

# Активный фильтр на мощном полевом транзисторе

Алексей Кузьминов (Москва)

В статье обсуждаются принципиальные схемы активных фильтров на базе ОУ и мощных полевых транзисторов. Применение таких фильтров позволяет уменьшить размах пульсаций выпрямленного напряжения в 25 раз, что эквивалентно установке сглаживающих конденсаторов ёмкостью 0,5 Ф. Фильтры оснащены защитой от превышения тока и короткого замыкания.

## ВВЕДЕНИЕ

Для прецизионных измерений в научных исследованиях часто требуются блоки питания (БП) с ультранизким уровнем пульсаций. Применение импульсных источников питания (ИИП), имеющих уровень пульсаций в десятки милливольт, для этих целей исключено. Единственным способом получения напряжения с ультранизким уровнем пульсаций является использование БП на основе 50-герцового сетевого трансформатора. Традиционный выпрямитель, как известно, состоит из мощных диодов, включённых по мостовой или полумостовой схеме, и сглаживающих конденсаторов большой ёмкости.

В прецизионных лабораторных БП после выпрямителя обычно устанавливается линейный стабилизатор напряжения, который подавляет 100-герцовые пульсации выпрямленного напряжения, но до определённого уровня. Иногда ёмкость сглаживающих конденсаторов составляет 100 000 мкФ и более. При включении БП в начальный момент времени возникает зарядный ток, который может достигать очень больших значений. По мере заряда конденсаторов ток постепенно уменьшается, однако время, в течение которого он проте-

кает, зависит от ёмкости сглаживающих конденсаторов С и внутреннего сопротивления источника питания. Длительное протекание большого зарядного тока может привести к выходу из строя диодов и срабатыванию плавкого предохранителя, поэтому для ограничения зарядного тока устанавливают резистор небольшого номинала (20...100 Ом), параллельно которому включают контакты реле. При достижении номинального выходного напряжения реле включается, шунтирует своими контактами токоограничительный резистор, и линейный стабилизатор получает полноценное питание.

Однако такое решение проблемы приводит к дополнительным затратам, так как, во-первых, реле, рассчитанное на большой ток, не дёшево, во-вторых, конденсаторы большой ёмкости также достаточно дорогие и имеют большие габариты. Эту проблему пульсаций можно решить другим способом, не требующим ни больших материальных затрат, ни увеличения массогабаритных показателей БП. Этот способ заключается в использовании активного фильтра на базе мощного полевого транзистора и операционного усилителя (ОУ).

## СХЕМЫ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

В статье «Импульсный ИП со стабилизированным выходом и низким уровнем пульсаций» [1] говорится об использовании активного фильтра выпрямленного и сглаженного сетевого напряжения, которое требуется для работы импульсного источника питания. Схема такого фильтра проста (см. рис. 1). Принцип действия фильтра заключается в следующем. Конденсатор С1 заряжается через резистор R1 до среднего уровня входного напряжения (примерно 310 В), а С2 – до среднего уровня напряжения на конденса-

торе С1. Размах пульсаций напряжения на конденсаторе С1 в несколько раз ниже размаха пульсаций входного напряжения, поскольку цепочка R1C1 представляет собой простейший RC-фильтр низких частот, а размах пульсаций на конденсаторе С2 в несколько раз ниже размаха пульсаций напряжения на конденсаторе С1. Таким образом, размах пульсаций напряжения на затворе транзистора в десятки раз меньше размаха пульсаций входного напряжения.

Поскольку напряжение истока повторяет напряжение затвора (сдвинутое на значение напряжения отсечки транзистора), то на истоке размах пульсаций будет таким же, как на конденсаторе С2 при условии, что среднее напряжение на С2 ниже минимального входного напряжения, то есть ниже его среднего значения минус амплитуда пульсаций (и минус напряжение отсечки). Для выполнения этого условия используется резистор R3, который сдвигает уровень среднего напряжения на С2 «вниз» до нужного уровня. По существу, этот сдвиг определяется делителем R1R3.

Супрессоры VD1 и VD2 ограничивают максимальное значение напряжения затвор-сток и затвор-исток, чтобы транзистор не вышел из строя в момент включения.

Если постоянная времени  $\tau$ , определяемая двумя RC-цепочками R1C1 и R2C2, больше, чем обратная величина частоты пульсаций выпрямленного напряжения, основная гармоника которого составляет 100 Гц, то подавление пульсаций будет оптимальным. Поскольку статический ток затвора транзистора очень мал, номиналы резисторов R1 и R2 могут составлять до 100 кОм, а номиналы ёмкостей С1 и С2 – доли мкФ.

Схема, показанная на рисунке 1, имеет две особенности. Первая состоит в том, что транзистор включён стандартным способом, используемым в линейных стабилизаторах: на сток подаётся входное напряжение, а с истока снимается выходное напряжение. Вторая особенность используемого транзистора: низкий порог включения – до 1 В (например, IRL2910). Если размах пульсаций входного напряже-

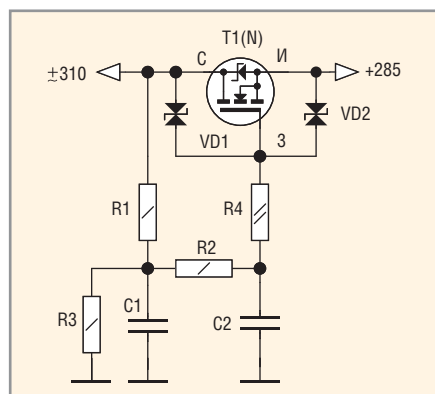


Рис. 1. Схема активного фильтра выпрямленного сетевого напряжения

ния составляет около 20 В, это не составит проблемы, тем более, что R3 сдвигает «вниз» напряжение на C1.

Однако такой фильтр нельзя применять для выпрямленного и сглаженного выходного напряжения вторичной обмотки трансформатора, поскольку, во-первых, размах пульсаций здесь на порядок ниже (около 2 В), во-вторых, мощные Р-канальные транзисторы с низким порогом включения не выпускаются (пороговое напряжение для них составляет 3...5 В). Например, если среднее выпрямленное напряжение составляет +20 В, а размах пульсаций  $\pm 1$  В, максимальное напряжение с учётом амплитуды пульсаций составляет +21 В. Чтобы открыть такой транзистор требуется на затвор подать напряжение +20 В + (3...5) В = 23...25 В. Очевидно, что такое напряжение из входного не получить. Можно, конечно, «сдвинуть» напряжение затвора с помощью R3 (см. рис. 1) на 3...5 В «вниз», однако при токе в 10 А транзистору придётся рассеять  $5 \text{ В} \times 10 \text{ А} = 50 \text{ Вт}$  бесполезной энергии в тепло.

