

Использование мощных полевых транзисторов и операционных усилителей в прецизионных регуляторах и стабилизаторах напряжения

Алексей Кузьминов (Москва)

В статье приведены схемы и рисунки печатных плат регулятора напряжения 0...2,5 В на базе ИОУ ОРА735 и полевого транзистора FDD6530A, стабилизатора напряжения +5 В на базе ИОУ ОРА735 и полевого транзистора IRF4905 и стабилизаторов напряжения ± 25 В с использованием мощных полевых транзисторов (IRF4905 и IRF3205) и ИОУ TCA0372 и TL062/072/082. По сравнению с интегральными стабилизаторами напряжения, описанные в статье устройства отличаются низким падением напряжения (0,1...0,15 В) при токах до 4 А и малым уровнем пульсаций (1...2 мВ).

ВВЕДЕНИЕ

Линейные стабилизаторы напряжения с мощными полевыми транзисторами в качестве регулирующих элементов сейчас не являются редкостью, однако почти все они реализованы на дискретных компонентах. В таких стабилизаторах мощный полевой транзистор имеет преимущество над мощным биполярным транзистором, поскольку практически не потребляет ток по цепи управления (затвора). Применение ИОУ обеспечивает высокую точность регулирования выходного напряжения. Однако использование интегральных операционных усилителей (ИОУ) для управления мощными полевыми транзисторами в стабилизаторах напряжения имеет некоторые особенности.

Ниже будут кратко рассмотрены принципы построения стабилизаторов на базе мощных полевых транзисторов и ИОУ, схемы формирования опорного напряжения и приведены

практические схемы стабилизаторов и рисунки печатных плат.

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СТАБИЛИЗАТОРОВ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Стандартная схема стабилизатора положительной полярности на базе N-канального полевого транзистора (см. рис. 1а) хорошо известна. Её основной недостаток заключается в том, что для открытия N-канального полевого транзистора на его затвор требуется подать напряжение, превышающее напряжение истока на 1,5...5 В. Для построения стабилизатора с низким падением напряжения между стоком и истоком, это дополнительное напряжение должно превышать и напряжение стока, т.е. входное напряжение $U_{вх}$, что вызывает усложнение схемы и конструкции стабилизатора.

Необходимое напряжение можно получить либо от дополнительной

обмотки силового трансформатора, либо путём использования в мостовом выпрямителе отдельных диодов и конденсаторов для удвоения выпрямленного напряжения, либо с помощью отдельного высокочастотного преобразователя, построенного по так называемой схеме накачки заряда (charge pump). Так, например, работает стабилизатор +3В TPS73133 фирмы Texas Instruments (см. рис. 2а). Хотя подобная схема используется в некоторых современных интегральных стабилизаторах, она не получила широкого распространения.

Схема стабилизатора напряжения положительной полярности на базе P-канального полевого транзистора (см. рис. 1б) является более распространённой, однако, как правило, она строится на дискретных элементах. Подобная схема на ИОУ (см. рис. 1в) используется в интегральном стабилизаторе MC78LC00 (см. рис. 2б), который впервые выпустила фирма Motorola, а впоследствии стала выпускать и фирма On Semiconductor.

Принцип работы этой схемы (см. рис. 1в) заключается в следующем. Для открытия P-канального полевого транзистора необходимо, чтобы напряжение на его затворе было ниже напряжения на истоке (т.е. входного напряжения) на 1,5...5 В, поэтому потенциал затвора должен находиться в пределах входного напряжения, что

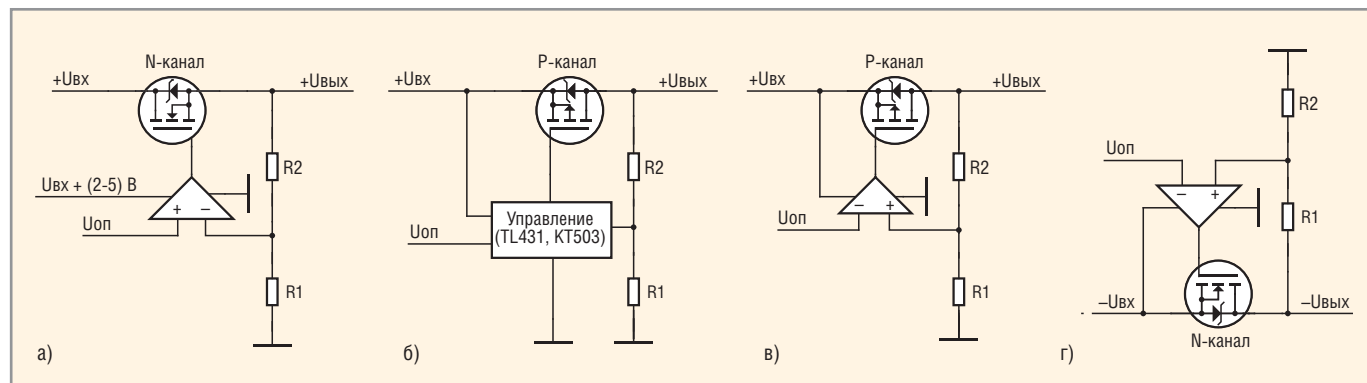


Рис. 1. Структурные схемы стабилизаторов напряжения на полевых транзисторах

а – стандартная схема на ИОУ, б – схема на дискретных элементах [1], в, г – схемы на ИОУ с низким падением напряжения, не требующие дополнительного источника питания

