

# Высоковольтные драйверы пьезоэлектрических преобразователей компании Apex Microtechnology

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ  
info@icquest.ru

Компания Apex Microtechnology специализируется на разработке мощных усилителей с рекордными энергетическими показателями, ШИМ-усилителей и прецизионных источников опорного напряжения, спроектированных для коммерческого, авиационного и военного применений. Операционные усилители (ОУ) с высокими уровнями рабочих напряжений и скоростью нарастания выходного сигнала широко используются в драйверах пьезопреобразователей, которые на основе обратного пьезоэффекта позволяют решать задачи сверхточного позиционирования, генерации излучаемого сигнала в гидролокаторах, прецизионного управления подачей чернил в промышленных струйных принтерах и т. д. В статье на примере отдельных ОУ рассмотрены схемотехнические особенности управления пьезокристаллами, а также приведен краткий обзор основных характеристик усилителей, который поможет разработчику сделать обоснованный выбор.

## Введение

Пьезоэлектрический преобразователь, к достоинствам которого относятся высокая линейность характеристик, широкие динамические и частотные диапазоны, простота конструкции и высокая надежность при эксплуатации, представляет собой устройство, основанное на использовании пьезоэффекта в кристаллах, керамике или пленках, открытого еще в 1880 году братьями Жаком и Пьером Кюри. Исходя из физического принципа действия, различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Прямой пьезоэффект связан с возникновением поляризации диэлектрика и, соответственно, электрического поля между поверхностями деформируемого твердого тела под воздействием механических напряжений, а при обратном эффекте приложение электрического напряжения к образцу вызывает его деформацию. Прямой пьезоэффект используется в приборах, осуществляющих измерение параметров механических процессов (вибрации, ударов), давления жидкостей и газа, акустических сигналов, в том числе ультразвуковых, линей-

ных и угловых ускорений. Преобразователи с обратным пьезоэффектом находят применение в качестве излучателей ультразвука в гидроакустике и дефектоскопии, в преобразователях напряжения в перемещение (пьезодвигатели и пьезореле), отвечают за подачу чернил в промышленных струйных принтерах, работают в системах сверхточного позиционирования: иглы в сканирующем туннельном микроскопе и головки жесткого диска. Поскольку в данной статье рассматриваются задачи управления, то нас, прежде всего, интересует обратный пьезоэффект.

Приложение высокого напряжения к пьезопреобразователю цилиндрической формы, изображенному на рис. 1а, вызывает приращение  $\Delta L$  вдоль оси кристалла [1]. Обычно пьезоэлектрический материал выдерживает деформацию или изменение длины порядка 0,1%, то есть воздействие электрического поля на преобразователь размером 100 мм удлинит его не более чем на 0,1 мм. Величина  $\Delta L$  для случая ненагруженного однослойного преобразователя может быть определена из выражения:

$$\Delta L = E \times d_{33} \times L_0,$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м,  $L_0$  — начальная длина пьезокристалла, м, а  $d_{33}$  — пьезоэлектрический коэффициент, м/В. Максимальная напряженность поля, которую большинство пьезоэлектрических материалов способно выдержать, не превышает 2 кВ/мм. Для увеличения значения механического отклонения изготавливают сборку из нескольких тонких пластин, объединенных с помощью склеивания. При этом управляющее напряжение, подаваемое отдельно на каждый слой (рис. 1б), не превышает максимально допустимой величины, а общее изменение длины  $\Delta L_{tot}$  легко рассчитать по формуле:

$$\Delta L_{tot} = N \times \Delta L,$$

где  $N$  — количество слоев.

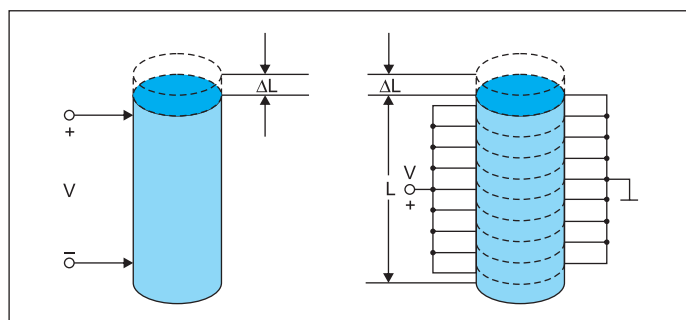


Рис. 1. Подключение пьезоэлектрического преобразователя: а) однослойного; б) многослойного

При управлении, осуществляемом от источника периодического сигнала с частотой ниже резонансной частоты преобразователя (типичный случай для драйверов в струйных принтерах), пьезокристалл можно представить конденсатором, используемым в качестве нагрузки. Тогда работа усилителя аналогична работе на емкостную нагрузку, а ее импеданс  $Z_C$  можно определить из выражения:

$$Z_C = 1/(2 \times \pi \times f \times C_{PA}),$$

где  $f$  — частота управляющего напряжения, а  $C_{PA}$  — эквивалентная емкость пьезопреобразователя.

Решение задачи управления пьезоэлектрическими исполнительными механизмами требует применения высокоскоростных цепей с высокими уровнями рабочих напряжений. Такие цепи могут быть выполнены на основе мощных операционных усилителей Apex, сконфигурированных с учетом специализированных требований. Рассмотрим их основные характеристики, параллельно уделяя особое внимание схемотехническим приемам проектирования схем управления.

