

УДК 537.226.4

## **АМПЛИТУДНЫЙ И ЧАСТОТНЫЙ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРОВ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ**

**С.Г. Бочкарев, Б.Б. Педько, В.П. Каменцев**  
Лаборатория наукоемких технологий и приборов

Рассматриваются особенности амплитудного и частотного способов управления пьезоэлектрическими трансформаторами для устройств радиоэлектроники.

В настоящее время все более широкое применение в радиоэлектронике находят пьезоэлектрические трансформаторы (ПТ). Отсутствие у ПТ обмоток и магнитной системы, возможность применения планарной конструкции, высокая экономичность и надежность существенно улучшают массогабаритные показатели радиоэлектронных узлов [1; 2]. Наибольшее применение ПТ находят в высоковольтных источниках вторичного электропитания (ИВЭП) и в устройствах, где требуется большой коэффициент преобразования напряжения, в частности, в медицинской технике.

Среди основных сдерживающих факторов применения ПТ можно отметить отсутствие отечественной высококачественной пьезокерамики с необходимыми электрофизическими свойствами и отсутствие специализированных микросхем с большой степенью интеграции. Тем не менее использование ПТ в ИВЭП малой и средней мощности (до 20 Вт) позволяет улучшить массогабаритные показатели в 4 - 6 раз по сравнению с аналогичными ИВЭП на основе электромагнитных трансформаторов [3]. При необходимости создания электронных узлов плоской конструкции ПТ становятся просто незаменимыми [4].

Основная сложность применения ПТ заключается в том, что схемотехнические принципы построения ИВЭП на базе ПТ существенно отличаются от принципов построения ИВЭП на основе электромагнитного трансформатора. Так как ПТ является функциональным резонансным элементом, необходимо учитывать его специфические особенности: узость резонансных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) (добротность некоторых типов ПТ может достигать 1000); смещение АЧХ по амплитуде и частоте при воздействии температуры, изменении характера и величины нагрузки; высокая крутизна фазочастотных характеристик (ФЧХ) на частоте резонанса; сильное изменение полных входных и выходных сопротивлений при действии возмущающих факторов (сопротивления могут иметь емкостной, индуктивный, активный и комбинированный характер). Кроме того, можно отметить сильную зависимость передаточных коэффициентов и параметров передаточных функций, а также КПД ПТ от тока нагрузки. Поэтому ПТ можно охарактеризовать как объект управления с переменной структурой и переменными параметрами.

Вышеперечисленные особенности показывают, что ПТ и электромагнитные трансформаторы требуют различного системотехнического подхода к проектированию радиоэлектронных устройств на их основе.

Особенность ПТ как многомерного многосвязного объекта позволяет управлять выходным напряжением ПТ в составе ИВЭП посредством воздействия по нескольким каналам: амплитудному, частотному, фазовому, их взаимосвязи. Это дает возможность обеспечить высокие качественные показатели работы электронного устройства по быстродействию, точности стабилизации, облегчает построение систем защиты. Если в ИВЭП на базе электромагнитного трансформатора управление выходным напряжением осуществляется в основном путем «амплитудного» способа - изменением действующего (среднего) значения выходного напряжения посредством амплитудной или широтно-импульсной модуляции, то способы управления выходным напряжением ПТ можно разделить на три основные группы по количеству взаимосвязанных управляющих воздействий. Одномерные - амплитудный, частотный, фазовый, двумерные или дуальные - амплитудно-частотный, амплитудно-фазовый, фазо-частотный; многомерные - амплитудно-фазо-частотные и др. Наиболее часто в настоящее время используются одномерные и двумерные способы управления.