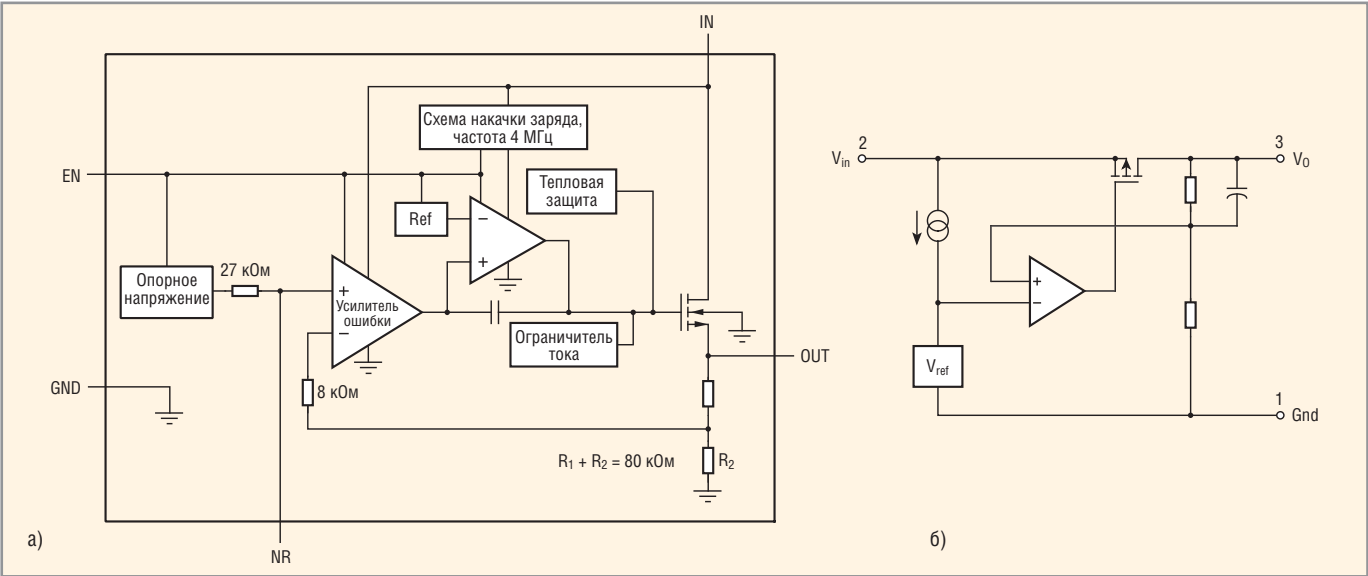


Рис. 2. Структурная схема стабилизаторов +3 В TPS73133 (а) и +5 В MC78LC50 (б)

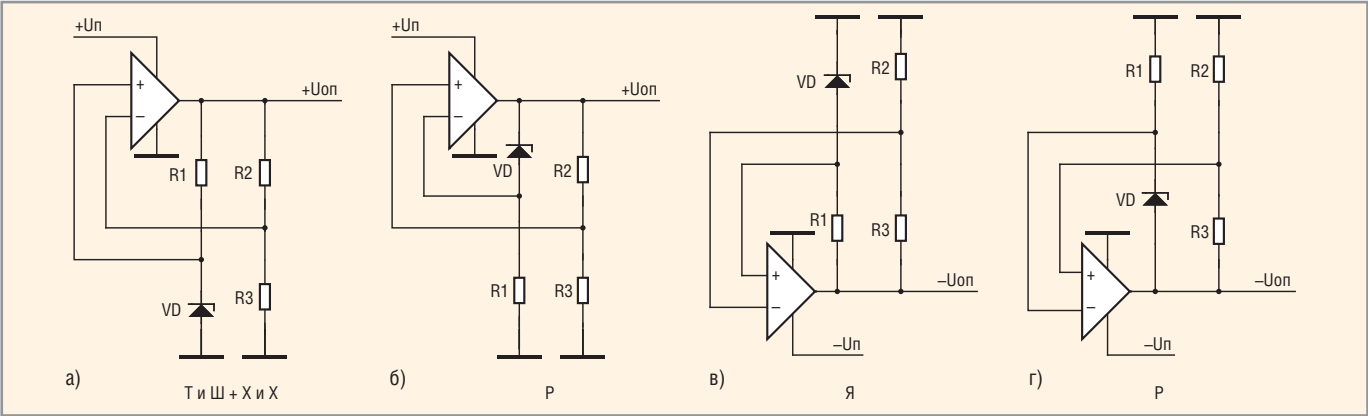


Рис. 3. Структурные схемы источников положительного (а, б) и отрицательного (в, г) опорных напряжений на стабилизаторах и ИОУ

а – [3, 4], б – [2], в – оригинальная, г – [2]

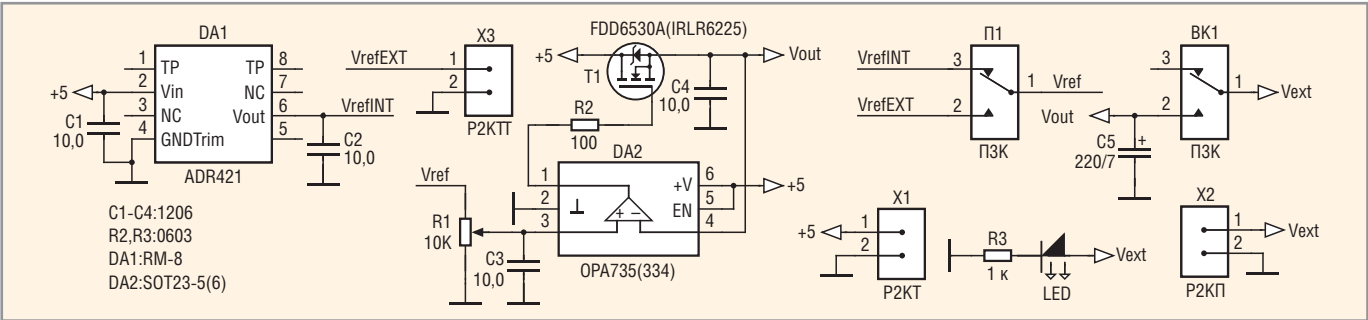


Рис. 4. Схема прецизионного регулятора напряжения 0...2,5 В

является преимуществом по сравнению со схемой на N-канальном транзисторе (см. рис. 1а). При уменьшении выходного напряжения под нагрузкой уменьшается и напряжение в точке соединения резисторов R1 и R2 (см. рис. 1в). Поскольку это напряжение подано на неинвертирующий вход ИОУ, выходное напряжение ИОУ (и, соответственно, потенциал затвора транзистора) будет уменьшаться, что приведёт к тому, что Р-канальный транзистор будет приоткрываться, в результате чего выходное напряжение

восстановится до прежнего уровня. Схема рис. 1в может быть легко трансформирована в стабилизатор отрицательного

напряжения на базе N-канального полевого транзистора (см. рис. 1г).