В других статьях [1, 2] мощный полевой транзистор включён в линейном стабилизаторе иначе. В схеме стабилизатора положительной полярности (см. рис. 2а), во-первых, используется транзистор с каналом противоположной полярности (P), во-вторых, транзистор «перевернут», то есть на исток подаётся входное напряжение, а со стока снимается стабилизированное напряжение. Аналогично устроен и стабилизатор отрицательной полярности (см. рис. 2б).

Преимущество такого включения транзистора заключается в том, что для открытия Р-канального транзистора на его затвор следует подать напряжение ниже входного на 3...5 В. Если, например, входное напряжение составляет +20 В с учётом пульсаций, то чтобы открыть такой транзистор, на затвор требуется подать напряжение  $20 \text{ В} - (3...5) \text{ В} = 15...17 \text{ В}$ . Очевидно, такое напряжение легко получить из входного напряжения. Аналогичные рассуждения справедливы и для стабилизатора отрицательной полярности (см. рис. 2б).

Принцип работы стабилизатора положительной полярности (см. рис. 2а) очень простой. На базе ОУ DA1.2, трёх резисторов R1, R2 и R3 и стабилитрона VD1 формируется высокостабильное опорное напряжение +Vref. Коэффициент стабилизации в этой класси-

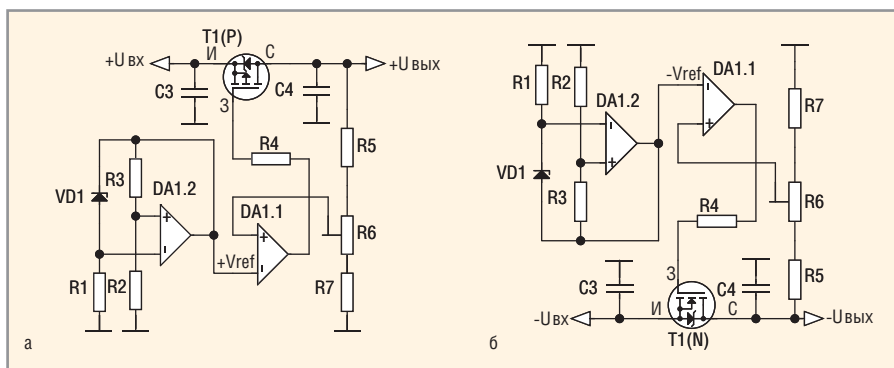


Рис. 2. Упрощённые схемы линейных стабилизаторов положительной (а) и отрицательной (б) полярности на ОУ и мощном полевом транзисторе

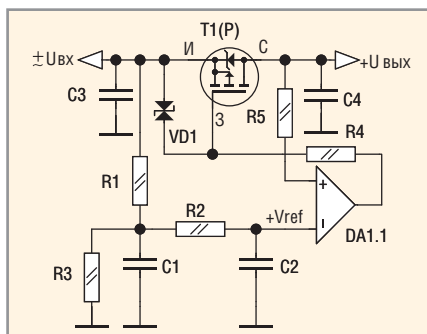


Рис. 3. Упрощённая схема активного фильтра напряжения положительной полярности на ОУ и мощном полевом транзисторе

ческой схеме формирователя опорного напряжения [3] достигает  $10^4$  [4]. Операционный усилитель DA1.1 используется для сравнения опорного напряжения Vref, поданного на его инвертирующий вход, с выходным напряжением стабилизатора, поданным на его неинвертирующий вход с делителя R5, R6 и R7. Выходное напряжение ОУ DA1.1 через резистор R4 подаётся на затвор транзистора. Если при подключении нагрузки выходное напряжение стабилизатора начинает падать, то начинает падать и напряжение на неинвертирующем входе ОУ DA1.1, что приводит к падению напряжения на затворе транзистора. Падение напряжения на затворе транзистора приводит к его приоткрыванию и восстановлению прежнего значения выходного напряжения с высокой точностью. Аналогичным образом работает стабилизатор напряжения отрицательной полярности (см. рис. 2б).

Если в стабилизаторе положительной полярности (см. рис. 2а) заменить формирователь опорного напряжения (DA1.2, R1, R2, R3 и VD1) двумя RC-цепочками (R1C1 и R2C2) и резистором R3 из схемы, представленной на рисунке 1, получается схема, показанная на рисунке 3, и стабилизатор превращается в фильтр напряжения поло-

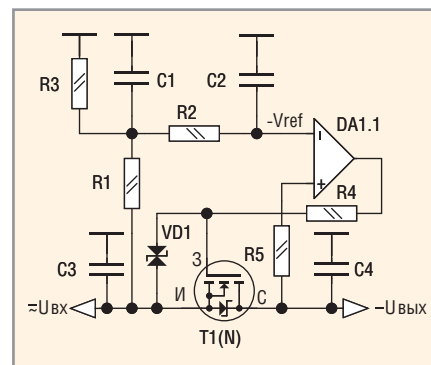


Рис. 4. Упрощённая схема фильтра напряжения отрицательной полярности

жительной полярности. Соответствующее включение транзистора избавляет схему, изображённую на рисунке 3, от недостатков схемы, приведённой на рисунке 1 (напряжение управления затвором транзистора ниже напряжения питания на 3...6 В, а транзистор может иметь более высокое пороговое напряжение). Преимущество схемы, представленной на рисунке 3, состоит ещё и в том, что транзистор здесь включён не как истоковый повторитель, а как усилитель напряжения. Кроме того, применение ОУ во много раз увеличивает точность поддержания выходного напряжения. Аналогичным образом построена схема фильтра напряжения отрицательной полярности (см. рис. 4).

## СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПРЕВЫШЕНИЯ ТОКА

Стабилизаторы, изготовленные по схемам, приведённым на рисунке 2, обеспечивают размах пульсаций выходного напряжения 1,5...2 мВ при выходном токе до 10 А. Однако, как указывалось в статье «Импульсный ИП со стабилизированным выходом и низким уровнем пульсаций» [1], эти стабилизаторы обладают существенным недостатком – они беззащитны перед превышением тока и, в частности, коротким замыканием.

