

# Применение IGBT-транзисторов в линейных стабилизаторах напряжения

Алексей Кузьминов

В статье описан линейный стабилизатор с выходным напряжением 28 В и током до 9 А на ОУ MC34072MTTBG/MC33072DR2G и IGBT-транзисторе DG20X06T2. Порог срабатывания токовой защиты на ОУ и оптосимисторе VOM160NT составляет около 10 А. Размах пульсации выходного напряжения на нагрузке при максимальном токе составляет около 1 мВ (0,97 мВ для MC33072DR2G и 1,12 мВ для MC34072MTTBG), а падение напряжения – не более 0,1 В. Приведены принципиальные схемы, разводка и внешний вид плат стабилизатора, а также результаты его тестирования.

## Введение

Биполярный транзистор с изолированным затвором в отечественной литературе имеет аббревиатуру БТИЗ, в зарубежной – IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Такой прибор представляет собой мощный и, как правило, высоковольтный (600 В и даже 1200 В) биполярный транзистор, к базе которого подключён менее мощный полевой транзистор, задающий базовый ток, а на его затвор уже подаётся управляющее напряжение. Такие транзисторы обычно используются в переключающем режиме работы в составе импульсных ИП, в инверторах для сварочных аппаратов и т.п. Поскольку в составе IGBT-транзисторов имеется полевой транзистор, передаточные характеристики полевых и IGBT-транзисторов имеют похожий вид (рис. 1). Однако между ними имеется одно очень существенное отличие, которое касается так называемого порогового напряжения затвора –  $V_{GS(th)}$  (Gate Threshold Voltage). Это такое напряжение между истоком и затвором (для IGBT – между эмиттером и затвором –  $V_{GE(th)}$ ), при котором транзистор начинает открываться. Обычно это пороговое напряжение затвора для полевых транзисторов составляет в среднем 2–4 В (рис. 1б). Однако среди полевых транзисторов встречается такие, у которых это пороговое напряжение затвора существенно больше. Например, у IRFP4710  $V_{GS(th)}$  составляет 3,5–5,5 В (рис. 1а). У IGBT-транзисторов пороговое напряжение затвора, как правило, ещё больше. Например, у DG20X06T2  $V_{GE(th)}$  составляет 5,2–6,5 В (рис. 1в). Причём с увеличением температуры у обо-



Дополнительные материалы к статье вы можете скачать с нашего сайта по этой ссылке

их типов транзисторов это пороговое напряжение затвора смещается влево, т.е. оно снижается, что можно легко проследить по рис. 1. Схожесть передаточных характеристик полевых и IGBT-транзисторов натолкнула автора на идею: а нельзя ли использовать IGBT-транзисторы в линейном (а не в переключающем) режиме работы при конструировании линейных стабилизаторов напряжения? Забегая вперед, можно отметить, что эта идея себя оправдала. Мало того, IGBT-транзисторы в подобных стабилизаторах напряжения показали такой высокий результат работы, которого автор даже не ожидал.

Но прежде чем описывать конкретную принципиальную схему линейного стабилизатора, сделаем некоторое отступление относительно способа включения транзистора в подобном стабилизаторе. В статье автора [1] была приведена структурная схема стабилизатора отрицательного напряжения на ОУ и мощном n-канальном полевом транзисторе (рис. 2а). Более подробно эта схема показана на рис. 2б. Такая схема применена автором в линейных стабилизаторах, описанных в [2] и [3]. В этой схеме ОУ и источник опорного напряжения (ИОН) питаются входным напряжением, пропущенным через НЧ RC-фильтр, который несколько подавляет пульсации входного напряжения. Опорное напряжение подаётся на инвертирующий вход ОУ, а выходное напряжение с

