

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОЩНЫХ БУФЕРНЫХ КАСКАДОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ПРИВОДАМИ СИСТЕМ МЕХАТРОНИКИ

The questions related to the features of buffer circuit cascade of control systems of ultrasonic actuators, are considered. Advice on choosing the key types of powerful electronic devices, are given. Basic tools and techniques of control by powerful key transistors, are shown. General advice on choosing a buffer stage, depending on the characteristics of actuator, are provided. Typical schemes of coordination at the buffer stage, are analyzed.

Розглянуто питання, що пов'язані з особливостями схемотехнічної реалізації буферних каскадів систем керування ультразвуковими приводами. Приведено рекомендації з вибору типів потужних ключових електронних приладів. Показано основні засоби та методи керування потужними ключовими транзисторами. Надано загальні рекомендації щодо вибору буферного каскаду в залежності від характеристик приводу. Проаналізовано типові схеми узгодження приводу та буферного каскаду.

Введение

Ультразвуковые приводы находят все большее применение в различных устройствах мехатроники в качестве исполнительных механизмов. К ним можно отнести системы позиционирования, ультразвуковые двигатели вращательного и линейного движения, системы с управляемым уровнем кавитации, распыления жидкостей и т.д.[1-3] Перед разработчиками подобных систем зачастую стоит задача не только проектирования собственно ультразвукового привода, но и системы управления. И если вопросы проектирования ультразвуковых приводов достаточно хорошо освещены в литературе, то вопросам проектирования схем управления на сегодняшний день не уделяется достаточного внимания. Сложности в проектировании систем управления возникают уже на первом этапе при выборе необходимой элементной базы.

Современная электронная промышленность может предложить разработчикам широкий ассортимент компонентов для построения систем управления ультразвуковыми приводами. Наиболее критичными с точки зрения выбора элементной базы являются выходные каскады. С целью повышения к.п.д., выходные каскады работают в ключевом режиме. Собственно ключевой каскад и его схема управления могут быть названы «буферным каскадом», так как они сопрягают ультразвуковой привод и электронную систему управления, например микропроцессорную.

Выходной каскад может быть выполнен на электровакуумных или твердотельных приборах. В связи с тем, что электровакуумные лампы имеют низкий к.п.д., они практически не используются в системах мехатроники. Исключение составляют системы с использованием ультразвуковых приводов на основе магнитострикционных преобразователей с мощностями в несколько десятков киловатт.

В качестве твердотельных приборов могут быть использованы тиристоры (управляемые вентили), биполярные транзисторы, полевые транзисторы и новый класс приборов – IGBT транзисторы. Тиристорные схемы обладают существенным недостатком – ограниченным диапазоном рабочих частот, а также достаточно сложными схемами управления с большим количеством моточных узлов. На сегодня разработчики стараются уйти от использования тиристоров, заменяя их более современными и быстродействующими электронными приборами – транзисторами.

По принципу управления транзисторы условно делят на биполярные и полевые. Биполярные транзисторы управляются током, а полевые транзисторы напряжением [4]. Биполярные транзисторы, работающие в ключевом режиме, требуют значительных управляющих токов, поэтому в ключевых каскадах предпочтение следует отдавать полевым транзисторам. Но при этом, потери в биполярных транзисторах линейно зависят от тока, а в полевых транзисторах пропорциональны квадрату тока. В результате на малых и средних мощностях желательно использовать полевые транзисторы, а на больших мощностях – биполярные. Появившийся новый класс приборов – IGBT транзисторы позволяют заменить собой биполярные транзисторы. Они представляют собой сложную полупроводниковую структуру, состоящую из нескольких транзисторов, которая может быть сведена к биполярному транзистору, управляемому электрическим полем.

Целью статьи является рассмотрение особенностей построения схем управления ультразвуковыми приводами с выходными каскадами на полевых и IGBT транзисторах для мехатронных систем автоматики.