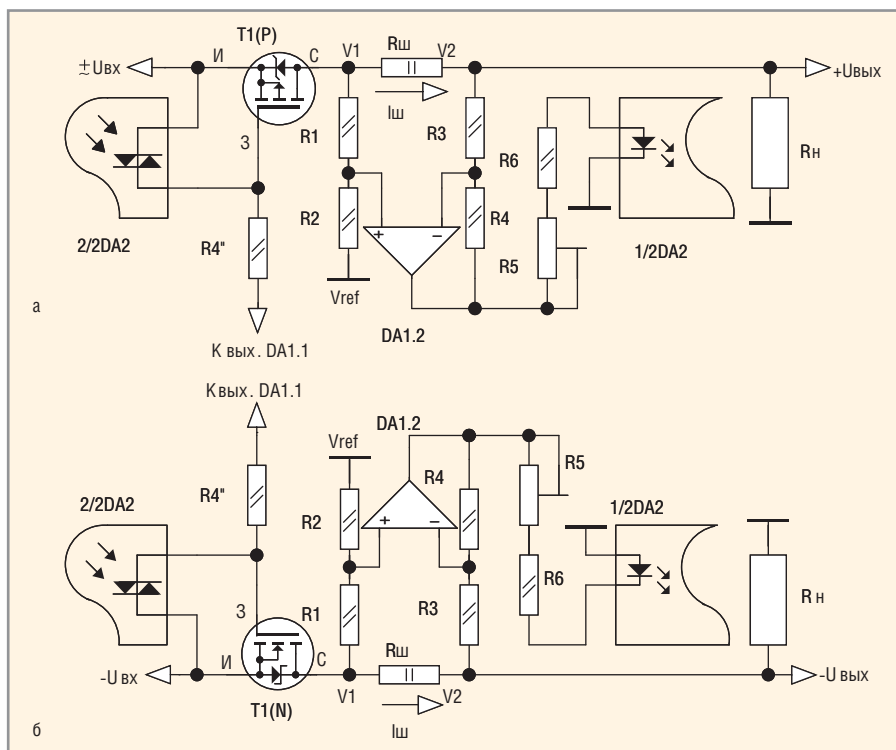


Рис. 5. Упрощённые схемы защиты от превышения тока: а – для напряжения положительной полярности; б – для напряжения отрицательной полярности

Посмотрим, как будет себя вести стабилизатор положительной полярности (см. рис. 2а), если ток нагрузки превысит определённый уровень (например, 10 А). Пусть нагрузка такова, что через стабилизатор проходит ток в 10 А. При подключении дополнительной нагрузки выходное напряжение опять начнёт падать, вследствие чего транзистор будет приоткрываться, чтобы поднять выходное напряжение. Это открытие может продолжаться вплоть до максимального тока, который способен пропустить транзистор. Например, для Р-канального транзистора IRF4905 с максимальным током стока в 75 А ток и 30 А, и 70 А является рабочим. Однако такой ток может легко разрушить выпрямительные диоды и сжечь трансформатор. Как можно догадаться, схемы фильтров, представленные на рисунках 3 и 4, обладают аналогичным недостатком.

Поэтому было решено сделать схему защиты от превышения тока на базе второго ОУ, входящего в состав микросхемы DA1 (см. рис. 3 и 4), то есть на DA1.2. Упрощённые схемы защиты для фильтров положительной и отрицательной полярности, соответственно, приведены на рисунках 5а и 5б.

Рассмотрим схему на рисунке 5а. Она состоит из измерительной части, собранной на ОУ DA1.2, четырёх резисторах R1–R4 и шунта Rш, и управляю-

щей, собранной на резисторах R5, R6 и симметричном оптотиристоре DA2.

Для измерения тока используется шунт – резистор номиналом 0,005 Ом и мощностью 2 Вт. При токе через шунт  $I_{ш} = 10$  А падение напряжения будет составлять  $0,005 \text{ Ом} \times 10 \text{ А} = 0,05 \text{ В}$ . ОУ включён по классической схеме дифференциального усилителя с привязкой выходного напряжения к «земле» [4]. При равенстве резисторов  $R1 = R3 = 100 \text{ Ом}$  и  $R2 = R4 = 10 \text{ кОм}$ ,  $U_{вых} = 0,05 \text{ В} \times 10 \text{ кОм} / 0,1 \text{ кОм} = 5 \text{ В}$ , то есть ОУ усиливает падение напряжения на шунте в 100 раз и привязывает его к «земле».

В управляющей части схемы инфракрасный светодиод оптрона подключён к выходному напряжению ОУ через резисторы R5 и R6, а симистор – между затвором и истоком транзистора T1. Симисторный оптрон, в отличие от транзисторного, обладает триггерным эффектом, то есть после установки триггера и пропадания инфракрасного излучения триггер может оставаться в проводящем состоянии неограниченное время, если через симистор идёт ток. Сброс триггера возможен только при снятии напряжения с выводов симистора.

При соответствующей настройке R5, как только выходной ток достигнет 10 А, выходное напряжение ОУ станет равным 5 В, загорится светодиод оптрона, включится оптосимистор и сво-

ими выводами замкнёт затвор транзистора на исток. Транзистор закроется, и выходное напряжение упадёт до 0,2...0,4 В. Для приведения схемы в исходное состояние (Reset) необходимо снять входное напряжение, то есть выключить БП и снова включить.

Применение ОУ с дифференциальным входом [4] позволяет довольно точно измерить ток и при этом использовать токоизмерительный резистор номиналом 0,005 Ом. При токе 10 А мощность, рассеиваемая на таком резисторе, составит всего 0,5 Вт, поэтому использованный резистор для поверхностного монтажа размера 2512 (LR2512-22R005F4) мощностью в 2 Вт имеет четырёхкратный запас по мощности при малых габаритах.

Упрощённая схема защиты от превышения тока для отрицательного напряжения (см. рис. 5б) действует аналогичным образом. Её отличие от предыдущей (см. рис. 5а) – в использовании транзистора противоположной полярности (N) и ОУ другого типа.

## ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ СХЕМЫ УСТРОЙСТВ

Если объединить схему, приведённую на рисунке 3, со схемой, изображённой на рисунке 5а, получится активный фильтр положительного напряжения с функцией защиты от превышения тока, то есть два устройства в одном (см. рис. 6). Керамические и танталовые конденсаторы C1, C2, C4, C5, C6 и C7 снижают уровень пульсаций и дополнительно предохраняют ОУ от самовозбуждения. Конденсаторы C10 и C3 устраняют самовозбуждение ОУ на частотах около 200 кГц. Светодиод LED1, включённый последовательно с симистором DA1, индицирует аварийный режим, то есть состояние, в которое переключился симисторный триггер после превышения тока 10 А.

Поскольку выпрямительная схема для положительного напряжения содержит два выпрямительных диода и два конденсатора по 10 000 мкФ каждый, то в аварийном режиме, когда нагрузка отключена от входного напряжения, эти конденсаторы будут разряжаться около 3–4 минут после отключения БП от сети и своим напряжением поддерживать включённое состояние триггера и горение светодиода LED1. Когда конденсаторы разрядятся, триггер сбросится и светодиод потухнет, можно заново включать БП. Для ускорения разряда конденсаторов до нескольких секунд

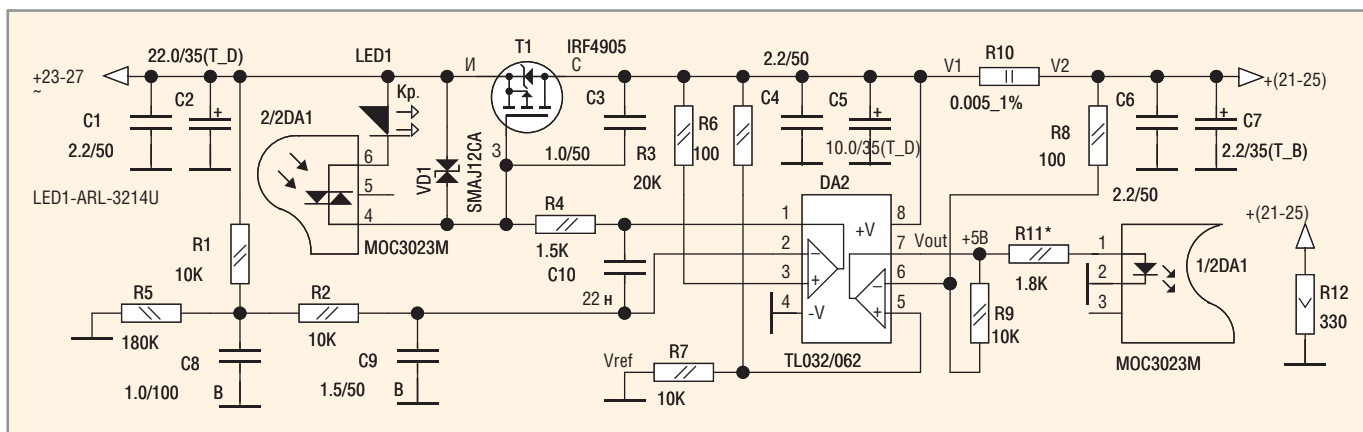


Рис. 6. Принципиальная схема активного фильтра положительного напряжения с защитой от превышения тока

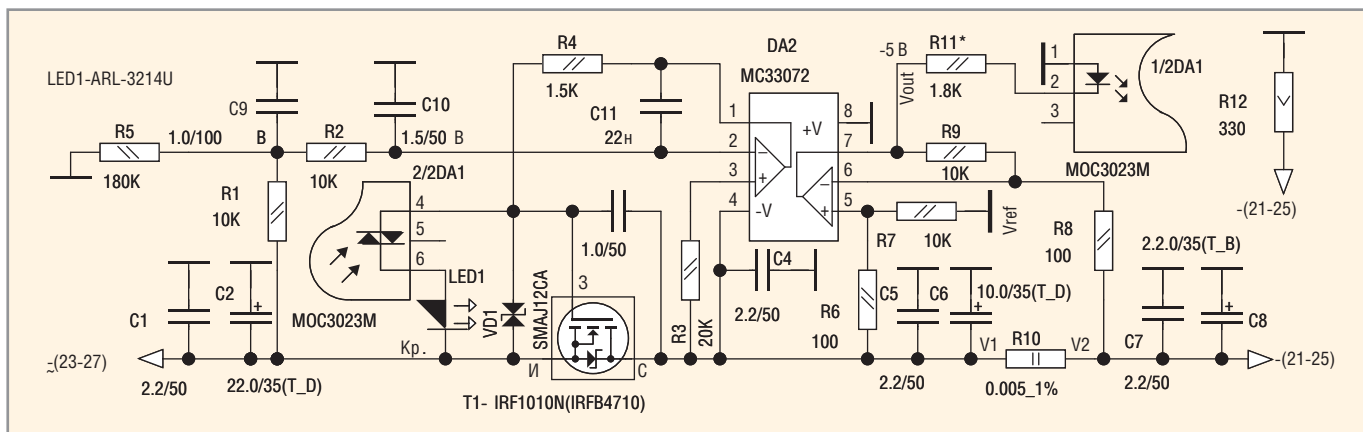


Рис. 7. Принципиальная схема активного фильтра отрицательного напряжения с защитой от превышения тока

можно предусмотреть принудительный разряд конденсаторов с помощью кнопки и резистора 50–100 Ом, подключённых к выходному напряжению конденсаторов и «земле».

Супрессор VD1 предохраняет затвор транзистора от перенапряжения в момент включения устройства. Резисторы R5 и R6 (см. рис. 5а) после соответствующей настройки заменены одним резистором R11\* (см. рис. 6). Резистор R12 определяет минимальный ток, который требуется для полноценной работы устройства при отсутствии нагрузки. В качестве ОУ используется микросхема сдвоенного ОУ TL062 или её улучшенный аналог TL032. Отличительное свойство этих ОУ – они способны воспринимать входное напряжение вплоть до положительного напряжения питания +V (и даже выше его на 1...3 В). Поэтому напряжения, поступающие на входы ОУ с резисторов R3, R6 и R8, для такого типа ОУ являются рабочими. ОУ питается (+V) от выходного напряжения с низким уровнем пульсаций, что дополнительно снижает уровень пульсаций выходного напряжения.