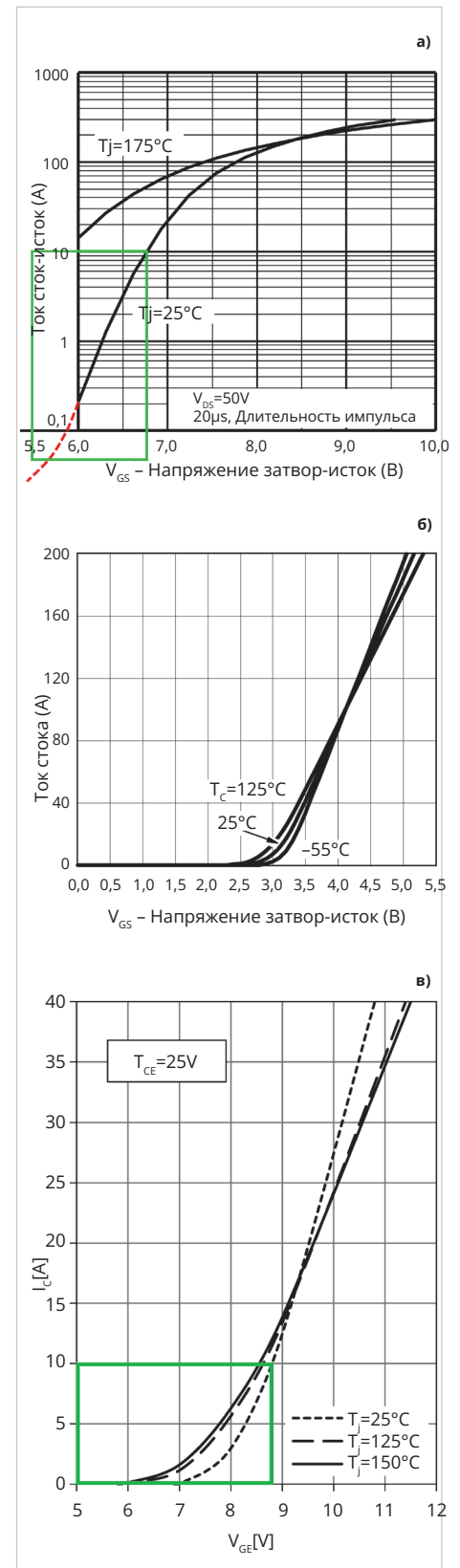


Рис. 1. Передаточные характеристики транзисторов: полевых – IRFP4710 (а) и SUP90P06 (б), IGBT – DG20X06T2 (в)

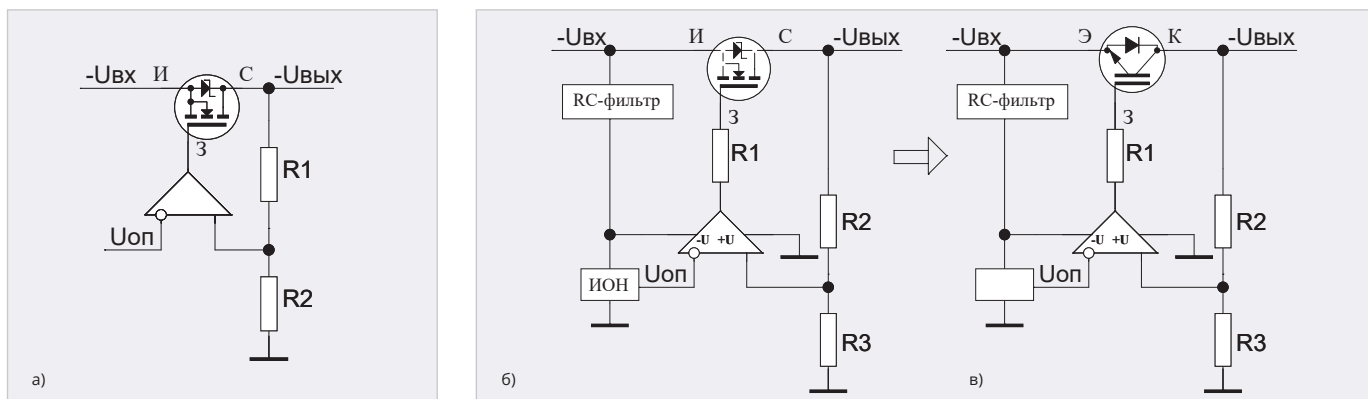


Рис. 2. Упрощённые схемы стабилизаторов напряжения на полевом (а, б) и IGBT- (в) транзисторах