Основная часть

Рассмотрим обобщенную структурную схему мощного буферного каскада для управления пьезоэлектрическим приводом в системах мехатроники (рис.1)[5]. Питающее напряжение проходит через фильтр 1 и поступает на вход сетевого выпрямителя 2. Узлы 1 и 2 являются обязательными только в случае, если система

управления питается от сети промышленного тока. В состав выпрямителя 2 входят стабилизаторы, формирующие напряжения, необходимые для питания всех узлов системы управления приводом.

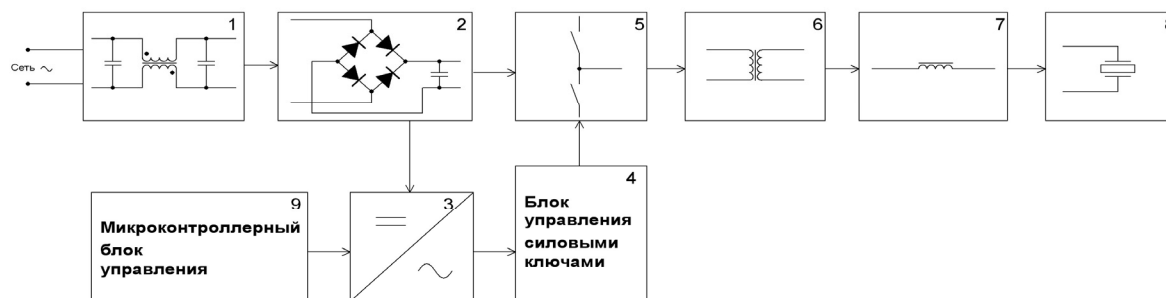


Рис. 1. Структурная схема управления ультразвуковым приводом

Блок формирования сигналов 3 формирует напряжение заданной амплитуды, формы и частоты, которое определяет тип движения ультразвукового привода (поступательное, колебательное линейное, вращательное и т.д.). Сформированный сигнал через блок управления силовыми ключами 4 поступает на вход мощного ключевого каскада 5. С выхода силовых ключей сигнал управления через трансформатор 6 и схему согласования 7 подается на ультразвуковой привод. Трансформатор 6 позволяет гальванически развязать ультразвуковой привод от питающей сети для обеспечения электробезопасности и согласовывает внутренне сопротивление ультразвукового привода с выходным сопротивлением силовых ключей. Фильтр 7 убирает высшие гармоники в управляющем напряжении для повышения общего к.п.д. системы управления. Отметим, что наличие узлов 6 и 7 не является обязательным.

Блок формирователя сигналов 3 может управляться микроконтроллерной системой 9, что значительно облегчает согласование и интегрирование ультразвуковых приводов в мехатронные системы. Прохождение сигналов обратной связи на схеме не показано.

Основные трудности при разработке новых систем мехатроники с использованием ультразвуковых приводов вызывает выбор типов каскадов силовых ключей с цепями управления, так как именно они определяют общие характеристики системы, а именно к.п.д., точность, надежность и т.д. Основное внимание будет уделено построению ключевых каскадов с трансформаторным выходом, как наиболее востребованным в системах с мощными ультразвуковыми приводами.

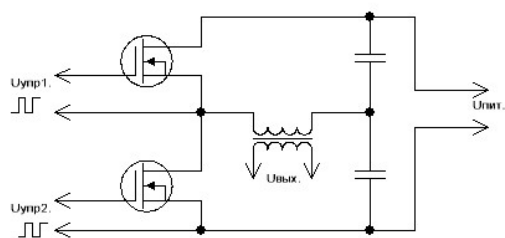


Рис. 2. Выходной каскад, выполненный по полумостовой схеме (U_{ynp1} , U_{ynp2} — сигналы управления полевыми транзисторами, полумостовой схемы, $U_{пит}$ — напряжение питания выходного каскада, $U_{вых.}$ — напряжение выходного сигнала)

Остро стоят проблемы электромагнитной совместимости, трансформатор желательно выполнить на тороидальном сердечнике. Главным условием использования такого трансформатора, является отсутствие постоянной составляющей тока через него. Данное условие могут обеспечить три основных типа схемы: полумостовая (рис. 2), мостовая (рис. 3) и двухтактная схема с нулевым отводом (Push-Pull) (рис. 4).