### ОУ компании Apex Microtechnology для управления пьезопреобразователями

Мощные операционные усилители Apex Microtechnology представляют собой уникальные по своим параметрам высокофункциональные устройства, сочетающие высокие уровни питающих напряжений, точность и максимальное быстродействие наряду с малыми токами покоя, низкими внутренними потерями и отличной линейностью [2, 3]. В настоящее время для разработчиков доступны компоненты в гибридном (серии PA и PB) и бескорпусном исполнении (серия MP). При производстве усилителя по традиционной гибридной технологии применяются толстопленочные резисторы, керамические конденсаторы и полупроводниковые микросхемы, расположенные на подложке из оксида бериллия (ВеО), обладающей очень высокой теплопроводностью, что минимизирует размер и повышает эффективность (рис. 2). Сваренные ультразвуком алюминиевые проводники обеспечивают надежное соединение для всего диапазона рабочих температур. Бескорпусные отличаются незначительным увеличением размеров, разработаны для снижения общей стоимости изделия и конструктивно выполняются в форм-факторе, соответствующем корпусам типа DIP (DIP-30, DIP-34 и DIP-42). При их изготовлении используются недорогие SMT-компоненты, а суммарный выигрыш по стоимости достигает 75% по сравнению с гибридными изделиями с аналогичными параметрами. Усилители данной группы рекомендуются для обычных

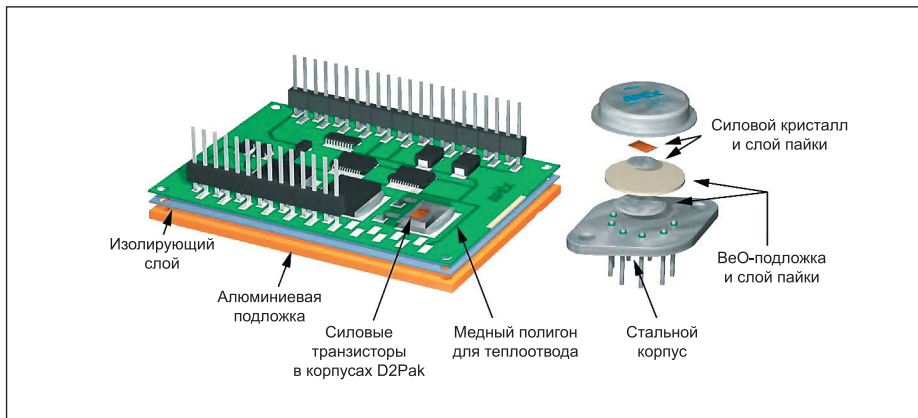


Рис. 2. Конструкция бескорпусных и гибридных изделий Apex

Таблица. Основные характеристики ОУ Apex Microtechnology, предназначенных для управления пьезопреобразователями

Модель	Напряжение питания, В (max)	Выходной ток, А (max)	Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	Ток потребления в режиме ожидания, мА (max)	Рассеиваемая мощность, Вт (max)	Тип корпуса	Примечание
PA02	38	5	20	40	48	TO-3 (8 выв.)	
PA03	150	30	8	300	500	MO-127 (12 выв.)	
PA04	200	20	50	90	200	MO-127 (12 выв.)	
PA05	100	30	100	120	250	MO-127 (12 выв.)	Высокоскоростной
PA07	100	5	4	30	67	TO-3 (8 выв.)	
PA08	300	0,15	30	8,5	17,5	TO-3 (8 выв.)	
PA09M	80	3	200	85	78	TO-3 (8 выв.)	Высокоскоростной
PA10	90	5	3	30	67	TO-3 (8 выв.)	
PA12	90	10	4	50	125	TO-3 (8 выв.)	
PA12A	100	15	4	50	125	TO-3 (8 выв.)	
PA12H	90	1	4	100	6	TO-3 (8 выв.)	
PA15	450	0,2	20	3	30	POWERSIP (10 выв.)	
PA73	60	5	2,6	5	67	TO-3 (8 выв.)	
PA78DK	350	0,15	350	2,5	23	PSOP (20 выв.)	Высокоскоростной
PA79DK	350	0,15	350	2,5	26	PSOP (20 выв.)	Высокоскоростной
PA81J	200	0,03	20	8,5	11,5	TO-3 (8 выв.)	
PA82J	300	0,015	20	8,5	11,5	TO-3 (8 выв.)	
PA83	300	0,075	30	8,5	17,5	TO-3 (8 выв.)	
PA84	300	0,04	180	7,5	17,5	TO-3 (8 выв.)	Высокоскоростной
PA85	1000	0,2	450	25	30	TO-3 (8 выв.)	Высокоскоростной
PA88	450	0,1	30	2	15	TO-3 (8 выв.)	
PA89	1200	0,075	30	6	40	MO-127 (12 выв.)	
PA90	400	0,2	300	14	30	POWERSIP (12 выв.)	Высокоскоростной
PA91	450	0,2	300	14	30	POWERSIP (12 выв.)	Высокоскоростной
PA92	400	4	50	14	80	POWERSIP (12 выв.)	
PA93	400	8	50	14	125	POWERSIP (12 выв.)	
PA94	900	0,1	700	24	30	POWERSIP (8 выв.)	Высокоскоростной
PA95	900	0,1	30	2,2	30	POWERSIP (8 выв.)	
PA96	300	1,5	250	18	83	TO-3 (8 выв.)	Высокоскоростной
PA97	900	0,01	8	1	5	SIP-7	
PA98	1000	0,2	450	25	30	POWERSIP (12 выв.)	Высокоскоростной
PA107DP	200	5	3000	35	60	POWERSIP (12 выв.)	Высокоскоростной
PA119CE	900	4	80	120	78	TO-3 (8 выв.)	Высокоскоростной
PA340	350	0,12	30	2,2	14	D2Pak (7 выв.)	
PA341CE	350	0,12	30	2,2	12	TO-3 (8 выв.)	
PA341DF	350	0,12	30	2,2	12	PSOP (24 выв.)	
PA341DW	350	0,12	30	2,2	12	POWERSIP (10 выв.)	
PA343	350	0,12	30	2,2	12	PSOP (24 выв.)	
PA441DF	350	0,6	32	2,2	12	PSOP (24 выв.)	
PA441DW	350	0,6	32	2,2	9	SIP-10	
PA443DF	350	1,2 (2 по 0,6 А)	32	2,2	12	PSOP (24 выв.)	
MP38CLA	200	8	63	24	125	DIP-30	
MP39CLA	100	11	10	24	125	DIP-30	
MP103FC	200	30 (2 по 15 А)	167	19	59,3 (на канал)	DIP-42	Высокоскоростной
MP108FDA	200	11	170	65	100	DIP-34	Высокоскоростной
MP111FD	100	15	130	157	170	DIP-34	Высокоскоростной
MP118FD	200	10	65	26	100	DIP-34	
MP400FC	350	0,2	50	2,5	14,2	DIP-42	Высокоскоростной
PB50	200	2	100	25	35	TO-3 (8 выв.)	
PB51	300	1,5	100	18	83	POWERSIP (12 выв.)	
PB58	300	1,5	250	35	70	TO-3 (8 выв.)	Высокоскоростной, усилитель мощности
PB63	175	2	1000	20	35	POWERSIP (12 выв.)	