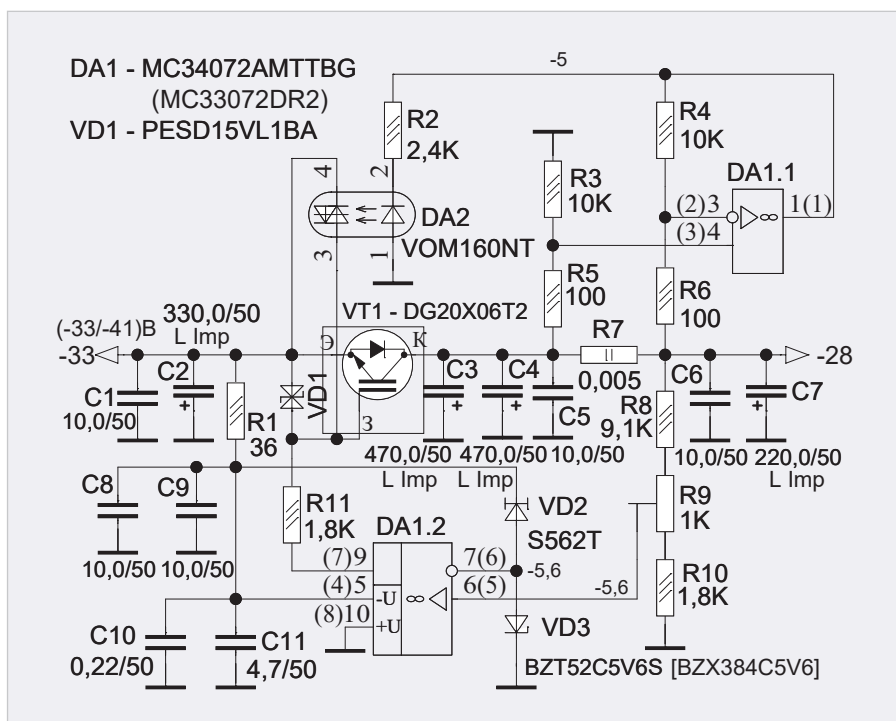


Рис. 3. Принципиальная схема стабилизатора

делителя R2–R3 – на его неинвертирующий вход. При таком включении ОУ, если выходное напряжение падает (например, при подключении нагрузки), то падает и напряжение, снятое с делителя R2–R3, а поскольку оно подключено к неинвертирующему входу ОУ, падает и выходное напряжение ОУ (т.е. оно становится более положительным), так как ОУ стремится сохранить напряжение на своих входах. Более положительное напряжение, приложенное к затвору транзистора (рис. 1), заставляет его приоткрыться, отчего выходное напряжение устанавливается на прежний уровень. При снятии нагрузки всё происходит с точностью до наоборот, т.е. транзистор прикрывается, восстанавливая выходное напряжение на прежний уровень. Однако при закрытии транзистора существует один существен-

ный нюанс. Для того чтобы закрыть транзистор, на его затвор требуется подать напряжение, близкое к напряжению истока, т.е. входному напряжению. Если даже ОУ обладает так называемым свойством Rail-to-Rail Output по отрицательному напряжению, т.е. он может воспроизвести выходное напряжение, почти равное отрицательному напряжению питания ( $-U$ ), то всё равно он не может полностью закрыть транзистор, поскольку на RC-фильтре, выходным напряжением которого питается ОУ, будет небольшое падение напряжения. Хотя, конечно, полностью закрывать транзистор не требуется, поскольку он должен сохранять выходное напряжение на прежнем уровне и обеспечивать хотя бы небольшой ток, проходящий через све-