Электрические характеристики стабилизаторов серии BZX55 при $T_A = 25^\circ\text{C}$

Тип $y = C$ для 5% $y = B$ для 2%	Динамическое сопротивление при $f = 1 \text{ кГц}$, Ом		ТКН при $I_{CT} = 5 \text{ мА}$, %/°C	
	$I_{CT} = 5 \text{ мА}$	$I_{CT} = 1 \text{ мА}$	Мин.	Макс.
BZX55 – у5V6	<25	<450	–0,01	+0,06
BZX55 – у6V2	<10	<200	0	+0,07
BZX55 – у6V8	<8	<150	+0,01	+0,08
BZX55 – у7V5	<7	<50	+0,01	+0,09
BZX55 – у8V2	<7	<50	+0,01	+0,09
BZX55 – у9V1	<10	<50	+0,02	+0,10

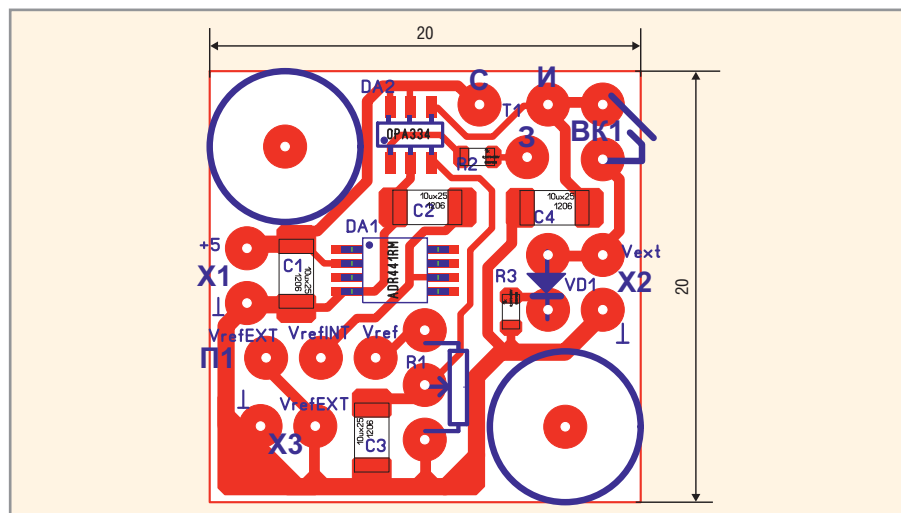


Рис. 5. Плата регулятора напряжения 0...2,5 В

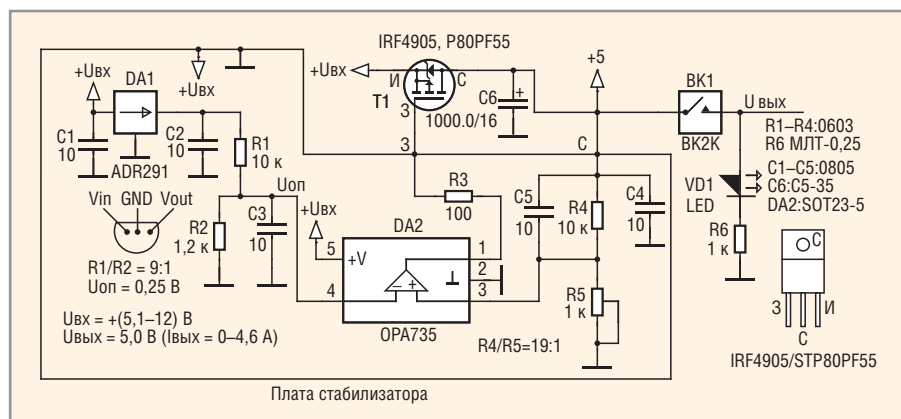


Рис. 6. Схема прецизионного стабилизатора напряжения +5 В

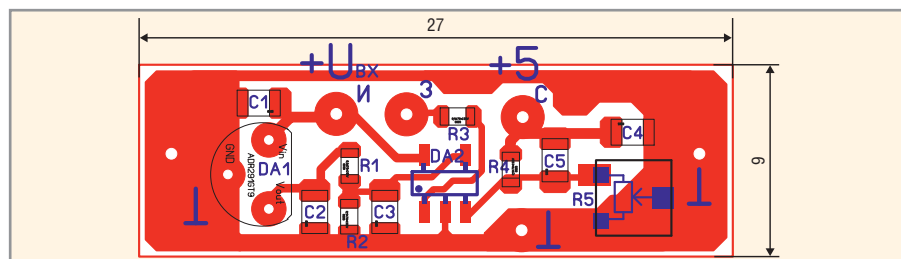


Рис. 7. Плата стабилизатора +5 В

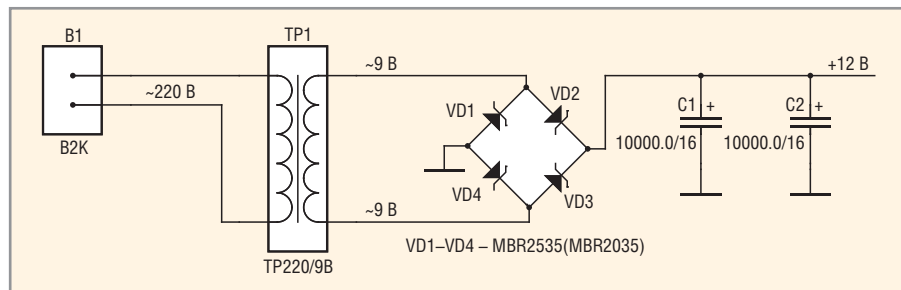


Рис. 8. Схема выпрямителя для стабилизатора +5 В

Источники опорного напряжения на базе стабилизаторов и ИОУ

Поскольку микросхемы ИОУ TCA0372 и TL062/72/082 содержат два независимых ИОУ, для получения положительного или отрицательного опорного напряжения имеет смысл использо-

вать один из них (см. рис. 3). Коэффициент стабилизации в подобных схемах достигает порядка 10 000, т.е. если изменение входного напряжения $U_{\text{вх}}$ составит 10 В, то изменение выходного напряжения, использующегося как опорное ($U_{\text{оп}}$), не превысит 1 мВ [3]. ИОУ включен либо как неинвертирую-

щий (см. рис. 3а, 3в), либо как инвертирующий (см. рис. 3б, 3г), и его стабильное выходное напряжение используется для получения прецизионного тока стабилизатора. Это напряжение в дальнейшем используется в качестве опорного ($\pm U_{\text{оп}}$).

Если для получения опорного напряжения, например, 15 В использовать стабилизатор BZX55C7V5, который обеспечивает стабильное напряжение 7,5 В при токе 5 мА, то резистор R1 должен иметь номинал $(15 \dots 7,5 \text{ В}) / 5 \text{ мА} = 1,5 \text{ кОм}$, а резисторы R2 и R3 должны быть равны между собой, тогда в точке их соединения напряжение будет также равно 7,5 В; при этом схема автоматически запускается после подачи напряжения питания. Номинал резисторов зависит от максимального выходного тока ИОУ. Например, TL072/082 способен выдать ток около 20 мА, а TL062 – около 15 мА. Учитывая, что 5 мА идёт на питание стабилизатора, остаётся запас по 15 и 10 мА соответственно. Однако из справочного листка на ИОУ следует, что минимальное значение тока короткого замыкания этих приборов составляет около 10 мА. Поэтому ток через резисторы R2 и R3 целесообразно выбрать в пределах 1...1,5 мА, что при выходном напряжении 15 В будет соответствовать сопротивлению 15...10 кОм. Таким образом, сумма сопротивлений резисторов R2 + R3 не должна превышать 10...15 кОм, а сопротивление каждого из них не должно превышать 5...7,5 кОм. Что касается ИОУ TCA0372, то он способен обеспечить выходной ток до 1 А, поэтому ток питания стабилизатора в 5 мА не является проблемой.