Амплитудный способ управления базируется на изменении «амплитуды» напряжения возбуждения ПТ при его работе на резонансной частоте. Стабилизация выходного напряжения и компенсация возмущающих воздействий осуществляется путем амплитудно-импульсной или частотно-импульсной модуляции напряжения возбуждения. На основе проведенного анализа мы можем утверждать, что наиболее просто этот способ реализуется в автогенераторном преобразователе напряжения. Работа ПТ на частоте резонанса обеспечивается действием автогенераторной схемы с ПТ в качестве частотозадающего элемента. При выполнении требуемых условий баланса фаз и баланса амплитуд самовозбуждение автогенератора происходит на резонансной частоте ПТ и влияние дрейфа АЧХ и ФЧХ ПТ вдоль частотной оси автоматически компенсируется действием автогенераторного преобразователя напряжения. Стабилизация выходного напряжения обычно осуществляется путем изменения напряжения питания автогенератора. Однако при сильном изменении напряжения питания автогенератора возможен срыв автоколебаний или их уход от значения резонансной частоты ПТ из-за уменьшения напряжения положительной обратной связи или изменения фазовых соотношений. Также при запуске автогенератора в режимах, близких к режиму холостого хода, он склонен возбуждаться на паразитных гармониках ПТ. Если же ограничивать по амплитуде сигнал обратной связи, то затрудняется запуск схемы в режимах, близких к режиму максимальной нагрузки (короткому замыканию), например, при заряде конденсатора фильтра.

Расширение динамического диапазона обработки внешних воздействий может быть достигнуто различными способами, но все они приводят к существенному усложнению схемы. Введение активных цепей формирования

сигнала обратной связи, синхронизируемого на частоте резонанса ПТ, вносит фазовые искажения. А введение активных регулируемых цепей фазовой задержки, которые обеспечивают точную настройку автогенератора на резонансную частоту ПТ, не позволяют работать в диапазоне нагрузок от режима холостого хода до режима максимальной мощности. В отличие от результатов [1; 2], мы установили, что изменение напряжения питания автогенератора (или его усилителя мощности) лучше всего осуществлять посредством импульсного стабилизатора напряжения с широтно-импульсной модуляцией, так как, несмотря на некоторое усложнение сглаживающего фильтра, он совмещает в себе функции преобразователя напряжения, стабилизатора и регулятора. Некоторые трудности может вызвать только подбор рабочей частоты стабилизатора и топология печатной платы

Таким образом, в состав ИВЭП на ПТ с реализацией амплитудного способа управления входят условно две части - одна обеспечивает работу ПТ на резонансной частоте, другая - стабилизацию выходного напряжения. При повышенных требованиях к точности поддержания выходного напряжения они становятся относительно сложными (особенно в настройке), содержат большое количество элементов, пониженный КПД из-за двойного преобразования мощности (на входе и в ПТ). Эти недостатки можно частично устранить, если вместо автогенератора применить двухтактный синхронизируемый генератор с возможностью регулировки скважности выходных импульсов. В такой схеме будет реализован амплитудный способ с широтно-импульсной модуляцией.

Амплитуда основной гармоники возбуждения ПТ зависит от длительности квазипрямоугольных двухполярных импульсов с «паузой на нуле», поступающих с задающего генератора на усилитель мощности (обычно двухтактный). Собственная частота задающего синхронизируемого генератора выбирается несколько ниже резонансной частоты ПТ для улучшения синхронизации. Основная трудность - обеспечить надежный «захват» частоты основной гармоники резонанса ПТ и избежать возбуждения на побочной частоте. Схемы активной фазовой задержки могут успешно применяться для решения этой задачи. Предпочтительно применение широтно-импульсной модуляции в сетевых вариантах ИВЭП (с питанием 220 В, 50 Гц), где использование современных транзисторов с малым временем переключения позволяет значительно повысить КПД схемы, а вместе с ним и массогабаритные показатели.

Частотный способ управления основан на использовании резонансного характера АЧХ ПТ. Рабочая точка выбирается вблизи резонансной частоты ПТ на квазилинейном участке. Стабилизация выходного напряжения осуществляется путем смещения рабочей точки ПТ вдоль частотной оси АЧХ. Работа на правом склоне АЧХ в большинстве случаев предпочтительнее, так как там расположена область максимальных значений КПД ПТ. Основным элементом частотно-управляемой схемы является релаксационный генератор, частота колебаний которого изменяется в зависимости от уровня напряжения, подаваемого на его управляющий вход. Управляющее напряжение

вырабатывается регулятором с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом управления. Он содержит входную схему сравнения, на которую поступают сигнал обратной связи (пропорциональный выходному напряжению) и высокостабильное опорное напряжение. Такой регулятор несложно реализовать на двух операционных усилителях. В качестве задающего генератора можно использовать микросхему TL 494 (российский аналог КР1114ЕУ4) или аналогичные, предназначенные для управления импульсными источниками питания и имеющие в своем составе встроенный стабилизатор напряжения (от которого можно также питать регулятор), задающий генератор, фазорасщепитель, две схемы сравнения, широтно-импульсный модулятор со схемой задания паузы и парафазный выходной каскад для управления мощными транзисторами. При этом схема получается компактной и легко настраивается на разные типы ПТ и различные выходные напряжения.