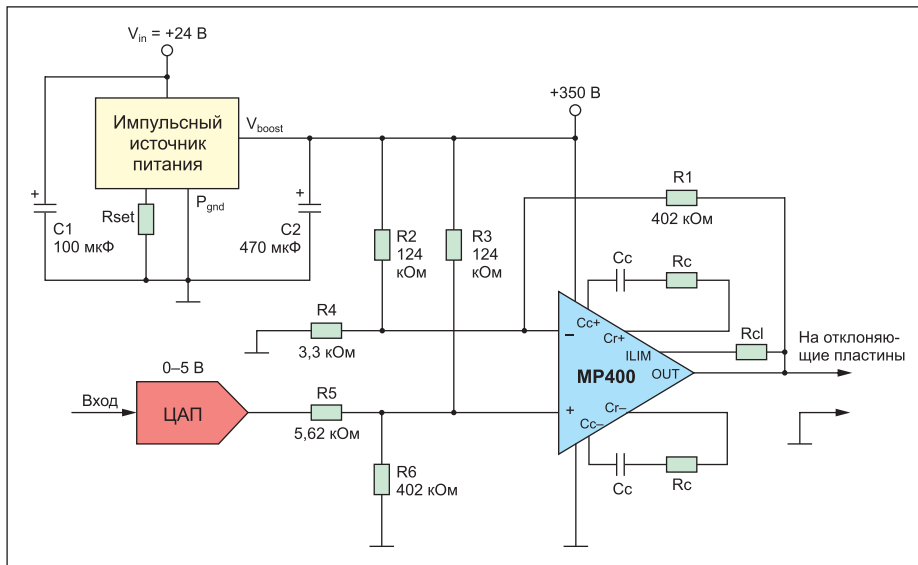


Рис. 3. Типовая схема применения ОУ MP400

условий эксплуатации, когда не требуется защита от жестких внешних механических и климатических воздействий. В конструкции бескорпусного устройства можно выделить алюминиевую подложку с лучшими по сравнению со сталью тепловыми характеристиками, изоляционный слой для электрической изоляции платы усилителя от основания, саму плату с расположенными на ней электронными компонентами, разьемами и дорожками [4]. Силовые транзисторы в стандартных корпусах D2Pak с медным радиатором, расположенным сзади, обладают очень низким тепловым сопротивлением.

Все выпускаемые усилители условно подразделяются производителем на высоковольтные, силовоточные и быстродействующие (с высокой скоростью нарастания выходного напряжения). В группу ОУ, предназначенных для управления пьезопреобразователями, в настоящее время входит 52 устройства (таблица). Рассмотрим характеристики наиболее привлекательных из них.

Высоковольтными считаются операционные усилители с полным диапазоном напряжения питания более 100 В при однополярном подключении (или более  $\pm 50$  В при двухполярном). Гибридный усилитель PA89, являющийся старшим представителем линейки высоковольтных усилителей, характеризуется выходным пиковым напряжением 1200 В, максимальным рабочим током 75 мА (100 мА в импульсе), рассеиваемой мощностью 40 Вт (без радиатора при  $+25$  °С), током покоя не более 6 мА и диапазоном рабочих температур  $-55...+125$  °С. Выходной каскад на полевых транзисторах, работающий в режиме АВ, обеспечивает высокую линейность [5]. Все внутренние смещения усилителя скомпенсированы встроенными источниками тока на зенеровских полевых транзисторах, что обеспечивает широкий диапазон питающих напряжений с низким

уровнем пульсаций. Усилитель отличается гибкостью применения: при помощи внешних цепей компенсации можно регулировать полосу пропускания и скорость нарастания выходного напряжения. Конструктивно PA89 изготавливается в герметичном электрически изолированном корпусе МО-127, пригодном для жестких условий эксплуатации.

Сверхвысоковольтный гибридный усилитель PA94 помимо высокого питающего напряжения (900 В) имеет хорошее быстродействие: скорость нарастания его выходного напряжения достигает 700 В/мкс. На выходе обеспечивается максимальный постоянный ток 100 мА, значение импульсного тока может увеличиваться до 200 мА (при емкостной нагрузке), максимальная рассеиваемая мощность составляет 30 Вт (без радиатора при  $+25$  °С). Герметичный, электрически изолированный 8-выводный корпус PowerSIP, занимающий на печатной плате площадь не более 5 см<sup>2</sup>, идеально подходит для устройств, критичных к габаритам применяемых электронных компонентов [6].