тодиод, подключённый к выходному напряжению для его индикации [3]. В сумме эти два тока составляют несколько мА. Но даже такой маленький ток может обеспечить не каждый полевой транзистор, управляемый ОУ по схеме на рис. 2б. Для того чтобы это было возможно, транзистор должен иметь достаточно большое пороговое напряжение затвора ( $V_{GS(th)}$ ). Из всех полевых транзисторов, насколько это известно автору, только транзистор IRFP4710 (IRFB4710) имеет достаточно большое пороговое напряжение затвора (3,5–5,5 В) – см. выше. Если максимальный выходной ток стабилизатора составляет около 10 А, то транзистор IRFP4710 будет работать в области, очерченной зелёным прямоугольником на рис. 1а, т.е. выходное напряжение ОУ (напряжение затвора) будет изменяться в пределах приблизительно от 5,5 В до 6,75 В. Но это только если транзистор холодный, т.е. его температура не больше 25°C. При большом токе (например, 8–9 А) транзистор будет нагреваться, и его температура может повыситься до 40–60°C, что приведёт к смещению передаточной характеристики влево (рис. 1). Но поскольку транзистор в таком режиме работы открыт и на затвор подаётся достаточно высокое напряжение, ни к какому негативному эффекту это не приведёт, и всё будет работать в штатном режиме. Но что будет, если снять нагрузку, когда транзистор горячий? В этом случае на его затвор необходимо будет подать напряжение ещё ближе к напряжению истока (так как передаточная функция смещена влево), и если этого напряжения недостаточно, т.е. ОУ уже не сможет подать на затвор нужное напряжение, может возникнуть самопроизвольная генерация частотой около 300–500 Гц и амплитудой в несколь-

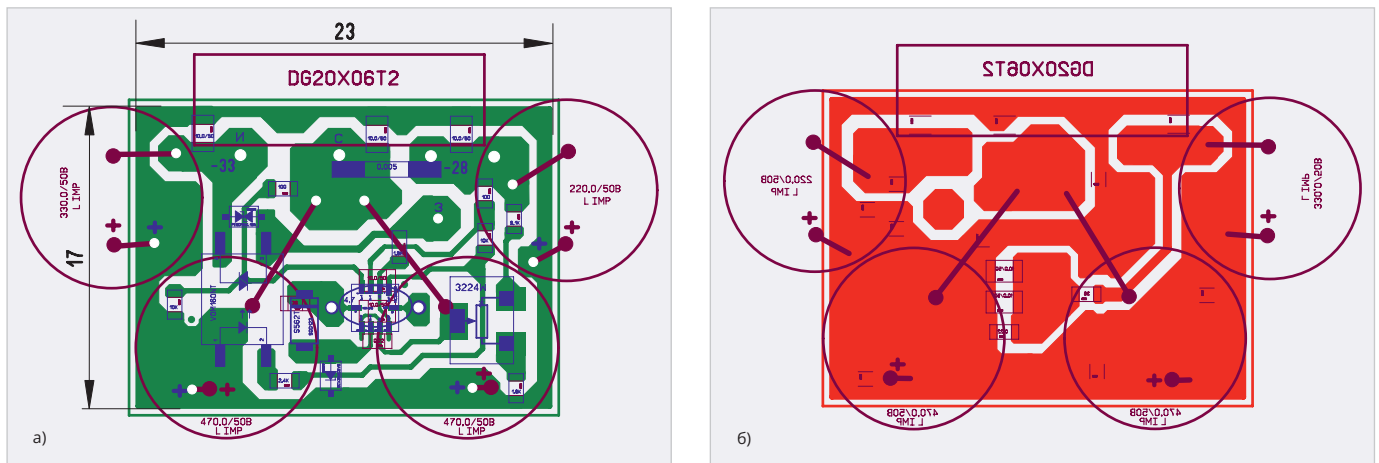


Рис. 4. Разводка платы с ОУ MC34072MTTBG: а) вид со стороны расположения ОУ, б) вид с обратной стороны