Схемы отличаются между собой по величине приложенного напряжения к закрытому ключу. В полумостовой схеме к ключу прикладывается половина питающего напряжения. В мостовой схеме к ключу прикладывается напряжение равное напряжению питания, а в схеме со средним нулевым отводом удвоенное напряжение питания. Что касается токов, то двухтактная схема с нулевым отводом имеет наименьшие значения тока через ключи по сравнению с остальными при той же мощности в нагрузке. В зависимости от необходимой мощности в нагрузке и техническими характеристиками транзисторов, а именно максимально допустимым напряжением, рекомендовано при мощностях до 250 Вт использовать полумостовую схему, а при более высоких использовать мостовую или схему с нулевым средним отводом.

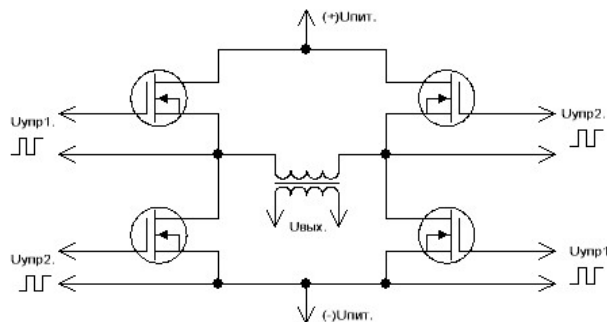


Рис. 3. Выходной каскад, выполненный по мостовой схеме (U_{ynp1} , U_{ynp2} — сигналы управления полевыми транзисторами мостовой схемы, $U_{пит}$ — напряжение питания выходного каскада, $U_{вых.}$ — напряжение выходного сигнала)

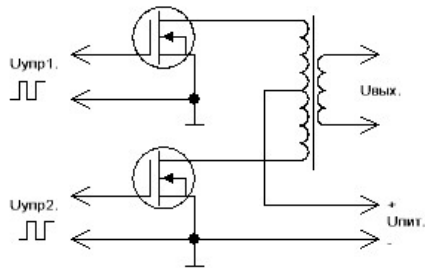


Рис. 4. Выходной каскад, выполненный по схеме со средним отводом (Push-Pull)

($U_{упр1}$, $U_{упр2}$ – сигналы управления полевыми транзисторами, $U_{пит}$ – напряжение питания выходного каскада, $U_{вых}$ – напряжение выходного сигнала)

Отметим, что схема с нулевым средним отводом имеет некоторые преимущества, связанные с тем, что управляющие напряжения привязаны к одному питающему проводу. К недостаткам схемы можно отнести наличие выбросов напряжения в моменты, когда оба ключа закрыты. В связи с тем, что промышленность выпускает ограниченную номенклатуру полевых транзисторов для работы с повышенными напряжениями сток-исток, данная схема может быть рекомендована для схем на биполярных и IGBT транзисторах. В свою очередь полумостовая и мостовая схемы могут быть рекомендованы для ключей на полевых и IGBT транзисторах.