Отличительная черта компонентов четвертого поколения серии PA44x — высокое качество сигнала. Две одноканальные (PA441DF и PA441DW) и одна двухканальная (PA443DF) монолитные ИС обладают улучшенными характеристиками и выделяются на фоне остальных минимальным уровнем шумов выходного напряжения (среднеквадратичное значение 12 мкВ на частоте 20 кГц). Усилители работают в широком диапазоне напряжений питания до  $\pm 175$  В, непрерывный выходной ток составляет 60 мА с пиковым значением 120 мА, двухканальный вариант обеспечивает удвоенное значение тока выхода, потребляя при этом всего 2,2 мА [7]. Все три ИС имеют низкий показатель напряжения смещения 5 мВ при температуре  $+25$  °С и не более 20 мВ в температурном диапазоне  $-40...+125$  °С.

PA441DF и PA443DF поставляются в 24-выводных пластиковых корпусах PSOP, тогда как PA441DW доступен в электрически изолированном 10-контактном керамическом корпусе форм-фактора SIP.

Среди бескорпусных высоковольтных изделий разработчиков могут заинтересовать недорогой двухканальный малогабаритный ОУ MP103 с максимальным рабочим напряжением 200 В и общим выходным током 30 А, а также быстродействующий MP400 с встроенным повышающим импульсным преобразователем, позволяющим использовать для питания схемы источник со стандартными 12 или 24 В (диапазон входных напряжений 10–50 В) и упростить тем самым проектируемую схему (рис. 3) [8].

Группу силовоточных приборов образуют устройства, обеспечивающие выходной ток 1–50 А. Здесь привлекают внимание PA03 и PA05 — гибридные усилители с выходным током 30 А, напряжением питания 150 и 100 В и максимальным значением рассеиваемой мощности 500 и 250 Вт соответственно [9, 10]. Производятся они в герметически изолированных корпусах МО-127, обладающих превосходной теплопроводностью. Встроенная цепь ограничения выходного тока, температурный датчик и наличие функции удаленного отключения обеспечивают надежное функционирование в области устойчивой работы (SOA). Входная цепь реализована на основе высокоэффективных полевых транзисторов, изготовленных с применением лазерной подгонки, выходной каскад содержит защитные диоды с быстрым восстановлением.

Согласно классификации Apex Microtechnology, к высокоскоростным относятся усилители, скорость нарастания выходного напряжения которых превышает 100 В/мкс. По этому показателю вне конкуренции оказывается усилитель PA107DP с величиной значимого параметра 3000 В/мкс. Он может работать от источника питания с напряжением до 200 В, характеризуется широкой полосой пропускания 180 МГц и выходным током 1,5 А (до 5 А в импульсе). Микросхемы выпускаются в корпусе PowerSIP, а для обеспечения SOA необходимо использовать радиатор [11].

Для увеличения выходной мощности, достижения минимального выходного сопротивления и обеспечения корректной работы на нагрузку с высокой емкостью успешно используются широкополосные буферные усилители серии PB [12]. Типовое применение подразумевает соединение ОУ данной серии с малосигнальными операционными усилителями общего назначения, выбранными по усмотрению разработчика. Полученный в результате составной усилитель обладает оптимальной точностью, низким входным шумом и временем установки рабочего режима, высокой выходной мощностью и делает возможным выполнение разработки без помощи более дорогих линеек изделий.

В настоящее время семейство РВ представлено четырьмя компонентами, имеющими схожую внутреннюю структуру. Входные каскады выполняются на основе биполярных транзисторов, подключаемых по схеме с ОЭ, каскад усиления напряжения — на МОП-транзисторах с общим истоком, а выходной каскад — на двух комплементарных МОП-транзисторах. Усилитель РВ50, рассчитанный на напряжение питания 200 В, выходной ток до 2 А и скорость нарастания напряжения 50 В/мкс, изготавливается в герметичном 8-выводном корпусе ТО-3. Максимальной выходной мощностью обладают РВ51 и РВ58 с выходным током 1,5 А и напряжением питания 300 В. Самый быстродействующий представитель серии — двухканальный усилитель мощности РВ63 со временем нарастания 1000 В/мкс работает при напряжениях питания  $\pm(20-75)$  В и способен долговременно обеспечивать выходной ток до 2 А. Его двухканальность позволяет создавать печатные платы с высокой плотностью размещения элементов.

### Типовые схемы драйверов пьезоэлектрических преобразователей

При разработке драйверов необходимо учесть несколько моментов. Они должны функционировать в области безопасной работы (SOA), иметь цепь ограничения тока, достаточный теплоотвод, защитные диоды и соответствующие компенсирующие емкости. Не существует одной универсальной схемы, подходящей для управления всеми пьезоэлектрическими преобразователями. В одном приложении необходимо приводить в действие пьезоэлектрические печатающие головки, состоящие из сотен объединенных параллельно преобразователей и требующие высоких токов управления (десятки ампер). В случае прецизионных приложений необходимо генерирование формы импульса, отличной от прямоугольной, с заданными временами фронта и спада. Поэтому понимание всех особенностей функционирования управляемого объекта становится неотъемлемой частью типового алгоритма разработки драйверов пьезоэлектрических преобразователей. Для типовых применений компанией Apex Microtechnology предлагаются схемотехнические решения, многократно испытанные на практике. Мы рассмотрим три схемы, работающие на нагрузку с номинальными емкостями от единиц пикофард (отклоняющие пластины) до 500 нФ (пьезоэлектрические актуаторы).