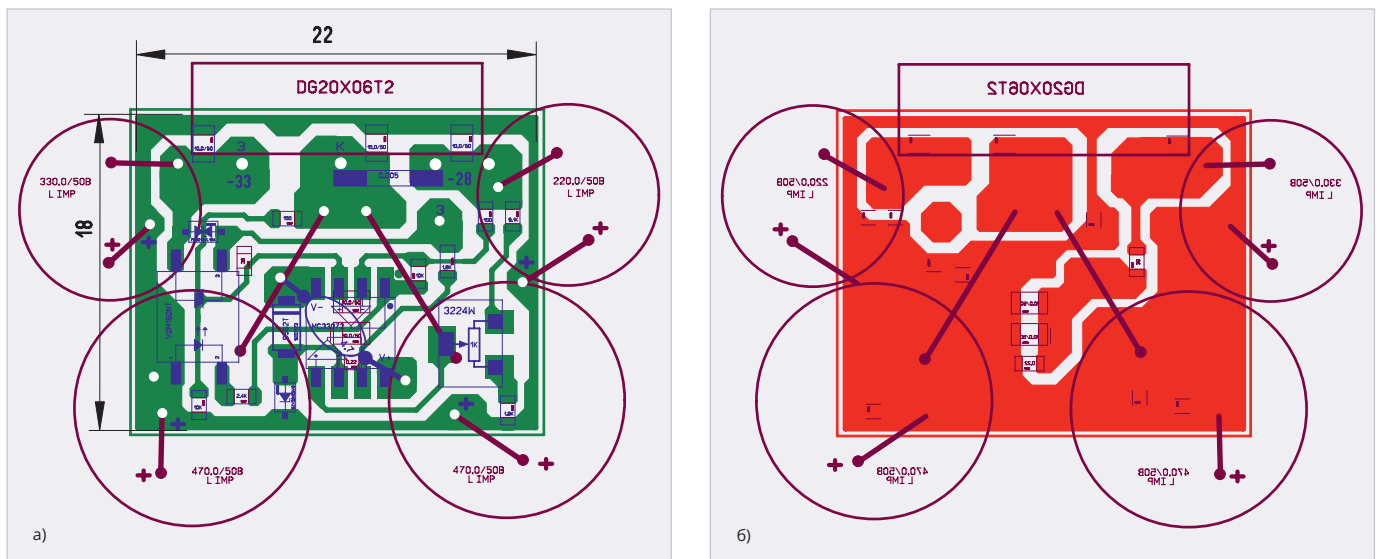


Рис. 5. Разводка платы с ОУ MC33072DR2G: а) вид со стороны расположения ОУ, б) вид с обратной стороны

ко мВ. Этот эффект автор наблюдал с одним из экземпляров транзистора IRFP4710 (при использовании остальных экземпляров подобная генерация отсутствовала).

Теперь посмотрим на передаточную характеристику IGBT-транзистора DG20X06T2 (рис. 1в). Как можно заметить, его работа при максимальном токе до 10 А очерчена зелёным прямоугольником, а поскольку пороговое напряжение затвора ( $V_{GE(th)}$ ) составляет 5,5–6,2 В, т.е. существенно выше порогового напряжения затвора IRFP4710 (3,5–5,5 В), то даже приличный нагрев этого транзистора и после этого снятие нагрузки не приведёт к вышеуказанной генерации. Автор специально достаточно сильно нагрел этот транзистор (в схеме рис. 2в), а потом снял нагрузку и наблюдал за выходным напряжением на осциллографе. Никакой генерации не было и в помине. В связи с этим схема рис. 2в, где осуществлена прямая замена IRFP4710 на

DG20X06T2, и была принята за основу принципиальной схемы стабилизатора.

