очень актуальной научной и технической задачей.

Результатом разработки ВИП с ПТ может быть его внедрение как современного питающего устройства в разные электронные устройства и системы, используемые в различных отраслях экономики.

Целью работы является анализ технических возможностей построения ВИП на основе ПТ.

1. Принципы построения вторичных источников питания с пьезоэлектрическими трансформаторами

На данный момент практически любое электронное устройство содержит в себе ВИП, который подключается к одному из первичных источников, например посредством электросети.

Устройства вторичного электропитания предназначены для формирования необходимых для работы электронных элементов напряжений и токов с заданными параметрами. Они могут быть выполнены в виде отдельных блоков или входить в состав различных функциональных электронных узлов. Их основной задачей является преобразование энергии первичного источника в энергию, обеспечивающую нормальное функционирование электронного устройства в целом.

Ранее авторами проводились исследования [7], направленные на изучение особенностей работы и характеристик ПТ с целью их использования в устройствах питания электронных схем.

Учитывая характеристики и особенности работы ПТ, опубликованные в [7], очевидно, что ВИП на их основе будут работать в импульсном

режиме. Таким образом, предлагается две схемы ВИП: на основе частотного и амплитудного регулирования.

На рис. 1 представлена схема ВИП с использованием частотного регулирования (или изменения скважности импульсов). Эта схема представляет собой ВИП, содержащий нерегулируемый сетевой выпрямитель (НСВ) и конвертор выпрямленного напряжения сети. Конвертор состоит из регулируемого инвертора (РИ), работающего на повышенной частоте, соответствующей частоте резонанса ПТ, трансформаторного выпрямительного узла (ТВУ), выполненного на основе ПТ, и высокочастотного фильтра (ВФ). Для стабилизации выходного напряжения используется схема управления (СУ).

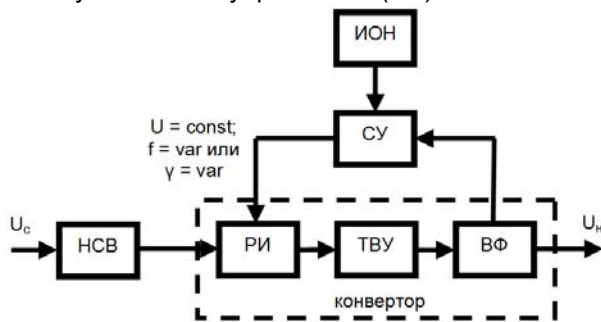


Рис. 1. Структурная схема ВИП на основе ПТ с регулируемым инвертором

В схеме управления сравниваются выходное напряжение U_n ВИП и напряжение опорного источника ИОН. Разность этих напряжений (сигнал ошибки) используется для регулировки частоты РИ ($f = \text{var}$) или скважности импульсов при их неизменной частоте ($\gamma = \text{var}$).

На рис. 2 приведена схема, построенная по принципу амплитудного регулирования. Данная схема представляет собой ВИП с регулируемым сетевым выпрямителем (РСВ) и нерегулируемым инвертором (НИ). Остальные узлы в этой схеме имеют то же назначение (и те же обозначения), что и на рис. 1.

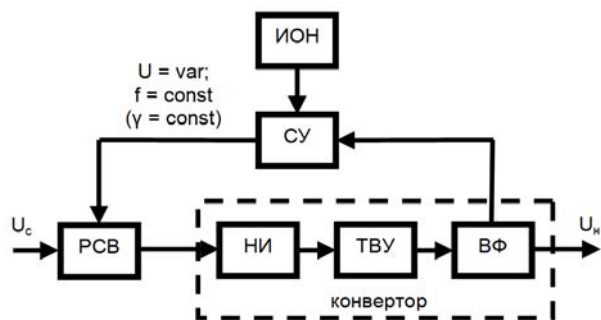


Рис. 2. Структурная схема ВИП на основе ПТ с регулируемым сетевым выпрямителем

Отличительной особенностью этой структурной схемы является использование нерегулируемого инвертора. Стабилизация выходного

напряжения в этой схеме может быть обеспечена за счет регулирования напряжения на входе конвертора с помощью РСВ, который возможно выполнять на тиристорах с фазовым регулированием.

2. Обобщенная модель вторичного источника питания с пьезоэлектрическим трансформатором

С целью комплексного изучения особенностей построения ВИП на основе ПТ для начала предложена методика моделирования его работы посредством обобщенной модели, построенной с помощью САПР OrCAD версии 9.2.

В качестве исходной структуры модели предложена структурная схема ВИП на основе ПТ, которая представлена на рис. 3. Описание и обоснование этой схемы приводится в [7].

Основываясь на предыдущих исследованиях [7] и убедившись в адекватности модели ПТ [7], была разработана обобщенная модель ВИП на основе ПТ, представленная на рис. 4.