Схема, изображенная на рис. 4, предназначена для управления пьезоэлектрическими преобразователями, применяемыми в широкоформатных промышленных принтерах, печатающих материалы для рекламных щитов [13]. В этом устройстве эквивалентная емкость параллельно соединенных пластин

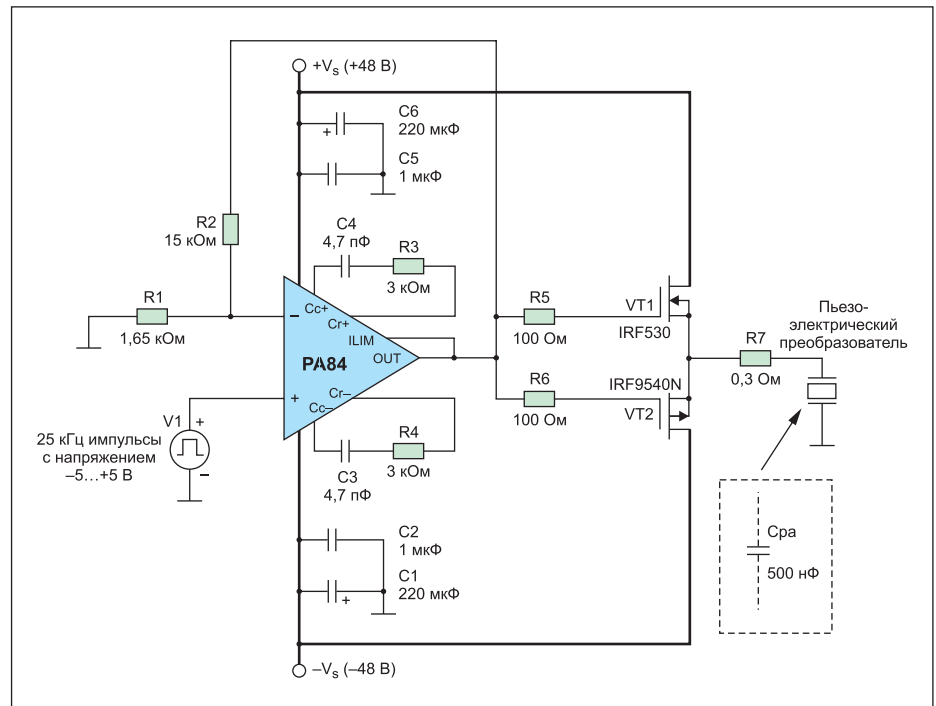


Рис. 4. Типовая схема подключения ОУ PA84

составляет 500 нФ, требуемый выходной ток 10 А и скорость нарастания напряжения не менее 20 В/мкс. Такое значение имеет много усилителей из линейки Apex Microtechnology, возьмем для примера PA84 с номинальной скоростью 180 В/мкс. Поскольку PA84 не способен выдавать требуемые 10 А, применяется пара внешних полевых МОП-транзисторов VT1 и VT2. Компенсирующая цепь, образованная конденсаторами C3 и C4 (емкость 4,7 пФ) и резисторами R3 и R4 (сопротивление 3 кОм), контролирует скорость нарастания, которая в свою очередь регулирует ток через транзисторы согласно формуле:

$$I = Cx(dU/dt).$$

Номинальные значения пассивных компонентов корректирующей схемы выбирают из графиков, предлагаемых в справочной информации на конкретный усилитель. Симметричные управляющие импульсы с размахом напряжения от  $-5$  до  $+5$  В, подаваемые на неинвертирующий вход усилителя, могут генерироваться при помощи ПЛИС или других источников. Резисторы R5 и R6 с номиналом 10 Ом, включенные в затворы транзисторов, предотвращают возможное появление «звона», обусловленного влиянием емкости затвора и паразитной индуктивности разводки печатной платы. Десятикратный коэффициент усиления, задаваемый резисторами R1 и R2, обеспечивает на выходе усилителя сигнал с размахом напряжения  $-48 \dots +48$  В. Таким образом, в этой схеме PA84 выступает в качестве драйвера затворов транзисторов. Резистор R7 (0,3 Ом) необходим для повышения стабиль-

ности работы, нагрузка при его использовании становится не полностью реактивной. Керамические конденсаторы C2 и C5 (1 мкФ) и электролитические C1 и C6 с емкостью 220 мкФ осуществляют фильтрацию питающего напряжения.

Мостовая схема драйвера пьезоэлектрического привода, показанная на рис. 5, служит для удвоения выходного напряжения и применяется в случае, когда необходимо управляющее напряжение порядка сотен вольт и более [14]. Цепь драйвера состоит из ведущего (РА78-А) и ведомого (РА78-В) усилителей.

Ведомый играет роль инвертора, напряжение к выводам пьезокристалла прикладывается в противофазе, благодаря чему и происходит удвоение. Когда выход  $V_{outa}$  растет от 10 до 160 В, напряжение на выходе  $V_{outb}$  уменьшается со 160 до 10 В, итоговый размах напряжения через нагрузку составляет 300 В ( $-150 \dots +150$  В). Подобная схема по сравнению с одиночным усилителем также удваивает скорость нарастания выходного напряжения и устраняет возможные нелинейные искажения. Входной источник V1 генерирует импульсы с напряжением 15 В (п-п) и частотой 80 кГц, эквивалентную схему нагрузки можно представить последовательно соединенными конденсатором с емкостью 1 нФ и резистором с сопротивлением 1 Ом. Общий коэффициент усиления достигает 20. Для питания применяется асимметричный источник с напряжениями шин  $+175$  и  $-5$  В. Величины  $+V_s$  и  $-V_s$  выбраны так, чтобы обеспечить достаточный размах выходных напряжений  $V_{outa}$  и  $V_{outb}$ . Любой пьезоэлектрический преобразователь способен успешно преобра-