Если объединить схемы, приведённые на рисунках 4 и 5б, получится активный фильтр отрицательного

напряжения с защитой от превышения тока (см. рис. 7). В схеме использован другой ОУ – MC33072, способный воспринимать входное отрицательное напряжение вплоть до  $-V$  и даже ниже на 0,3 В. Минимальное напряжение, которое может быть подано на входы TL032/062, должно быть выше  $-V$ , по крайней мере, на 1,5 В. В свою очередь, максимальное положительное напряжение, поданное на входы ОУ MC33072, должно быть ниже максимального напряжения питания +V, по крайней мере, на 1,5 В.

Дополнительный конденсатор C4, подключённый к выводу  $-V$  DA2, служит для дополнительного уменьшения пульсаций выходного напряжения. ОУ также питается от отрицательного выходного напряжения ( $-V$ ), что способствует дополнительному уменьшению уровня пульсаций выходного напряжения. Всё остальное, сказанное про предыдущую схему, справедливо и для схемы, изображённой на рисунке 7.

Эквивалентная постоянная времени  $\tau$  двух RC-цепочек, например, R1C8 и R2C9 в схеме, показанной на рисунке 6, составляет около 0,08 с. Для обеспечения такой постоянной времени с учётом внутреннего сопротивления

вторичной обмотки трансформатора и сопротивления выпрямительных диодов понадобится ёмкость сглаживающих конденсаторов в районе 500 000 мкФ (или 0,5 Ф).

Увеличивать эту постоянную времени не рекомендуется, так как при скачкообразном изменении входного напряжения или сопротивления нагрузки конденсаторы, определяющие постоянную времени, могут не успеть разрядиться (или зарядиться) до нужного уровня, что приведёт к проникновению пульсационной составляющей в выходное напряжение фильтра.

## Разводка печатных плат и фотографии устройств

Разводка плат устройств сделана с помощью программы Sprint Layout 6.0. Изготовление плат и их фотошаблонов вкратце описано в статье «Импульсный ИП со стабилизированным выходом и низким уровнем пульсаций» [1].

Вариант разводки платы фильтра положительного напряжения (см. рис. 8) имеет небольшие размеры (17 × 28 мм). Синим цветом показаны компоненты, расположенные со стороны дорожек, зелёным – с обратной стороны, чёрным – расположен-

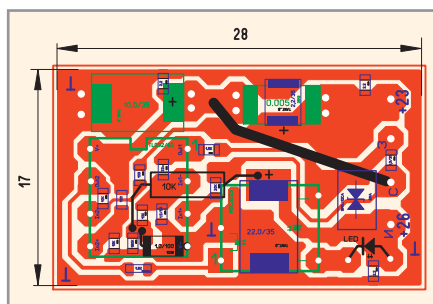


Рис. 8. Вариант разводки платы фильтра положительного напряжения

ные со стороны дорожек, но укрепленные навесным монтажом (резистор R1 номиналом 10 кОм и конденсатор C8 номиналом 1,0 мкФ / 100 В).

Резистор R12 укреплен на карболитовом четырехконтактном клеммнике ПС12-4, к клеммам которого также припаяны два провода (белого цвета) непосредственно от стока и истока транзистора (см. рис. 9а). Эти провода должны иметь сечение не менее 1–1,5 мм<sup>2</sup>. К соответствующим контактам клеммника также припаян «земляной» провод от платы марки МГТФ. На обратной стороне платы виден токоизмерительный резистор, к которому с двух сторон припаяны скобы из медного одножильного провода диаметром 0,7 мм. Каждая скоба пропущена через два отверстия в плате и припаяна к соответствующим дорожкам. Аналогичным образом укреплен танталовый конденсатор 10 мкФ / 35 В, расположенный рядом с микросхемой ОУ. У оптрона неиспользуемые выводы (3 и 5) удалены. Сток транзистора соединен с соответствующим контактом токоизмерительного резистора проводом сечением не менее 1...1,5 мм<sup>2</sup>.

Плата фильтра отрицательного напряжения получилась такого же размера (см. рис. 10). Внешне фотографии фильтра отрицательного напряжения мало отличаются от фильтра положительного напряжения, поэтому не станем их приводить.

### ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВ

Проверка работы устройств проводилась путём подключения к их выходам двух мощных резисторов номиналом 5 Ом и одного резистора номиналом 10 Ом. При подключении резистора 10 Ом выходное напряжение соответствовало примерно 25 В, что даёт ток около 2,5 А. При подключении резистора 5 Ом выходное напряжение падало до 23 В, что даёт ток около 4,6 А. При параллельном подключении двух резисторов по 5 Ом напряжение снижалось

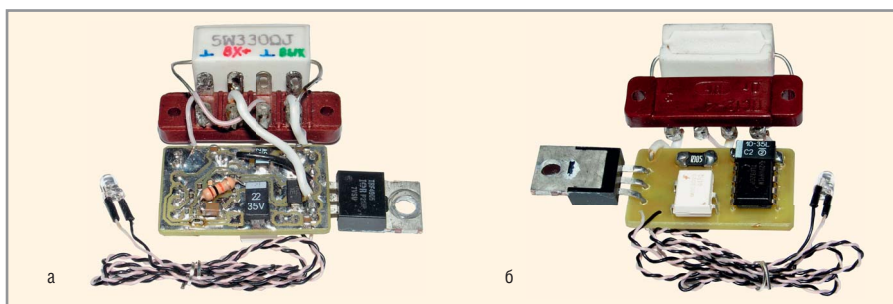


Рис. 9. Фотография устройства фильтра положительного напряжения: а – вид со стороны расположения дорожек; б – вид с обратной стороны

до 21,5 В, что даёт ток 8,6 А. При параллельном подключении всех трёх резисторов (общее сопротивление 2 Ом) выходное напряжение снижалось примерно до 20 В, что даёт ток 10 А. Этот режим использовался для проверки функционирования защиты по току.

При тестировании наблюдались осциллограммы входного и выходного напряжений, подключённых к входам двухканального цифрового осциллографа. При этом входы осциллографа были переключены в режим измерения переменного напряжения (АС), чтобы можно было сравнивать размах пульсаций входного и выходного напряжений устройств. Одна из осциллограмм, соответствующая работе фильтра положительного напряжения при токе 8,6 А, приведена на рисунке 11.