Автор также обнаружил ещё один интересный эффект у транзистора DG20X06T2 – менее сильный нагрев, чем у транзистора IRFP4710, при одном и том же времени работы (около 5 минут) и одном и том же токе (9 А). Если радиатор с IRFP4710 в этом режиме был почти горячим (по ощущениям автора, около 50–60°C), то радиатор с DG20X06T2 был только тёплым (около 40°C). Объяснить этот эффект можно тем, что у DG20X06T2 падение напряжения составляет около 1–2 В (так как выходной транзистор биполярный), а IRFP4710 имеет очень низкое сопротивление в открытом состоянии (максимальное значение составляет всего 14 мОм), в связи с чем он работает как полностью регулируемое сопротивление во всём диапазоне токов. А падение напряжения даже в 1 В при токе 9 А (у DG20X06T2) приведёт к мощности 9 Вт,

которая, возможно, вычтется из всей рассеиваемой мощности при нагреве транзистора. Второй версией сниженного нагрева IGBT-транзисторов является их меньшее тепловое сопротивление переход–корпус по сравнению с биполярными и полевыми транзисторами, отчего тепло IGBT-транзисторов рассеивается радиатором более интенсивно. Но это только предположения автора. Во всяком случае, факт остаётся фактом: транзистор DG20X06T2 по сравнению с IRFP4710 при одних и тех же условиях греется явно меньше.

Стоит упомянуть и ещё одно свойство IGBT-транзисторов – это существенно меньшая ёмкость затвор–эмиттер по сравнению с ёмкостью затвор–исток у полевых. Входная ёмкость у IRFP4710  $C_{ISS} = 6160$  пФ, тогда как входная ёмкость DG20X06T2  $C_{IES} = 2320$  пФ (см. справочные листки на эти транзисторы). Меньшая ёмкость  $C_{IES}$  объясняется тем, что полевой транзистор, входящий в состав



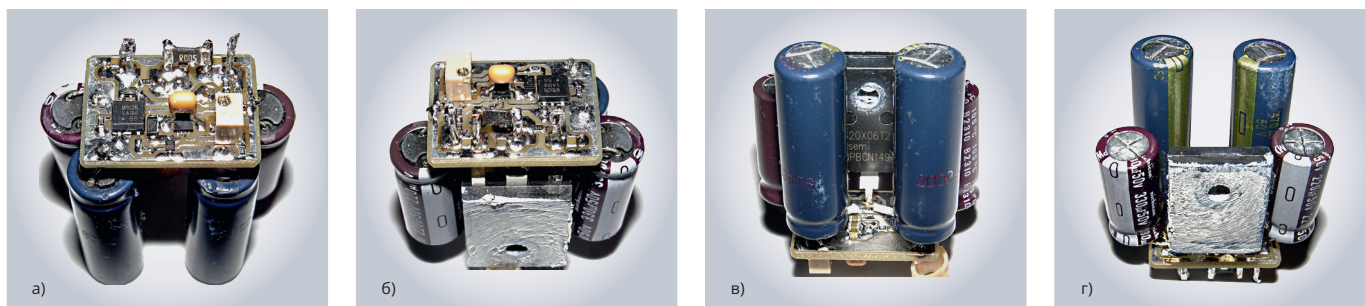


Рис. 6. Внешний вид платы с ОУ MC34072MTTBG: а, б – вид со стороны расположения ОУ (а – спереди (ср. с рис. 4а), б – сзади), в, г – вид с обратной стороны (в – спереди (ср. с рис. 4б), г – сзади)

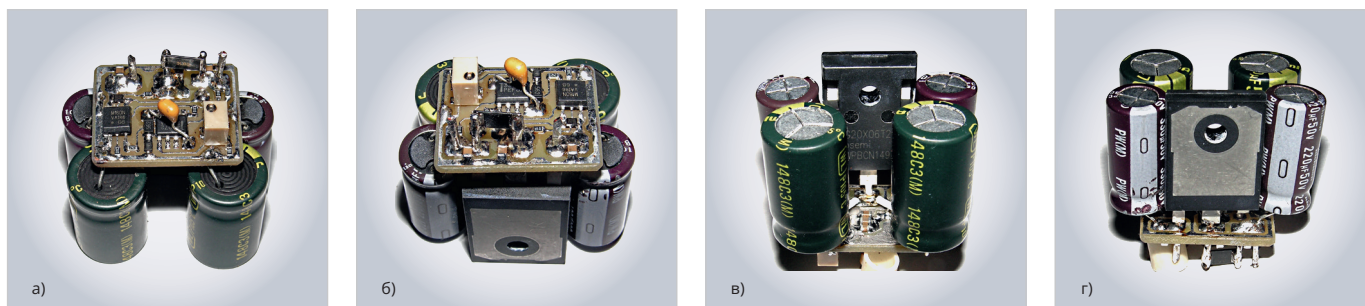


Рис. 7. Внешний вид платы с ОУ MC33072DR2G: а, б – вид со стороны расположения ОУ (а – спереди (ср. с рис. 5а), б – сзади), в, г – вид с обратной стороны (в – спереди (ср. с рис. 5б), г – сзади)