Следует отметить, что частотно-управляемые ИВЭП следует использовать в случаях более узких диапазонов возмущающих воздействий, нежели с управлением по амплитуде. Но для серийного производства они более приемлемы по простоте настройки и возможности использования недорогих специализированных микросхем, хотя и в нестандартном включении. Наличие в них широтно-импульсного модулятора и двух схем сравнения позволяет реализовать защиту источника от перенапряжения и токовую защиту либо ввести еще один канал регулирования по скважности, перейдя, таким образом, к частотно-амплитудному (двумерному) регулированию.

Введение второго канала регулирования позволяет осуществить работу ПТ вблизи резонансной частоты в большом диапазоне возмущающих воздействий и тем самым повысить КПД в целом. При этом во избежание сильных колебаний выходного напряжения во время переходных процессов воздействие на частоту должно опережать воздействие на напряжение. Для этого сигнал обратной связи, поступающий в канал управления по частоте и в канал управления по амплитуде, корректируют для каждого типа ПТ и заданных выходных параметров устройства. Но при сильных возмущениях стабилизацию выходного напряжения обеспечить не удастся из-за срыва в результате инверсии управления. Ввиду значительного усложнения в настройке и регулировке этот способ управления применяется значительно реже, чем частотный, особенно в устройствах малой мощности.

Наличие специфических, по сравнению с электромагнитными трансформаторами, свойств позволяет использовать ПТ в областях техники и медицины, где применение других аналогичных радиоэлементов либо затруднено, либо невозможно. Способность работать в режимах, близких и даже равных режиму короткого замыкания, позволяет использовать ПТ в устройствах для заряда емкостных накопителей. Время заряда можно уменьшить по сравнению с аналогичным по мощности устройством на электромагнитном трансформаторе в 2 - 5 раз. Наличие гальванической

развязки у ПТ с высоким напряжением пробоя, компактность и экономичность схем включения дает преимущество его использования в коагуляторах для косметологии и стоматологии мощностью до 100 Вт. Такую мощность можно получить, используя ПТ цилиндрической формы.

Разнообразие типов электронных устройств на основе ПТ делает необходимым использование широкого спектра пьезокерамических материалов с заданными свойствами. Поиск таких пьезокерамических материалов является самостоятельной задачей и, как правило, реализуется на составах, относящихся к ряду сегнетоэлектрических твердых растворов (СТР) семейства цирконат-титаната свинца (ЦТС). Известно, что СТР этой системы, близкие к титанату свинца, имеют тетрагональное искажение элементарной ячейки (сегнетоэлектрическая Т-фаза СТР), а близкие к цирконату свинца - ромбоэдрическое искажение (Р-фаза). В области морфотропной фазовой границы (область перехода из фазы Т в фазу Р при изменении фазового состава) и при применении модифицирующих добавок возможно получение материалов с необходимыми для создания ПТ свойствами.

#### **Литература**

1. Ерофеев А.А., Данов Г.А., Фролов В.Н. Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике. М.: Радио и связь, 1988. С. 128.
2. Ладик А.И., Сташкевич А.И. Изделия электронной техники. Пьезоэлектрические и электромеханические приборы. М.: Радио и связь, 1993. С. 104.
3. Бочкарев С.Г., Воронин Д.Г., Данов Г.А., Дрожжев В.В. Фролов В.Н. //Приборы и техника эксперимента. 1990. № 4. С. 140-142.
4. Белов Н.В., Каменцев В.П., Бочкарев С.Г., Педько Б.Б., Рудяк В.М. Ионатор воздуха с автономным питанием /Фундаментальные проблемы пьезоэлектроники. Ростов-н/Д.: РГУ. 1995. Т. 3. С. 119-120.