Рассмотрим основные возможные варианты схем управления мощными ключами на полевых и IGBT транзисторах. Мощность управления полевого транзистора $P_{вх}$ определяется мощностью,

затраченной на перезаряд входной емкости $C_{вх}$, и зависит от частоты f и напряжения управления $U_{вх}$. [2]

$$P_{вх} \approx C_{вх} \cdot U_{вх}^2 \cdot f$$

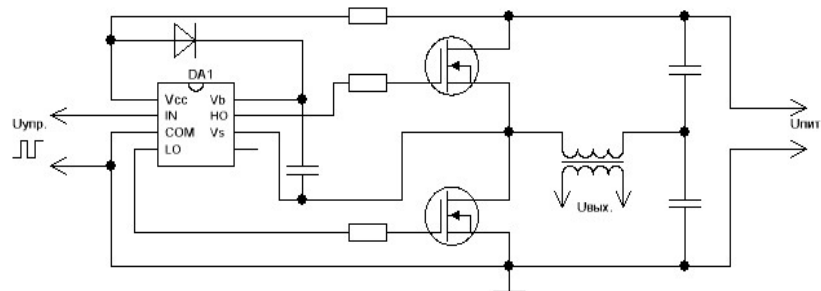


Рис. 5. Применение буферных схем для управления мощными полевыми транзисторами, на примере включенными по схеме полумост ($U_{упр}$ – сигналы управления полевыми транзисторами, $U_{пит}$ – напряжение питания, DA1 – микросхема буферного каскада)

Для обеспечения высоких скоростей переключения полевого транзистора имеется ряд схемотехнических решений. Возможно использование так называемых буферных каскадов, выполненных в виде интегральных схем (рис. 5) для согласования ключевого каскада и схемы формирования управляющих сигналов, например,

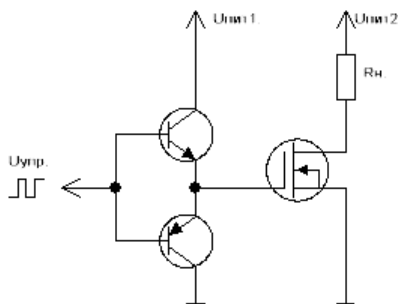


Рис. 6. Эмиттерный повторитель на комплиментарной паре ($U_{упр}$ – сигналы управления полевыми транзисторами, $U_{пит1}$, $U_{пит2}$ – напряжение питания, R_n – сопротивление нагрузки)

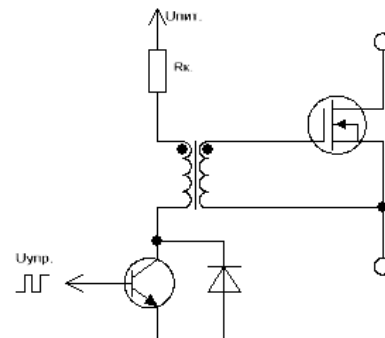


Рис. 7. Управление мощным полевым транзистором при помощи импульсного трансформатора ($U_{упр}$ – сигнал управления полевым транзистором, $U_{пит}$ – напряжение питания)

выполненной на микроконтроллере. Одним из недостатков данной схемы является ограниченное значение управляющих токов. К положительным сторонам такого технического решения можно отнести универсальность (подходит для любой топологии мощного ключевого каскада), малые габариты и невысокую стоимость. Чаще всего использование интегральных схем оправдано для мощностей, не превышающих 500Вт.

В случае управления ключом, привязанным к земляному проводу возможно применение схемы на повторителях, которые могут быть выполнены как на биполярных (Рис. 6), так и на полевых транзисторах. Этот способ управления ключами отличается простотой схемной реализации.

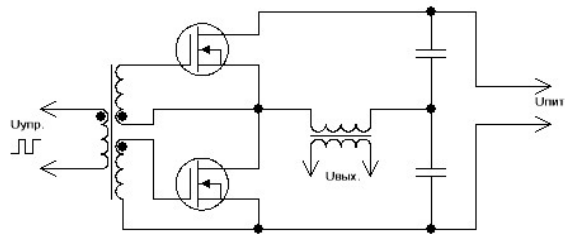


Рис. 8. Вариант управления полумостовой схемы при помощи импульсного трансформатора ($U_{упр.}$ - сигналы управления полевыми транзисторами, $U_{пит}$ - напряжение питания, $U_{вых.}$ - напряжение выходного сигнала)

При необходимости получения гальванической развязки между схемой управления и полевым транзистором, может использоваться импульсный трансформатор (Рис. 7). Такое решение применяется для управления ключами в мостовой и полумостовой схемах для верхних ключей. Основным недостатком такого решения является наличие дополнительных моточных узлов, работающих с постоянным подмагничиванием.