Стабилизатор BZX55C7V5, как и стабилизатор BZX55C8V2, обладает минимальным дифференциальным сопротивлением ($< 7 \text{ Ом}$) при токе 5 мА (см. таблицу). Это дифференциальное сопротивление определяет крутизну ВАХ, или, другими словами, стабилизирующие свойства прибора. Помимо дифференциального сопротивления, на стабильность напряжения стабилизатора влияет его температурный коэффициент напряжения (ТКН). Из таблицы следует, что минимальный ТКН имеет стабилизатор BZX55C6V2, однако его дифференциальное сопротивление выше, чем у стабилизатора BZX55C7V5, который является компромиссом между стабилизаторами BZX55C6V2 и BZX55C8V2.

Все схемы, приведённые на рисунке 3, равнозначны по стабильности, од-

нако для подавления паразитной ВЧ-генерации всего стабилизатора целесообразно выбрать те из них, где точка соединения резисторов R2 и R3 подключена именно к неинвертирующему входу ИОУ, т.е. схемы рис. 3б и 3г. Дело в том, что для подавления генерации стабилизатора именно к неинвертирующему входу ИОУ необходимо подключить конденсатор, соединённый с входом стабилизатора (т.е. с входным напряжением). Если к этому же входу ИОУ подключен и стабилитрон (см. рис. 3а и 3в), то паразитная генерация может повлиять на стабильность опорного напряжения.

Мощный прецизионный регулятор напряжения 0...2,5 В

Для тестирования и поверки систем сбора и обработки информации, в составе которых используется высокоточный АЦП, может потребоваться прецизионный источник постоянного напряжения, которое должно регулироваться в пределах от 0 В до максимального входного напряжения АЦП (чаще всего 2,5 В). Если на входе АЦП установлен восьмиканальный коммутатор, а для измерения показаний датчиков с токовым выходом, например, 4...20 мА к такому коммутатору должны быть подключены восемь токоизмерительных резисторов номиналом 100 Ом, то максимальное напряжение U на каждом канале коммутатора составит $U = 20 \text{ [мА]} \times 100 \text{ [Ом]} = 2 \text{ [В]}$. Если требуется одновременная подача напряжений на все восемь каналов, то от регулятора напряжения потребуется ток $8 \times 20 \text{ мА} = 160 \text{ мА}$ при напряжении 2 В. Такой ток не способен обеспечить ни один интегральный источник опорного напряжения.

Для решения подобных задач и предназначен мощный прецизионный регулятор напряжения 0...2,5 В, схема которого приведена на рисунке 4. Стабилизатор построен на основе структурной схемы рис. 1а. В состав регулятора входит N-канальный полевой транзистор FDD6530A (или IRLR6225) T1, которым управляет ИОУ ОРА735(334) – DA2. Источник опорного напряжения ADR421 (DA1) выдаёт прецизионное напряжение $V_{refINT} = 2,5 \text{ В}$, которое может регулироваться от 0 до максимального значения переменным резистором R1. В регуляторе предусмотрено подключение внешнего опорного напряжения V_{refEXT} , по-