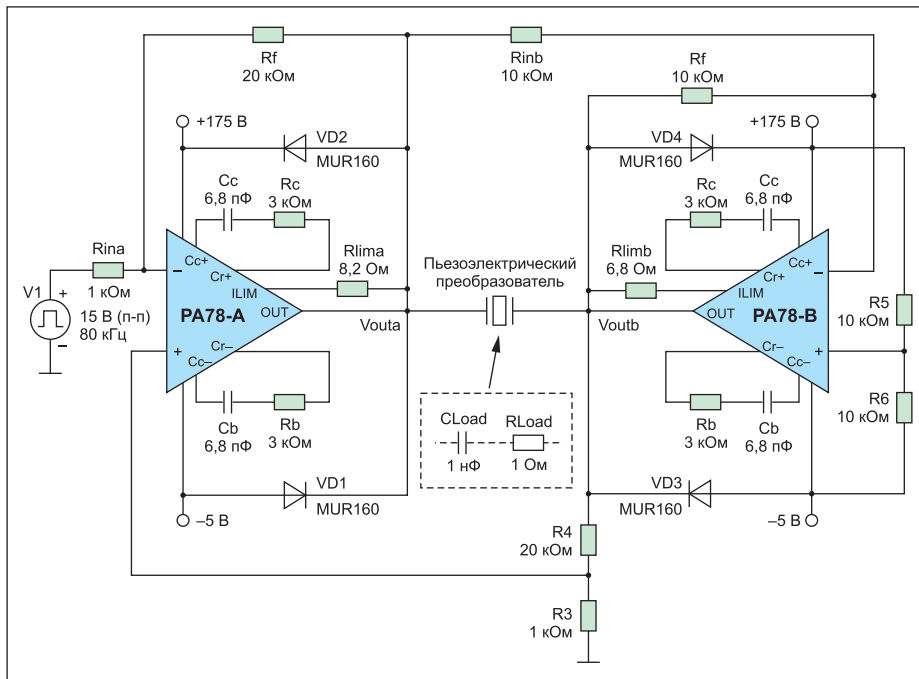


Рис. 5. Мостовая схема включения двух усилителей PA78

зовывать как электрическую энергию в механическую, так и наоборот. Электрический сигнал, полученный в результате непреднамеренного механического воздействия на пьезокристалл, может привести к разрушающим последствиям. Диоды VD1–VD4, подключаемые к шинам питания, осуществляют защиту выходов от этого паразитного импульса. В данной схеме применяются сверхбыстрые MUR160 в течение обратного восстановления не более 100 нс.

Поскольку сам пьезопреобразователь в статическом режиме фактически ничего не потребляет, а рассеиваемая мощность в основном выделяется на ОУ, для обеспечения безопасной работы следует рассмотреть вопрос охлаждения схемы. Общий импеданс нагрузки складывается из активной и реактивной составляющих:

$$Z = R + (1/(j\omega C)) = 1 + (1/(j2\pi(80 \times 10^3) \times (1 \times 10^{-9}))) = 1 - j1989.$$

Активная часть полученной величины пренебрежимо мала по сравнению с реактивным сопротивлением (1989 Ом), поэтому ее можно не учитывать. Для дальнейшего расчета воспользуемся эквивалентной схемой, где нагрузка условно разделена на две части (по числу усилителей), каждая из которых состоит из 2-нФ конденсаторов и резисторов с сопротивлением 0,5 Ом (рис. 6).

Приложенное к каждой половине эквивалентной схемы напряжение определяется из формулы:

$$V_s = 0,5 \times [(+V_s) - (-V_s)] = 0,5 \times [(175) - (-5)] = 90 \text{ В}.$$

Тогда максимальная рассеиваемая мощность не превышает:

$$P_{D(\max)} = (2 \times V_s^2) / (\pi \times Z) = (2 \times 90^2) / (\pi \times 994,5) = 5,18 \text{ Вт},$$

где  $Z$  — половина от величины общего импеданса нагрузки.

Для каждого усилителя на сайте производителя доступны руководства по применению, позволяющие выбрать радиаторы, подходящие для того или иного изделия. Далее необходимо убедиться, что температура перехода внутренних МОП-транзисторов каждого усилителя не превышает безопасной величины:

$$T_J = P_D \times (\theta_{JC} + \theta_{HS}) + T_A = 5,18 \times (5,5 + 7,8) + 25 = 93,9 \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $\theta_{JC}$  — тепловое сопротивление PA78,  $\theta_{HS}$  — тепловое сопротивление выбранного радиатора HS27, а  $T_A$  — температура окружающей среды. Таким образом, реальная

температура перехода при данной нагрузке и использовании радиатора не превышает  $+93,9 \text{ }^\circ\text{C}$  при максимально допустимой  $+150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Схема высокоскоростного драйвера, представленная на рис. 7, предназначена для управления применяемыми в струйных принтерах отклоняющими пластинами, эквивалентная емкость которых не превышает 10 пФ. Капли чернил 50 или 60 мкм в диаметре на высокой скорости выпускаются из специального резервуара и проходят через электростатически заряженную область между двумя пластинами. Под воздействием регулирующего сигнала каждая капля отклоняется в нужном направлении для того, чтобы сформировать требуемый символ на поверхности печати. Входной сигнал, приходящий в цифровом виде на ЦАП, преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов с напряжением 0–3 В, подаваемую на быстрый предусилитель AD817, который в свою очередь является ведущим для мощного усилителя PA78. Периодические импульсы с амплитудой 0–300 В и частотой 100 кГц с выхода последнего подаются непосредственно на пьезопреобразователи.