В случае управления ключами, работающими в противофазе, возможно применение схемы с импульсным трансформатором, который формирует

противофазное напряжение (Рис. 8). В такой схеме исключено подмагничивание трансформатора. Данный способ является универсальным и подходит для любых двухтактных ключевых схем. Такое решение рекомендовано к использованию в схемах с выходной мощностью более 500 Вт.

После выбора топологии выходного каскада и схемы управления часто возникает задача согласования ультразвукового привода с транзисторами выходного каскада. Под оптимальным согласованием системы следует понимать такой режим работы, при котором в нагрузку поступает колебательная мощность, близкая к максимальной. Другим важнейшим требованием передачи максимальной мощности в нагрузку является согласование сопротивления источника и нагрузки [5]. Согласование ультразвуковых приводов осуществляют применением LC-фильтров различной конфигурации (рис.9., рис.10). Применение согласующих фильтров позволяет приблизить форму тока через мощные ключевые транзисторы к гармонической, что резко увеличивает к.п.д. системы и улучшает электромагнитную совместимость.

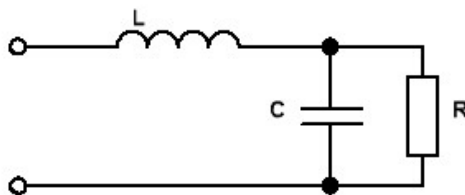


Рис. 9. Схема согласования для пьезоэлектрического преобразователя

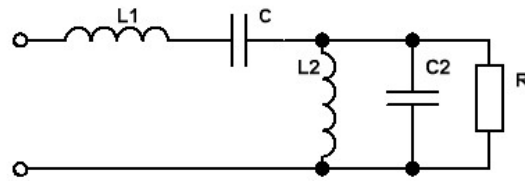


Рис. 10. Схема согласования для пьезоэлектрического преобразователя с последовательным ($L1C$) и параллельным ($L2C2$) контурами согласования

Приведенные схемы согласования, являются наиболее простыми в реализации и обеспечивают хорошие результаты при работе на ультразвуковые приводы со сравнительно невысокой добротностью.

Выводы

Разработка системы управления и ее схемотехническая реализация тесно связаны с основными характеристиками ультразвукового привода. В качестве ключевых элементов мощного выходного каскада можно рекомендовать полевые и IGBT транзисторы, как обеспечивающие высокие технические характеристики. Топология каскада определяется используемыми ключевыми элементами, напряжением питания и мощностью, потребляемой ультразвуковым приводом.

Список литературы

1. Введение в мехатронику: Учеб. Пособие для студ. Спец. «Гидравл. и пневмат. машины», «Прикладная механика», «Инженерная механика» / О. М. Яхно, А.В. Узунов, А.Ф. Луговская и др. - К.: НТУУ «КПИ», 2008. - 528 с.: ил. - Библиогр. в конце разд. ISBN 966-8454-19-7
2. Смирнов А.Б. Элементная база автоматических машин и оборудования. Мехатронные модули микроперемещений машин: Учеб. пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. - 172 с. ISBN 978-5-7422-1882-1
3. Холотов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. - 224с.: ил. ISBN 5-217-00270-0
4. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах/ Дьяконов В.П., Максимчук А.А., Ремнев А.М., Смердов В.Ю. - М.: СОЛОН-Р.-2002. 512 с., ил. ISBN 5-93455-160-4
5. Ультразвуковые электротехнологические установки. Второе издание. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Энергоиздат 1982.