Осциллограмма жёлтого цвета (1 канал) соответствует входному напряжению, цвета морской волны (2 канал) – выходному напряжению. Фиолетовым цветом показан спектр входного напряжения, полученный с помощью БПФ. Вертикальное разрешение для входного напряжения составляет 0,5 В/деление («500 mV» на осциллограмме), для выходного напряжения – 20 мВ/деление («20 mV»), горизонтальная развёртка составляет 2 мс/деление («Time 2.000 mS»). Разрешение по частоте составляет 125 Гц/деление («125.0 Hz/div»).

На экран осциллографа выведены размах пульсаций входного напряжения («Vpp(1) = 1.24 V»), размах пульсаций выходного напряжения («Vpp(2) = 50.4 mV») и измеренная частота пульсаций входного напряжения («Freq(1) = 99.60 Hz»). На осциллограмме видно, что размах пульсаций выходного напряжения (≈50 мВ = 0,05 В) меньше размаха пульсаций входного напряжения (≈1,25 В) в 1,25 В / 0,05 В = 25 раз. Если считать относительную погрешность выходной пульсационной составляющей 50 мВ относительно напряжения питания, то она составляет 0,05 В /

21,5 В = 0,00233 или 0,233% ≈ 0,25%. Форма осциллограммы пульсаций входного напряжения близка к пилообразной (или треугольной). Этот вывод будет использован далее. В спектре сигнала входного напряжения основная гармоника соответствует примерно 100 Гц, однако имеется гармоника 200 Гц (с меньшим весовым коэффициентом) и гармоника 350 Гц с ещё меньшим весовым коэффициентом. Также можно отметить 50-герцовую составляющую.

В форме выходного напряжения можно заметить верхнюю (положительную) часть синусоиды и двугорбую кривую рядом с ней. Такая форма напряжения возникает, когда с помощью резистора R3 (см. рис. 3) настраивается выходное напряжение фильтра. Если, например, R3 = 150 кОм, то форма пульсаций выходного напряжения близка к синусоиде, а абсолютное значение выходного напряжения на 1,5...2 В ниже минимального входного напряжения (то есть ниже его среднего значения минус отрицательная амплитуда пульсационной составляющей [1]). При этом транзистор рассеивает мощность, равную проходящему току, умноженному на эти 1,5...2 В (при токе 8,6 А энергия составляет 8,6 А × 2 В = 17,2 Вт), поэтому сильно нагревается. По мере увеличения R3 в середине синусоиды возникает горб, амплитуда которого увеличивается, а выходное напряжение возрастает. При равенстве выходного напряжения входному минус амплитуда пульсаций (при R3 = 180 кОм, это R5 на рисунке б), форма пульсаций становится такой же, как на рисунке 11, и транзистор рассеивает только энергию пульсационной составляющей входного напряжения.

Как известно, действующее значение пилообразного (или треугольного) сигнала, как на рисунке 11 (жёлтый), меньше его амплитудного значения в  $\sqrt{3}$  раз. Если размах пульсаций входного напряжения составляет 1,25 В (см. рис. 11), то его амплитуда будет в два раза меньше.

То есть  $1,25 \text{ В} / 2 = 0,625 \text{ В}$ . А действующее значение ещё в  $\sqrt{3}$  раз меньше. То есть  $0,625 \text{ В} / \sqrt{3} \approx 0,36 \text{ В}$ . При токе  $8,6 \text{ А}$  транзистор будет рассеивать энергию, равную всего  $8,6 \text{ А} \times 0,36 \text{ В} \approx 3 \text{ Вт}$ .

Таким образом, активный фильтр рассеивает очень мало энергии, так как пропускает на выход только постоянную составляющую, а пульсационную рассеивает в виде тепла.

### ФИЛЬТР ПЛЮС СТАБИЛИЗАТОР В ОДНОМ УСТРОЙСТВЕ НА БАЗЕ ЧЕТЫРЁХКАНАЛЬНОГО ОУ ADA4096-4

В 2011 году компания Analog Devices представила четырёхканальный Rail-In Rail-Out ОУ ADA4096-4. Этот ОУ воспринимает (Rail-In) и воспроизводит (Rail-Out) сигналы, равные положительному (+V) и отрицательному (-V) напряжению питания, максимальное значение которого (+V - (-V)) составляет 36 В. ОУ специально сконструирован для использования в различных зарядных устройствах и БП. ОУ имеет и двухканальную версию (ADA4096-2). Высокие технические характеристики, малый размер, сравнительно невысокая

цена и доступность ADA4096-4 позволили сконструировать и проверить на практике работу этого ОУ в устройстве, сочетающем в себе и фильтр, и стабилизатор (см. рис. 12).

В схеме применён относительно новый оптронный тиристор FODM3053 (DA2) в корпусе Mini-Flat-4 размером  $7 \times 4 \text{ мм}$  для поверхностного монтажа. Пороговый ток, при котором зажигается светодиод оптрона (5 мА), точно такой же, как и в применённом оптроне MOC3023M (DA1, см. рис. 6). Поэтому и номинал резистора R12\* (1,8 кОм, см. рис. 13) такой же, как номинал резистора R11\* (см. рис. 6).

В качестве шунта использован резистор R11 номиналом 0,01 Ом, который в два раза больше номинала резистора R10 (0,005 Ом, см. рис. 6), поэтому номиналы резисторов R8 и R10 по сравнению с номиналами резисторов R7 и R9 (10 кОм, см. рис. 7) уменьшены в два раза – до 5 кОм (точнее до 4,99 кОм).

Подстроечный резистор R2 служит для более точной настройки напряжения в точке соединения C4 и R4, что позволяет выставить максимум первого горба (см. рис. 11) вровень с максимумом

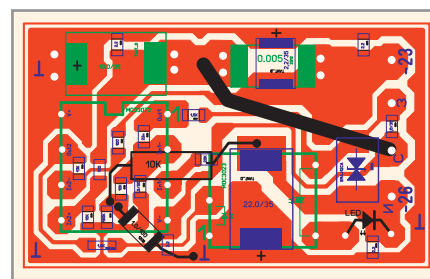


Рис. 10. Вариант разводки платы фильтра отрицательного напряжения

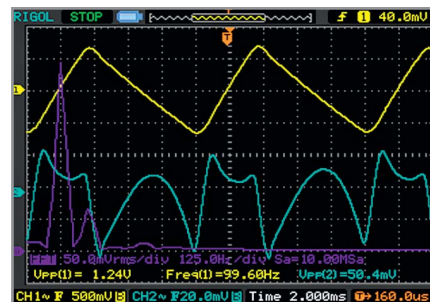


Рис. 11. Осциллограммы входного и выходного напряжения фильтра положительного напряжения при токе 8,6 А

мом полусинусоиды и уменьшить нижний минимум до минимума полусинусоиды и, таким образом, немного снизить максимальный размах пульсаций.

## МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

**Vin 85-265 VAC**

*LinkSwitch до 9 Вт*

*TinySwitch до 36 Вт*

*TOPSwitch до 300 Вт*

**Vin 16-75 VDC**

*DPA-Switch*

www.platan.ru

**ПЛАТАН**

Офисы в Москве: м. Молодежная, ул. Ивана Франко, 40, стр. 2, (495) 97 000 99, info@platan.ru;  
м. Электrozаводская, ул. Б. Семеновская, 40, стр. 26, БЦ Агат, (495) 744 70 70, platan@platan.ru  
Офис в Санкт-Петербурге: ул. Зверинская, 44, (812) 232 88 36, baltika@platan.spb.ru

Реклама

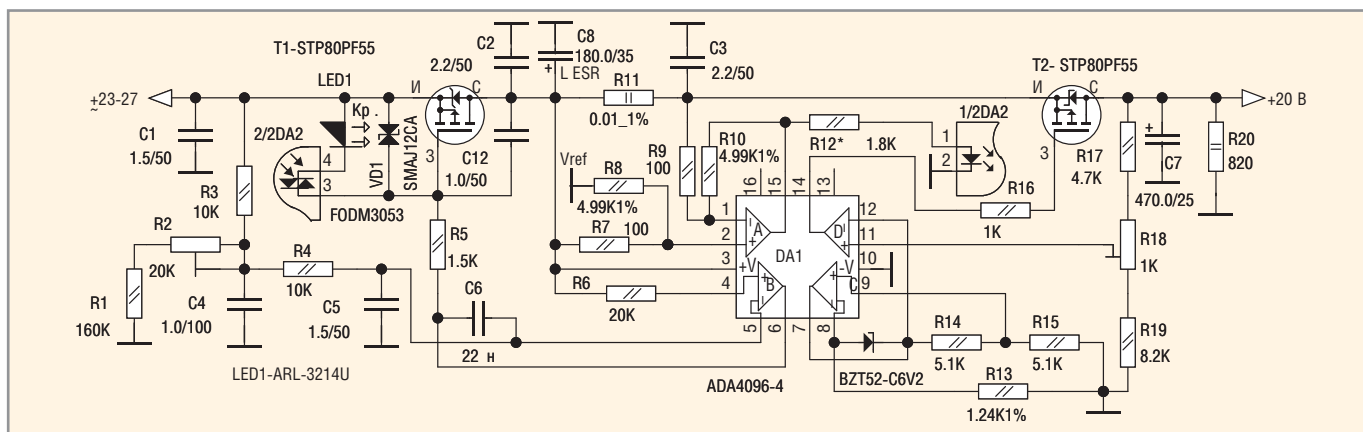


Рис. 12. Принципиальная схема фильтра и стабилизатора положительного напряжения в одном устройстве на базе ОУ ADA4096-4

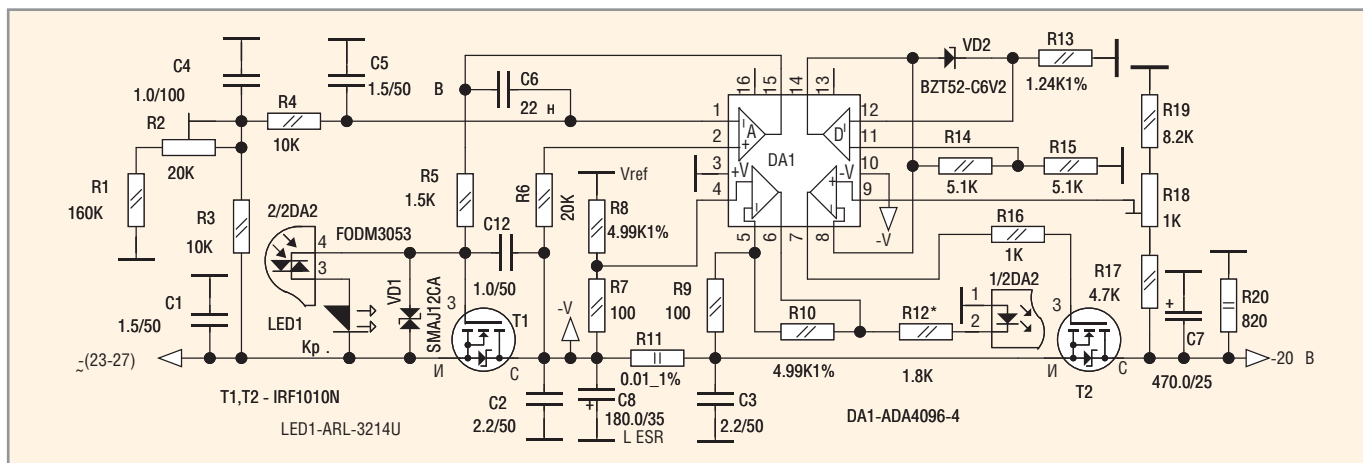


Рис. 13. Принципиальная схема фильтра и стабилизатора отрицательного напряжения в одном устройстве на базе ОУ ADA4096-4