Следует также привести пример выбора конкретного ОУ, исходя из некоторых рекомендаций компании Apex Microtechnology [15]. В общем случае при известных входных и выходных параметрах эта задача сводится к выполнению определенной последовательности действий. Исходные данные:

- напряжение питания  $\pm V_s = \pm 200 \text{ В DC}$ ;
- максимальная частота управляющих импульсов 10 кГц;
- входное напряжение  $V_{in} = \pm 10 \text{ В}$ ;
- нагрузка: пьезоэлектрический преобразователь с эквивалентной емкостью 10,6 нФ;
- требуемое выходное напряжение 360 В (размах), 180 В (амплитуда);
- температура окружающей среды  $T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Путем несложных расчетов получаем недостающие значения параметров схемы:

1. Расчет скорости нарастания выходного напряжения SR (slew rate):

$$SR = 2 \times \pi \times f \times V_{O(p)} = 2 \times \pi \times 10 \text{ кГц} \times 180 \text{ В} \times 10^{-6} = 11,3 \text{ В/мкс}.$$

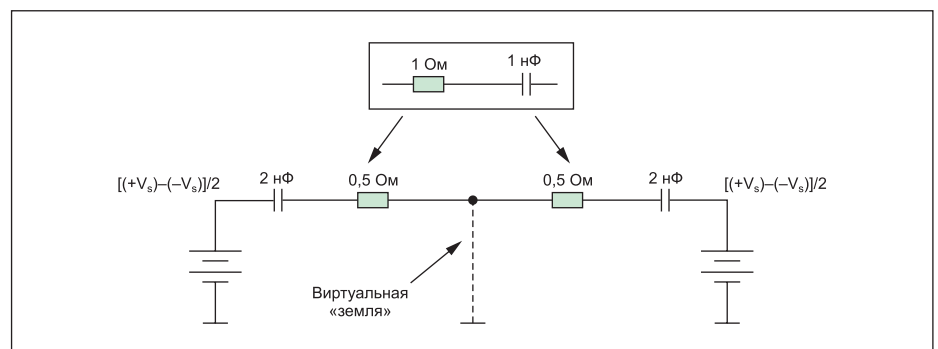


Рис. 6. Эквивалентная схема нагрузки

2. Расчет максимального значения выходного тока через сопротивление нагрузки:

$$Z_C = 1/(2 \times \pi \times f \times C) = 1/(2 \times \pi \times 10 \text{ кГц} \times 10,6 \text{ нФ}) = 1,5 \text{ кОм},$$

$$I_{O(p)} = V_{O(p)}/Z_C = 180 \text{ В}/1,5 \text{ кОм} = 120 \text{ мА}.$$

3. Расчет максимального уровня рассеиваемой мощности для нагрузки емкостного типа:

$$P_{D(\max)} = (4 \times V_s^2)/(2 \times \pi \times Z_C) = (4 \times (200 \text{ В})^2)/(2 \times \pi \times 1,5 \text{ кОм}) = 17 \text{ Вт}.$$

Полученным значениям удовлетворяет усилитель PA85, воспользуемся его справочными материалами. Из выходной характеристики на рис. 8а видно, что сигнал с напряжением 360 В (п-п) и частотой 10 кГц находится в пределах кривых для любого значения компенсирующей емкости  $C_c$ . Так как напряжение входного сигнала схемы 10 В, а на выходе нужны импульсы с амплитудой 180 В, то требуемый коэффициент усиления составляет 18. Для такой величины номиналы пассивных элементов компенсирующей цепи  $C_c \sim 10$  пФ и  $R_c \sim 330$  Ом (рис. 8б). При  $C_c = 10$  пФ максимальная скорость SR достигает 400 В/мкс, что значительно выше полученной при расчете (рис. 8в). На рис. 8г показана амплитудно-частотная характеристика, согласно которой для коэффициента усиления 18 (25 дБ) ширина полосы рабочих

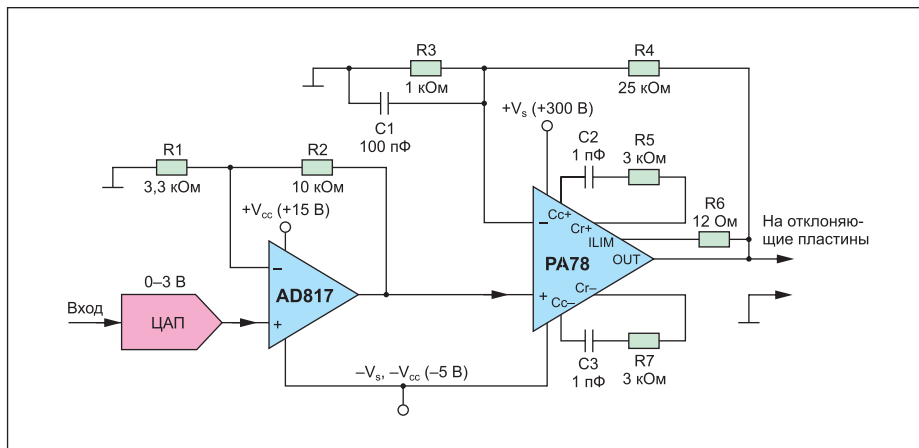


Рис. 7. Схема управления отклоняющими пластинами

частот  $f_{cl}$  составляет не менее 2 МГц, которой для наших 10 кГц тоже достаточно с запасом. И наконец, из графика на рис. 8д видно, что для того, чтобы не превысить максимальную температуру корпуса усилителя при рассеиваемой мощности 17 Вт, необходимо применять радиатор.

Эту и другую информацию можно найти на официальном сайте компании. Вся продукция имеет отличную техническую поддержку. Помимо полной технической документации, для разработчиков предлагаются руководства по выбору и применению, SPICE-модели компонентов для схемотехнического моделирования, демонстрационные

платы для оценки возможностей устройств, технические статьи от инженеров компании и материалы семинаров, а также программа расчетов параметров принципиальных схем и радиаторов.