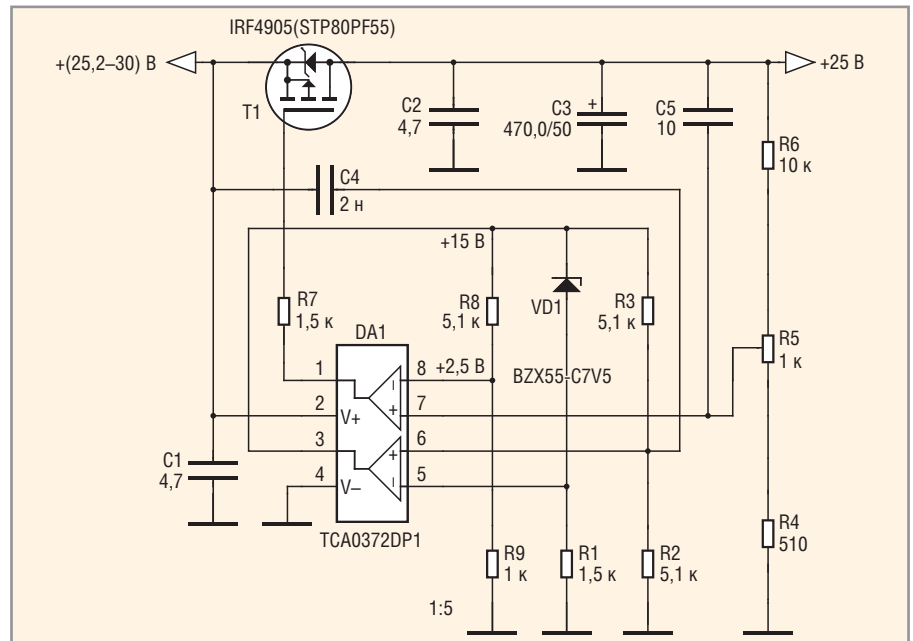


Рис. 9. Схема стабилизатора +25 В на ИОУ TCA0372DP1

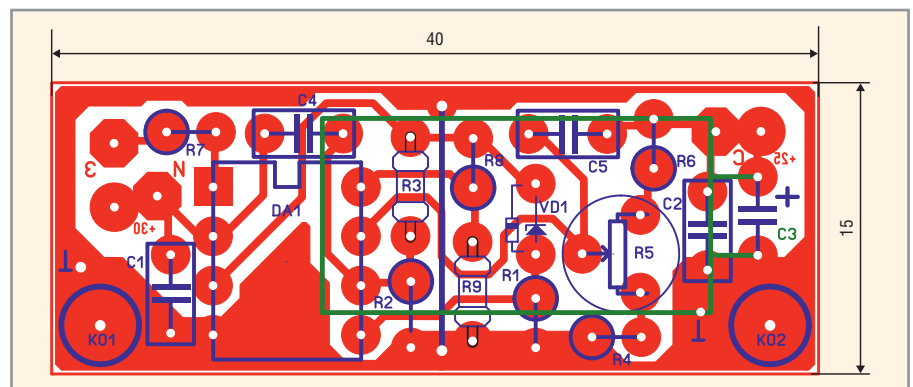


Рис. 10. Плата стабилизатора +25 В на ИОУ TCA0372DP1

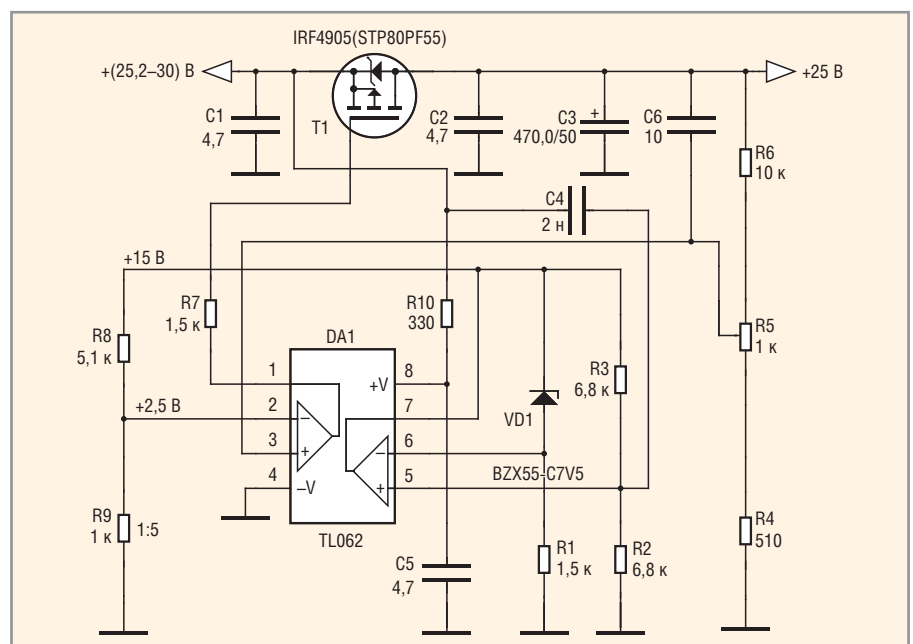


Рис. 11. Схема стабилизатора +25 В на ИОУ TL062

даваемого на разъём X3. Переключение с внешнего (V_{refEXT}) на внутреннее (V_{refINT}) опорное напряжение осуществляется переключателем П1. На

разъём X1 подаётся напряжение питания регулятора (+5 В), а выходное напряжение регулятора (V_{ext}) снимается с разъёма X2. Выключатель BK1 подаёт

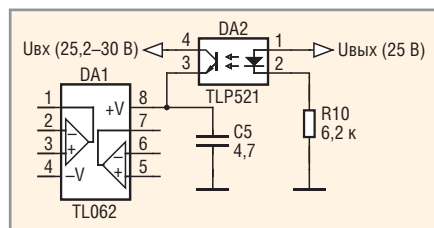


Рис. 12. Задержка включения питания ИОУ TL062 с помощью оптрона

выходное напряжение U_{ext} на выходной разъём X2. Для индикации подачи напряжения на выходной разъём X2 (U_{ext}) служит светодиод VD1. Резистор R2 ограничивает максимальный ток ИОУ, который при включении питания заряжает ёмкость затвор-исток мощного транзистора.

Конденсаторы C1–C4 – керамические, рассчитанные на максимальное напряжение 16 В, имеют типоразмер 1206, C5 – танталовый, рассчитанный

на напряжение 7 В; этот конденсатор непосредственно припаян ко 2-му контакту выключателя BK1 (сигнал U_{out} на рисунке 4). Резисторы R2, R3 – для поверхностного монтажа, размером 0603. Резистор R1 – СП5-35Б. Максимальный выходной ток регулятора 2 А.

Стабильность выходного напряжения практически равна стабильности источника опорного напряжения. Погрешность выставленного напряжения зависит от того, какой транзистор и ИОУ используются. При использовании транзистора IRLR6225, независимо от типа ИОУ (ОРА334 или ОРА735), эта погрешность составляет не более 0,00001 В, т.е. 10 мкВ (!). При использовании транзистора FDD6530А и ИОУ ОРА735 выставленное напряжение не изменяется даже в 5-м знаке после запятой. Этот результат получен при сопротивлении нагрузки в 12,5 Ом, что

при максимальном напряжении 2,5 В соответствует току 0,2 А.

Вариант разводки платы регулятора приведён на рисунке 5. Фотошаблон платы напечатан принтером Canon Pixma MG5140 на прозрачной плёнке Avery Zweckform Z2503, а сама плата изготовлена по методике, описанной в [5, 6].

Конструктивно регулятор выполнен в корпусе, на поверхность которого выведены все разъёмы, светодиод, регулятор выходного напряжения R1, выключатель BK1 и переключатель П1. Транзистор приклеен теплопроводящим клеем к радиатору, укреплённому внутри корпуса. Для охлаждения на дне и боковых поверхностях корпуса просверлены несколько отверстий. Коммутация всех сигналов внутри корпуса выполнена навесным монтажом.

Мощный ПРЕЦИЗИОННЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПЯЖЕНИЯ +5 В

Схема стабилизатора приведена на рисунке 6. Она построена на основе структурной схемы рис. 1в. В качестве регулирующего элемента использован мощный Р-канальный полевой транзистор IRF4905 (STP80PF55) – T1. В качестве источника опорного напряжения (+2,5 В) использована недорогая ИС ADR291 в корпусе TO-92; ИОУ ОРА735 размещён в корпусе SOT23-5. Резистором R5 устанавливается выходное напряжение стабилизатора +5 В. Резистор R3 ограничивает максимальный ток ИОУ, который при включении питания заряжает ёмкость затвор-исток.

Стабилизатор способен обеспечить ток в нагрузке до 4,6 А; пульсации выходного напряжения не превышают 1 мВ. Конденсатор C5 устраняет самовозбуждение стабилизатора. Конденсаторы C1–C4 дополнительно уменьшают уровень пульсаций выходного напряжения.

Падение напряжения на регулирующем элементе составляет не более 0,1 В при токе 2 А и 0,2 В при токе 4,6 А. Падение напряжения при подключении нагрузки составляет около 0,01 В на каждый ампер тока. Все резисторы, кроме R6, имеют мощность 0,125 Вт. Мощность резистора R6 – 0,25 Вт. Рисунок печатной платы стабилизатора показан на рисунке 7.