Данная модель представляет собой комплексную взаимосвязь нескольких функциональных блоков (рис. 5).

Первый функциональный блок представлен генератором, или источником возбуждающих импульсов, формирующих необходимый входной сигнал для ПТ. В данном случае (рис. 4) блок выполнен на базе источника прямоугольных импульсов V_{in} , амплитуда, частота и скважность которых задаются параметрами, находящимися внизу под условным графическим обозначением элемента. Кроме того, в блок введены дополнительные сопротивления, имитирующие внутреннее сопротивление генератора.

Данный блок в задачах моделирования соответствует входной цепи ВИП и полностью заменяет ее. Модель представлена в виде входного выпрямителя, транзисторов, формирующих сигнал, близкий к меандру, а также системы управления, отвечающей за переключение транзисторов в необходимые моменты времени (рис. 6).

Вторым функциональным блоком в модели, представленной на рис. 4, является полная модель ПТ. Данный блок является основным. Принципы построения этого блока основаны на предыдущих исследованиях авторов, методика построения модели приведена в предыдущей работе [7].

В модели, приведенной на рис. 4, второй блок заменяет пьезотрансформатор ТП-Р1 381002 для второй моды колебаний.

Третий функциональный блок – это выпрямитель, выполненный на элементах D_1 и D_2 , представляющих собой идеальные диоды.

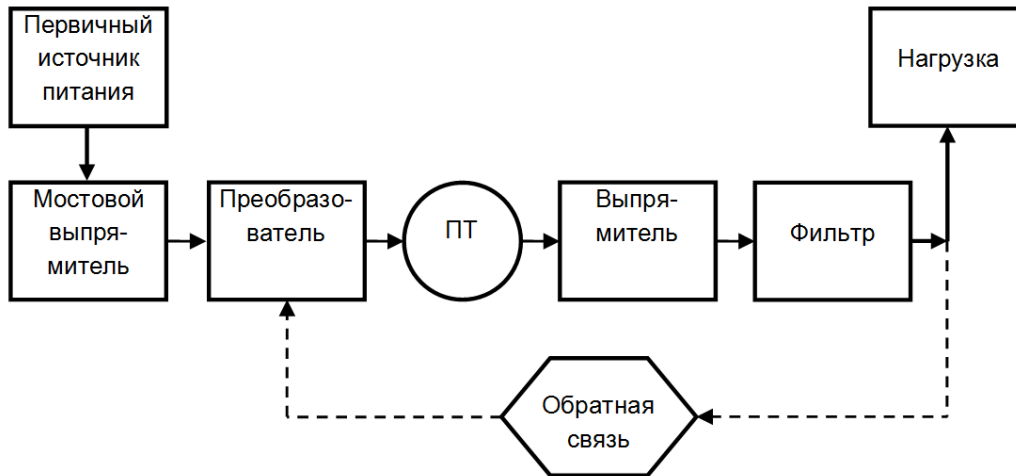


Рис. 3. Общая структурная схема ВИП с ПТ

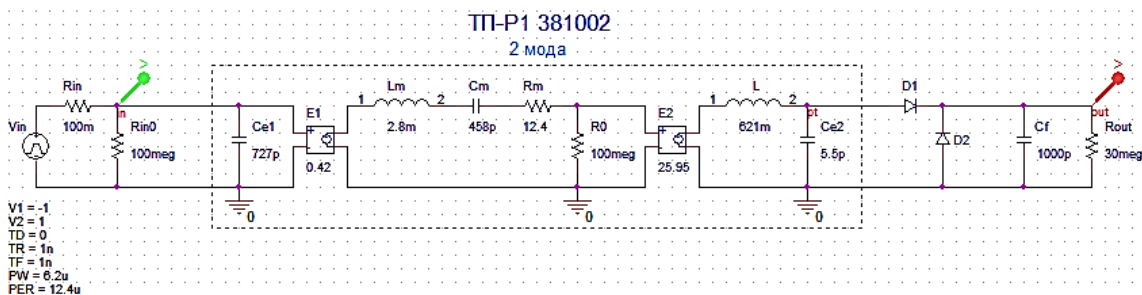


Рис. 4. Модель ВИП с ПТ, построенная средствами пакета OrCAD

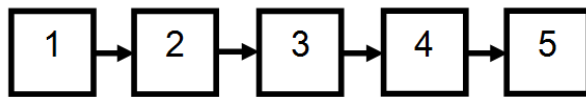


Рис. 5. Функциональное деление модели ВИП с ПТ на блоки: 1 – генератор возбуждающих импульсов; 2 – пьезоэлектрический трансформатор; 3 – выпрямитель; 4 – высокочастотный фильтр; 5 – нагрузка