**Заключение**

Уникальные по своим параметрам гибридные и бескорпусные устройства компании Apex Microtechnology уже несколько десятилетий занимают лидирующее положение на рынке операционных усилителей. Быстродействующие, высоковольтные, высокоточные — номенклатура каждого из се-

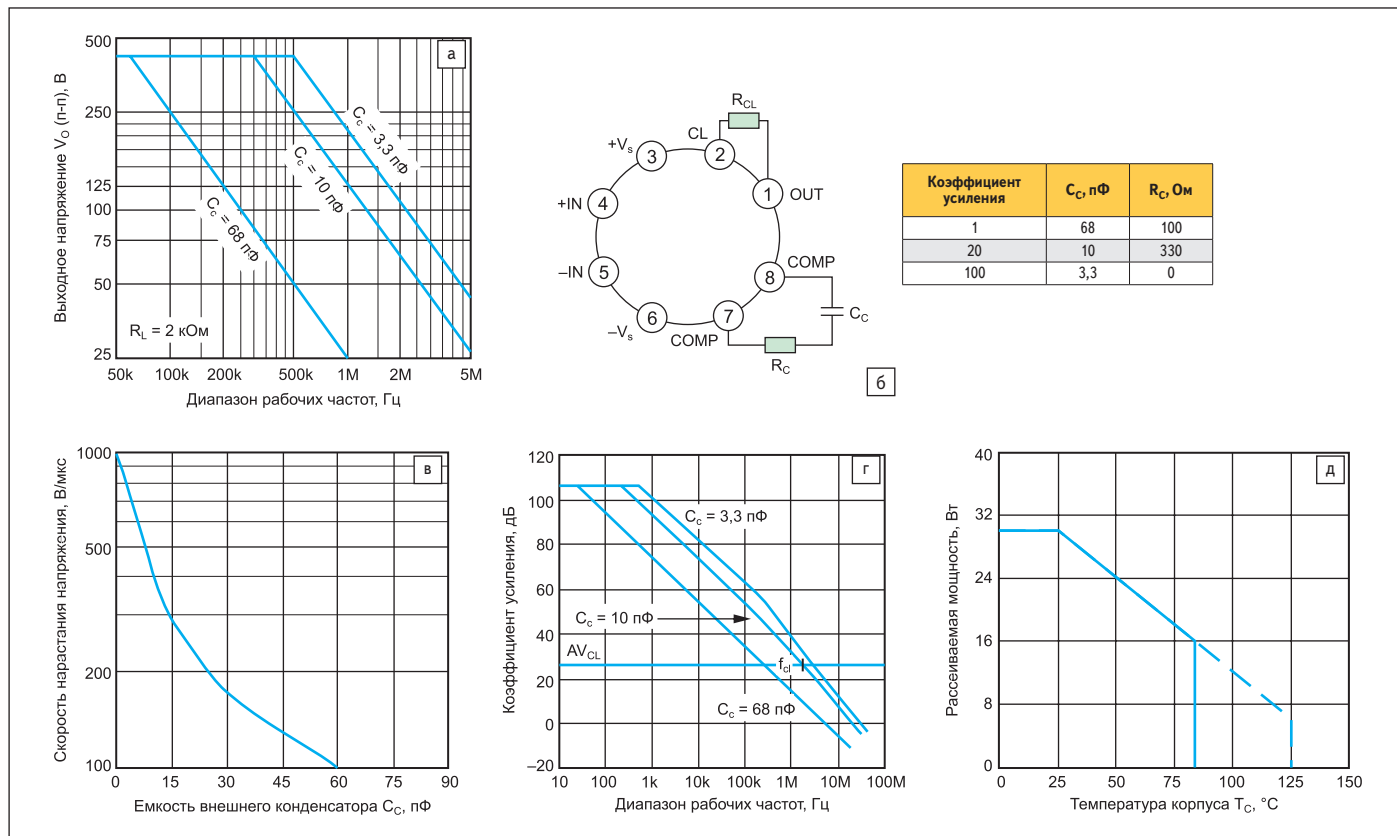


Рис. 8. Характеристики усилителя PA85

мейств достаточно широка для того, чтобы выбрать компоненты с требуемым значением ключевого параметра для различных областей применения, в том числе и для управления пьезопреобразователями. Их использование позволяет значительно повысить надежность и сократить время разработки, снизить стоимость проекта в целом и найти решение, которое было нереализуемо по причине его дороговизны в дискретном исполнении или просто невозможно по техническим причинам. ■

### Литература

1. Robinson S. Driving piezoelectric actuators // Power electronics technology. 2006. № 4.
2. Верхулевский К. Мощные операционные усилители компании Apex Micro-technology // Силовая электроника. 2013. № 4.
3. Верхулевский К. Мощные усилители компании Apex Microtechnology и военного назначения // Силовая электроника. 2016. № 6.
4. Официальный сайт компании Apex Micro-technology. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
5. PA89: High voltage power operational amplifier. Datasheet. October, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
6. PA94: High voltage power operational amplifier. Datasheet. October, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
7. PA441DF/PA441DW/PA443DF: 350V single, dual low-noise power amplifier. Product overview. 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
8. MP400: Power operational amplifier. Datasheet. September, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
9. PA03: Power operational amplifier. Datasheet. September, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
10. PA05: Power operational amplifier. Datasheet. September, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
11. PA107DP: Power operational amplifier. Datasheet. November, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
12. Power booster applications. Application note 14. October, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
13. Driving piezoelectric actuators. Application note 44. October, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
14. Bridge mode operation of power operational amplifiers. Application note 20. October, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)
15. Driving capacitive loads. Application note 25. October, 2012. [www.apexanalog.com](http://www.apexanalog.com)