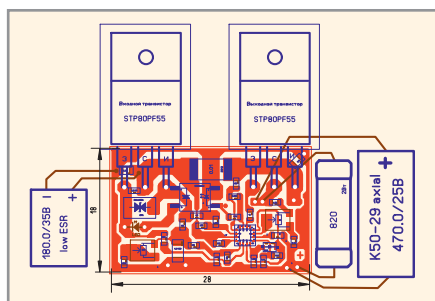


Рис. 14. Вариант разводки фильтра и стабилизатора положительного напряжения

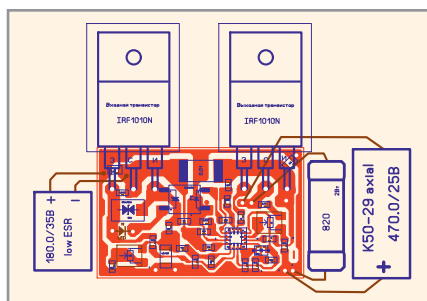


Рис. 15. Вариант разводки фильтра и стабилизатора отрицательного напряжения

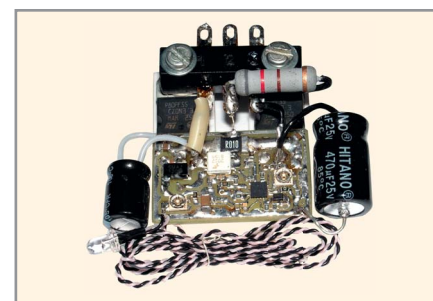


Рис. 16. Фотография фильтра и стабилизатора положительного напряжения

В схеме использован более мощный транзистор STP80PF55, имеющий меньшее сопротивление в открытом состоянии, чем транзистор IRF4905 (T1, см. рис. 6), – 18 мОм против 20 мОм, большой максимальный ток (80 А против 74 А), большую крутизну (32 А/В против 21 А/В). Этот транзистор открывается раньше, чем транзистор IRF4905, то есть при меньшем (по абсолютному значению) напряжении между затвором и истоком. Это означает, что ОУ должен подать на затвор напряжение более близкое к напряжению питания.

ОУ TL032/062 (DA2, см. рис. 7) на это не способен, так как он может выдавать максимальное напряжение меньше напряжения питания (+V), по край-

ней мере, на 1–1,5 В. В связи с этим, при использовании транзистора STP80PF55 совместно с ОУ TL032/062 при малых токах нагрузки возникает ВЧ-генерация, убрать которую невозможно.

Использование ОУ ADA4096 (Rail-Out) снимает эту проблему.

В связи с меньшим напряжением между затвором и истоком, требующимся для открытия транзистора STP80PF55, чем транзистора IRF4905, светодиод LED1 с токоограничительным резистором номиналом 20 кОм можно подключить между стоком и истоком T1, а оптосимистор – между затвором и истоком T1. Это относится и к схеме фильтра и стабилизатора отрицатель-

ного напряжения (см. далее). Защита от превышения тока срабатывает при токе 10 А.

Устройство, собранное по схеме, изображённой на рисунке 12, показало идеальную работу. Максимальный размах пульсаций выходного напряжения составляет меньше 1 мВ при токе 10 А (такой режим работы был искусственно создан с помощью отключения защиты). Падение напряжения (между истоком и стоком T2) при токе 10 А составляет не более 0,1 В. Снижение выходного напряжения в зависимости от тока нагрузки составляет не более 5 мВ/А, то есть, если выставить выходное напряжение без нагрузки равным 20,05 В, то при токе 10 А оно снизится до 20,00 В.

Схема фильтра и стабилизатора для отрицательного напряжения (см. рис. 13) составлена из схем, приведённых на рисунках 26 и 7. Изменены полярности включения светодиода LED1, инфракрасного светодиода оптрона (выводы 1 и 2 DA2), стабилизатора VD2 и электролитических конденсаторов C7 и C8. Изменено включение питания ОУ DA1: теперь +V (вывод 3) подключено к «земле», а -V (десятый вывод) – к стоку T1. В схеме использованы полевые транзисторы противоположной полярности (IRF1010N). Всё остальное осталось без изменений. Выходные параметры работы схемы, показанной на рисунке 13, практически не отличаются от выходных параметров работы схемы, изображённой на рисунке 12. Разводка обеих схем показала, что каждую из них можно разместить на плате размером 18 × 28 мм (см. рис. 14 и 15, соответственно).

Фотография готового фильтра и стабилизатора положительного напряжения (см. рис. 16) приведена только с одной стороны, так как с обратной стороны плат ничего нет. В качестве каркаса всего устройства использованы трёх-

контактные клеммники 3ПС5-3 из карболита. Расстояния между центрами отверстий металлических оснований транзисторов выбрано с учётом расстояний между центрами отверстий клеммников (20 мм), что позволяет обойтись для закрепления конструкции всего двумя винтами. Транзисторы прикрепляются к радиатору через керамические теплопроводящие прокладки с использованием изолирующих втулок и теплопроводной пасты. Электролитические конденсаторы припаяны к самой плате, а мощный резистор R20 (см. рис. 16) – к клеммнику. Исток входного транзистора и сток выходного соединяются с соответствующими контактами клеммника проводом МС16-13 сечением 1–1,5 мм<sup>2</sup>. «Земля» платы соединяется с земляным (центральным) контактом клеммника одной из жил такого же провода, поскольку потребление тока платой составляет не более 50 мА (с учётом резистора R20).

Таким образом, применение ОУ ADA4096 значительно уменьшает габариты плат и позволяет использовать практически любые полевые транзисторы (в том числе более мощные).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение фильтров положительного и отрицательного напряжений, сконструированных на основе мощных полевых транзисторов и ОУ, позволяет решить проблему подавления пульсаций выпрямленного и сглаженного электролитическими конденсаторами напряжения вторичной обмотки сетевого трансформатора. Защита от превышения тока, в том числе и от короткого замыкания, позволяет повысить безопасность и надёжность работы БП, а также предохранить нагрузку от разрушения большим током.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминов А. Импульсный ИП со стабилизированным выходом и низким уровнем пульсаций. Современная электроника. 2015. № 4–6.
2. Кузьминов А. Использование мощных полевых транзисторов и операционных усилителей в прецизионных регуляторах и стабилизаторах напряжения. Современная электроника. 2012. №7.
3. Рутковски Дж. Интегральные операционные усилители. Мир. 1978.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Мир. 1993.



www.jtaglive.ru



## Пугают цены на системы периферийного сканирования?



- Buzz
- BuzzPlus
- AutoBuzz
- Clip
- Script
- Плееры JAM/STAPL/SVF
- JTAG Live Controller

Реклама

Представительство JTAG Technologies в России  
Телефон: (812) 313-9159  
E-mail: russia@jtag.com

Эксклюзивный дистрибьютор: ООО Предприятие Остек  
Телефон: (495) 788-4444  
E-mail: info@ostec-group.ru