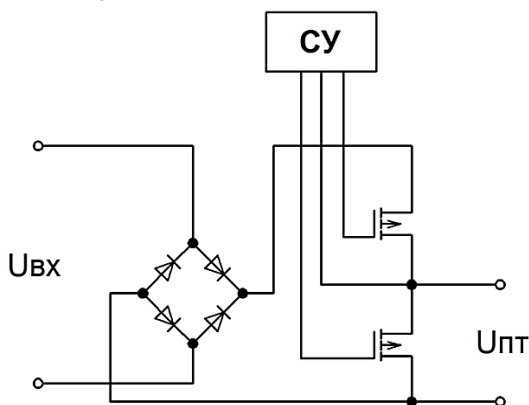


Рис. 6. Принципиальная схема первого функционального блока модели ВИП

Четвертый блок выполняет функцию высокочастотного фильтра, выполненного на конденсаторе C_f .

Последний, пятый блок, представляет собой нагрузку ВИП, в качестве которой служит высокоомный резистор.

3. Исследование функционирования вторичного источника питания с пьезотрансформатором посредством моделирования

С помощью разработанной модели ВИП с ПТ было проведено исследование его работы. При этом анализировалось функционирование устройства с различными параметрами первого функционального блока модели. Проведен анализ работы ВИП для различных форм возбуждающего входного сигнала, а именно: синусоида, нарастающий и спадающий пилообразные сигналы, треугольные импульсы, однополярные и двуполярные прямоугольные импульсы.

Параметры ВИП для различных форм возбуждающего входного сигнала представлены в табл. 1.

Следует отметить, что частота возбуждающего сигнала должна быть настроена с достаточно высокой точностью на резонансную частоту ПТ, которая равна 80,6 кГц. Иначе коэффициент передачи ВИП резко падает, что обусловлено высокой добротностью ПТ, при этом неэффективно используется энергия в данном устройстве.

Графики зависимостей коэффициента передачи ВИП по напряжению от скважности входных прямоугольных импульсов представлены на рис. 7.

Таблица 1. Параметры ВИП с ПТ по результатам моделирования

Форма сигнала	Период, мкс	Длит. имп., мкс	Сквжность	К-т заполнения, %	Частота, кГц	Амплитуда вх. напряж., В	Амплитуда вых. напряж., В	K_u
Синусоида					80,6	1	310	310
Нарастающая пила	12,4				80,6	1	86	86
Спадающая пила	12,4				80,6	1	82	82
Треугольник	12,4				80,6	1	91	91
Прямоугольные однополярные импульсы	12,4	0,01	1240	0,1	80,6	1	0,4	0,4
		1	12,4	8,1			39	39
		2,5	5	20,2			92	92
		4	3,1	32,3			120	120
		5	2,5	40,3			125	125
		6,2	2	50			122	122
		7,5	1,7	60,5			108	108
		9	1,4	72,6			75	75
		10	1,2	80,6			60	60
		11,5	1,1	92,7			32	32
		12,4	1	100			0,1	0,1
Прямоугольные двуполярные импульсы	12,4	0,01	1240	0,1	80,6	1	8,5	8,5
		1	12,4	8,1			84	84
		2,5	5	20,2			200	200
		4	3,1	32,3			240	240
		5	2,5	40,3			250	250
		6,2	2	50			250	250
		7,5	1,7	60,5			210	210
		9	1,4	72,6			155	155
		10	1,2	80,6			120	120
		11,5	1,1	92,7			55	55
		12,4	1	100			0,1	0,1

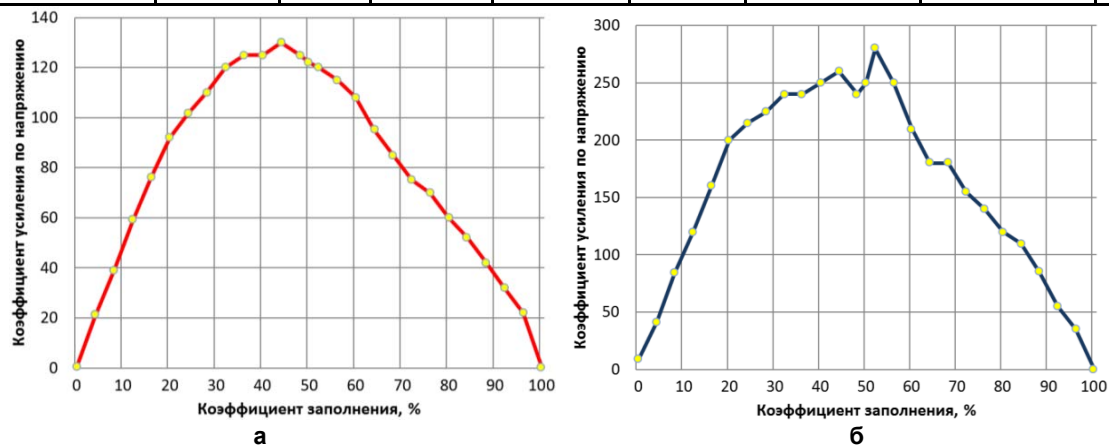


Рис. 7. Зависимости коэффициента усиления по напряжению от сквжности входных импульсов при их различной конфигурации (а - прямоугольные однополярные импульсы, б - прямоугольные двуполярные импульсы)

Временные диаграммы входного и выходного напряжений ВИП с ПТ при задающем сигнале в виде меандра приведены на рис. 8.