Конструктивно стабилизатор выполнен в виде адаптера, снабжённого вилкой (B1 на рисунке 8) для подключения к сетевому напряжению 220 В. В

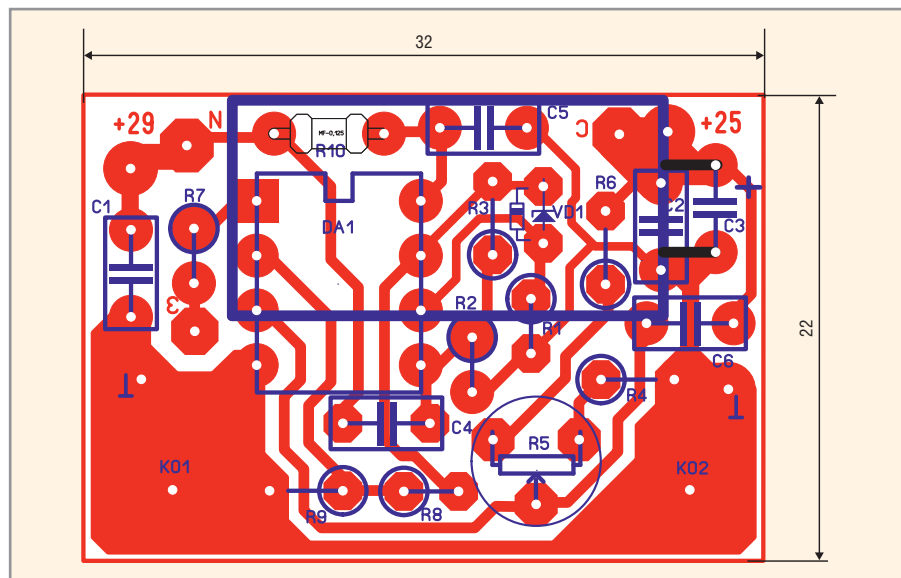


Рис. 13. Плата стабилизатора +25 В на ИОУ TL062

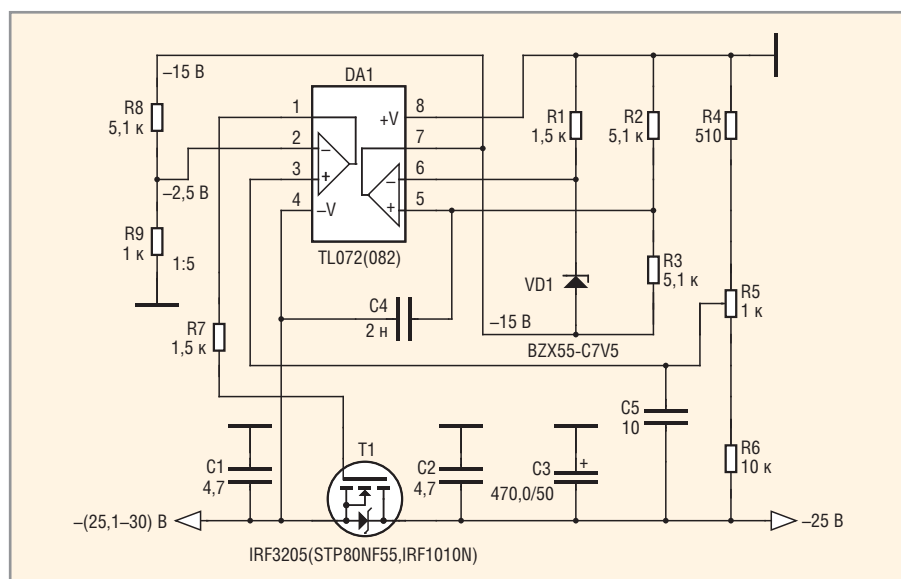


Рис. 14. Схема стабилизатора –25 В на ИОУ TL072/082

корпусе размещён выпрямитель, сама плата стабилизатора, а также радиатор с транзистором Т1 и диодами VD1–VD4; диоды изолированы от радиатора слюдяными прокладками, а транзистор электрически не изолирован от радиатора. Нагрев транзистора и диодов в зависимости от выходного тока происходит по-разному. При токе стабилизатора до 1 А в наибольшей степени нагревается транзистор, т.к. на нём падает большое напряжение; при увеличении тока до 4,5 А возрастает нагрев диодов. Из-за того что одновременно снижается выходное напряжение трансформатора, падение напряжения на транзисторе также уменьшается, и он перестаёт нагреваться. На поверхности корпуса размещён выключатель питания ВК1 и светодиод VD1. Выходное напряжение +5 В подаётся на выходной разъём кабеля, выведенного из корпуса с помощью резиновой втулки.

СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ ±25 В

Схема стабилизатора положительного напряжения +25 В приведена на рисунке 9. Конденсаторы C4 и C5 препятствуют самовозбуждению стабилизатора, а конденсаторы C1–C3 дополнительно уменьшают уровень пульсаций выходного напряжения. Резистором R5 устанавливается выходное напряжение стабилизатора +25 В. Резистор R7 ограничивает ток ИОУ, который в момент включения питания заряжает ёмкость затвор–исток.

Схема испытывалась при нагрузках 20 Ом (ток 1,25 А) и 6 Ом (ток 4,17 А). Падение напряжения на мощном транзисторе при токе 4 А составляет не более 0,15 В. Разница выходных напряжений без нагрузки и с нагрузкой составляет примерно 0,01 В на каждый ампер тока. Пульсации выходного напряжения при токе 4 А не превышают 1...2 мВ. Стабилизатор устойчиво запускается и показывает надёжную работу.