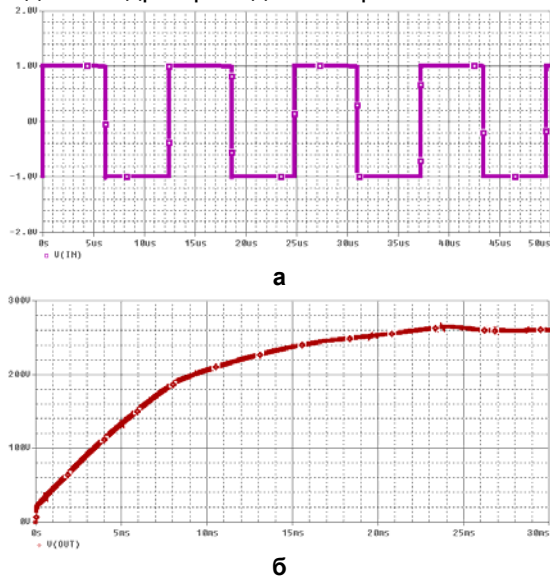


Рис. 8. Временные диаграммы входного и выходного напряжений ВИП с ПТ (а – входное напряжение, б – выходное напряжение)

В ходе анализа полученных данных установлено, что наибольший коэффициент передачи по напряжению достигается, когда во входной секции ВИП формируется синусоидальное напряжение с частотой, соответствующей частоте резонанса ПТ, а также когда в качестве возбуждающего сигнала выступают двуполярные прямоугольные импульсы с частотой, равной частоте резонанса ПТ, и коэффициентом заполнения, равным 50 % (т.е. импульсы в форме меандра).

Отклонение частоты возбуждающего сигнала от резонансной приводит к значительному снижению коэффициента передачи.

Исследования также показали, что другие формы возбуждающего сигнала, даже при условии соблюдения частоты резонанса, не позволяют достичь коэффициентов передачи, сравнимых со значениями, полученными для синусоиды и меандра.

Выводы

Рассмотрены структурные схемы ВИП на основе ПТ, а также принципы их функционирования. Предложено два варианта схемотехни-

ческой реализации ВИП на основе ПТ: с регулируемым инвертором и сетевым выпрямителем. Разработана обобщенная модель ВИП с ПТ, состоящая из пяти функциональных блоков. По результатам моделирования проведено исследование принципов функционирования ВИП с ПТ при различных формах возбуждающего сигнала: синусоида, нарастающий и спадающий пилообразные сигналы, треугольные импульсы, однополярные и двуполярные прямоугольные импульсы. Установлено, что наиболее оптимальной формой возбуждающего сигнала является меандр и синусоида.

Литература

1. Пат. 5969954 США, МПК6 H02M3/335. AC/DC Converter with a Piezoelectric Transformer / Toshiyuki Zaitzu (Япония). – № 09/007571; заявл. 15.01.1998; опубл. 19.10.1999. – 7 с., ил.
2. Vasic D., Costa F., Sarraute E. A new method to design piezoelectric transformer used in MOSFET and IGBT gate drive circuits, PESC '03, June 2003, pp. 307–312.
3. Zaitzu T., Shigehisa T., Inoue T., Shoyama M., Ninomiya T. Piezoelectric transformer converter with frequency control, INTELEC '95, Oct. 1995, pp. 175–180.
4. Imori M., Taniguchi T., Matsumoto H., Sakai T. A photomultiplier high voltage power supply incorporating a piezoelectric ceramic transformer, IEEE Trans. Nucl. Sci., pt. 2, vol. 43, pp. 1427–1431, June 1996.
5. Navas J., Bove T., Cobos J., Nuno F., Brebol K. Miniaturised battery charger using piezoelectric transformers, IEEE APEC '01 Rec., 2001, pp. 492–496.
6. Zaitzu T., Fuda Y., Okabe Y., Ninomiya T., Hamamura S., Katsuno M. New piezoelectric transformer converter for AC adapter, IEEE APEC '97 Rec., 1997, pp. 568–572.
7. Паеранд Ю.Е., Кривошей Д.А. Дослідження характеристик п'єзоелектричних трансформаторів // Науково-технічний збірник «Електроніка та зв'язок». Тематичний випуск «Електроніка і нанотехнології». – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – № 5. – С. 28–34.