Конденсаторы C1, C2, C4 и C5 – керамические типа К10-17Б, рассчитанные на напряжение 50 В, C3 – алюминиевый электролитический типа К50-35 на 50 В. Все резисторы, кроме R5, имеют мощность 0,125 Вт. Резистор R5 – подстроечный СПЗ-19А. В качестве регулирующего элемента использован мощный полевой транзистор IRF4905, который может быть заменён на STP80PF55. Для транзистора либо предусматривается отдельный радиатор, либо сам транзистор

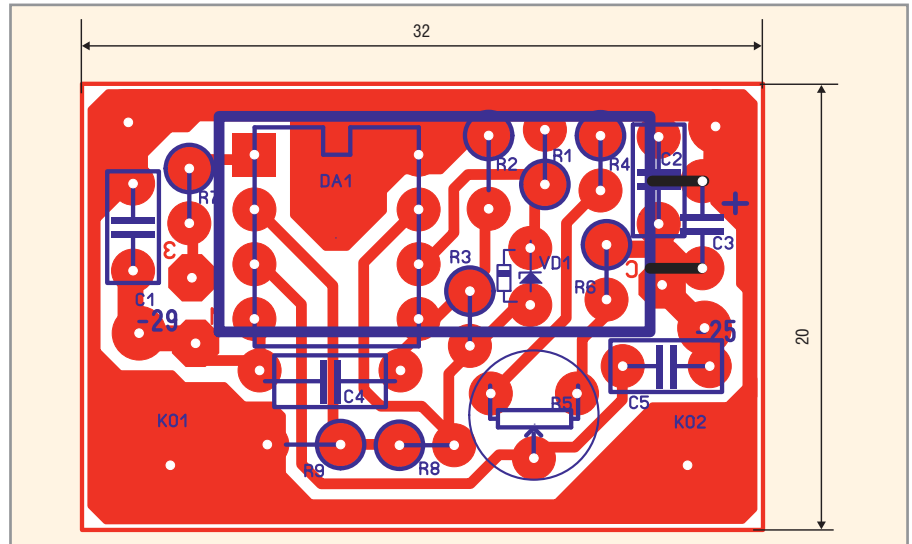


Рис. 15. Плата стабилизатора –25 В

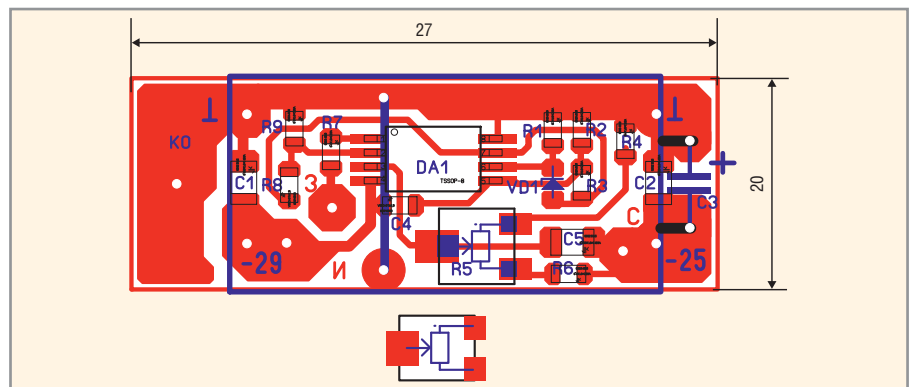


Рис. 16. Миниатюрная плата стабилизатора –25 В

устанавливают на металлической части корпуса прибора, т.к. мощность в нагрузке при токе в 4 А составляет 100 Вт. В качестве ИОУ использована микросхема TCA0372DP1 (DA1). Это достаточно рас-

пространённый и недорогой ИОУ общего применения, который можно приобрести по цене около 15 руб.

Вариант разводки печатной платы стабилизатора показан на рисунке 10.



Рис. 17. Получение стабилизированного напряжения +25 В с помощью стабилизатора -25 В

Плата стабилизатора закреплена в корпусе прибора через отверстия КО1 и КО2. Помимо ИОУ TCA0372, работа схемы проверялась с ИОУ TL062/072/082. Усилители TL072/082 вообще «отказались» работать в такой схеме, а TL062 показал удовлетворительную работу (см. рис. 11) при условии, что питание на ИОУ подавалось с задержкой.

Как видно из рисунка 11, питание на ИОУ поступает через резистор R10, который совместно с конденсатором C5 представляет собой RC-цепочку, задерживающую включение ИОУ до открывания силового транзистора T1 (IRF4905 или STP80PF55). Дело в том, что в момент включения питания, пока выходное напряжение ИОУ равно нулю, транзистор T1 открывается и его выходное напряжение попадает на вход ИОУ, на выходе которого форми-

руется нужный потенциал. Если же ИОУ получает питание раньше и на его вход попадёт нулевое напряжение стока ещё не открывшегося транзистора, то на затвор последнего будет подано высокое напряжение, которое ещё больше закроет транзистор, и стабилизатор не запустится.

В описанной выше схеме стабилизатора +5 В (см. рис. 6) подобного эффекта не возникает, и она устойчиво запускается при включении питания, как и схема рис. 9, вероятно, из-за того что максимальные выходные напряжения ИОУ TCA0372 ближе к напряжениям питания, чем у ИОУ TL062.

Альтернативный вариант задержки подачи питания на ИОУ TL062 с использованием оптрона показан на рисунке 12. Он имеет некоторое преимущество перед цепочкой R10C5, т.к. сопротивление открытого транзистора оптотранзистора на порядок меньше сопротивления R10. По выходным параметрам схема рис. 11 практически не отличается от схемы рис. 9, за исключением повышенного уровня пульсаций (2...3 мВ). Изображение платы стабилизатора приведено на рисунке 13.

Работа ИОУ TCA0372 и TL062/072/082 проверялась и в стабилизаторах отрицательной полярности -25 В с мощными полевыми транзисторами IRF3205, STP80NF55 и IRF1010N. Как ни странно, ИОУ TL062 показал высокий уровень пульсаций (до 10 мВ и более); несколько повышенный уровень пульсаций (3...4 мВ) показал ИОУ TCA0372; ИОУ TL072/082 продемонстрировали идеальную работу.

Схема стабилизатора напряжения отрицательной полярности -25 В на ИОУ TL072 показана на рисунке 14. Функционально она соответствует структурной схеме, показанной на рисунке 1г, а по способу формирования опорного напряжения – схеме рис. 3г. Конденсаторы C4 и C5 препятствуют самовозбуждению стабилизатора, а конденсаторы C1–C3 дополнительно уменьшают уровень пульсаций выходного напряжения. Резистором R5 устанавливается выходное напряжение стабилизатора -25 В.

Питание на ИОУ подаётся непосредственно с входа стабилизатора (см. рис. 14), при этом стабилизатор запускается надёжно, и никаких RC-цепочек для задержки питания ИОУ не требуется. В схеме использован мощный N-канальный полевой транзистор IRF3205 (T1), но могут быть использованы приборы STP80NF55 и IRF1010N. Резистор R7 ограничивает ток ИОУ, который в момент включения питания заряжает ёмкость затвор-исток мощного транзистора.

Электрические параметры стабилизатора аналогичны параметрам стабилизатора положительной полярности на ИОУ TCA0372 (см. рис. 9) за исключением падения напряжения (0,1 В против 0,15 В в схеме рис. 9) и уровня пульсаций (не более 1 мВ против 1...2 мВ). Конденсаторы C1, C2, C4 и C5 – керамические К10-17Б, рассчитанные на напряжение 50 В, C3 (K50-35) – на 50 В.

Все резисторы, кроме R5, имеют мощность 0,125 Вт, R5 – подстроечный СПЗ-19А. Для силового транзистора либо предусматривается отдельный радиатор, либо сам транзистор укрепляется на металлической части корпуса прибора. В качестве ИОУ использована микросхема TL072 или TL082 (DA1). ИОУ TCA0372 показал удовлетворительную работу в данной схеме, однако уровень пульсаций составил 3...4 мВ (1 мВ с ИОУ TL072). Схема стабилизатора отрицательной полярности на ИОУ TCA0372 отличается только

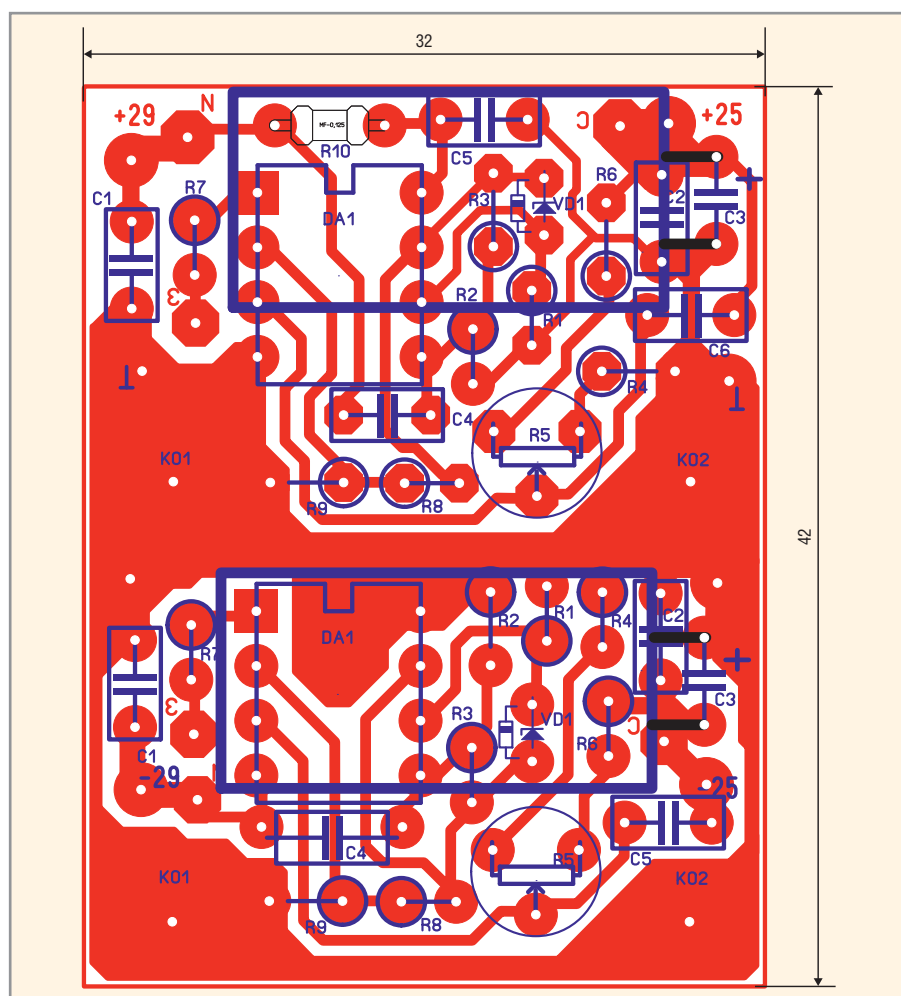


Рис. 18. Плата двухполярного стабилизатора ±25 В

цоколёвкой корпуса ИОУ и поэтому не приводится. Варианты разводки платы стабилизатора показаны на рисунках 15 и 16.

Стабилизатор отрицательной полярности имеет некоторое преимущество перед стабилизатором положительной полярности. Во-первых, применённые в нём ИОУ TL072 и TL082 дешевле, чем TCA0372 (например, TL072/TL082 в планарном корпусе можно приобрести за 3...4 руб.); во-вторых, мощные N-канальные полевые транзисторы также дешевле, чем P-канальные; в третьих, падение напряжения и уровень пульсаций в стабилизаторах отрицательной полярности ниже из-за меньшего сопротивления открытого N-канального полевого транзистора, которое достигает тысячных долей ома. Поэтому если требуется только один стабилизатор положительной полярности, то из стабилизатора отрицательной полярности можно легко получить стабилизатор положительной полярности по схеме рис. 17.

Если же требуется двухполярный стабилизатор ± 25 В [1], то обе платы можно объединить в одну (см. рис. 18). Здесь использован стабилизатор по-

ложительной полярности по схеме рис. 11, а отрицательной – по схеме рис. 14.

Следует отметить, что при налаживании двухполярного стабилизатора ± 25 В желательно между затвором и истоком полевых транзисторов установить защитный стабилитрон на напряжение 11...12 В, поскольку в применённых в этих стабилизаторах полевых транзисторах максимальное напряжение между затвором и истоком составляет ± 20 В, что ниже их входных (и выходных) напряжений ($\pm 30...25$ В). В дальнейшем этот стабилитрон можно удалить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование современных мощных полевых транзисторов и ИОУ в прецизионных стабилизаторах и регуляторах постоянного напряжения, а также в стабилизаторах напряжения общего применения даёт преимущество перед интегральными стабилизаторами в низком падении напряжения, малом уровне пульсаций и себестоимости компонентов. Например, интегральный стабилизатор на ток около 10 А сейчас продаётся за 1000 руб., а

ИОУ вместе с мощным полевым транзистором, способным работать с токами до 100 А (и более), обойдётся в 40...50 руб. Альтернативой мощному прецизионному регулятору напряжения 0...2,5 В с точностью установки напряжения до 10 мкВ являются прецизионные калибраторы напряжения стоимостью от 1000 долл. США.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминов А. Мощный стабилизатор двухполярного напряжения для УМЗЧ. Радио. 2012. № 5.
2. Рутковский Дж. Интегральные операционные усилители. Мир, 1978.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Мир, 1982.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Мир, 1993.
5. Кузьминов А. Метод фоторепродуцирования для изготовления фотошаблона печатных плат в домашних условиях. Технологии в электронной промышленности. 2010. № 5–7.
6. Кузьминов А. Изготовление устройств на печатных платах с высоким разрешением в домашних условиях. Технологии в электронной промышленности. 2010. № 8–10.