DG20X06T2 и определяющий только базовый ток (несколько ампер) биполярного транзистора, существенно менее мощный, чем транзистор IRFP4710, который выдаёт полный ток (до 70 А). Но чем меньше мощность полевого транзистора, тем меньше его кристалл и соответственно меньше значение входной ёмкости. А чем меньше эта ёмкость, тем легче управлять транзистором со стороны ОУ. Хотя максимальная ёмкость, которую допускает выход ОУ MC33072/MC34072, применённый в стабилизаторе (см. далее), составляет 10 000 пФ, всё же более лёгкое управление IGBT-транзистором приводит к снижению уровня пульсаций выходного напряжения стабилизатора (см. далее).

И последнее, что следует упомянуть, – это уникальная дешевизна транзистора DG20X06T2 (не более 100 руб.) по сравнению с транзистором IRFP4710 (300–700 руб., а то и дороже).

Итак, резюмируем все преимущества транзистора DG20X06T2 перед транзистором IRFP4710.

- Существенно большее пороговое напряжение затвор–эмиттер, которое исключает возникновение паразитной генерации стабилизатора в неблагоприятном режиме работы (отключение нагрузки при нагревом транзисторе).
- Меньший нагрев транзистора DG20X06T2 по сравнению с нагревом

IRFP4710 при одном и том же времени работы и одном и том же токе.

- Меньшая входная ёмкость DG20X06T2, что в итоге приводит к снижению размаха пульсаций выходного напряжения.
- Существенно меньшая стоимость DG20X06T2 по сравнению со стоимостью IRFP4710.

Кстати, по поводу стоимости ОУ. Применённые в стабилизаторе ОУ MC34072MTTBG (около 200 руб.) и MC33072DR2G (40–60 руб.) стоят заметно меньше, чем ОУ ADA4522-2 (300–500 руб.), применённый в [3].

Теперь, после этих предварительных пояснений, можно уже перейти к принципиальной схеме стабилизатора.

### Принципиальные схемы

Принципиальная схема (рис. 3) построена по упрощённой схеме рис. 2в. По сравнению с принципиальной схемой, приведённой в [3], сделаны всего два изменения: во-первых, вместо транзистора IRFP4710 применён транзистор DG20X06T2, а во-вторых, вместо ОУ ADA4522-2 применены ОУ MC34072MTTBG/MC33072DR2G. Поскольку эта схема подробно описана в [3] и работает аналогичным образом, подробно описывать её нет смысла. Единственное, что необходимо отметить, это номера выводов ОУ. В скобках на схеме пока-

заны выводы ОУ MC33072DR2G, без скобок – выводы MC34072MTTBG.

### Разводка и внешний вид плат стабилизатора

Разводка плат (рис. 4, рис. 5) сделана автором с помощью программы Sprint-Layout 6.0. Файл разводки в формате \*.lay6 приведён в дополнительных материалах на сайте журнала. Несмотря на существенно больший размер ОУ MC33072DR2G по сравнению с MC34072MTTBG, размеры плат остались практически одинаковыми (18×22 мм для MC33072DR2G и 17×23 мм для MC34072MTTBG).

Внешний вид плат (рис. 6, рис. 7) также практически одинаков. На рис. 6в и рис. 7в можно заметить транзистор DG20X06T2 с соответствующим обозначением на его лицевой поверхности.

### Результаты работы стабилизатора

Осциллограммы входных и выходных напряжений (рис. 8), снятые двухканальным цифровым осциллографом с закрытыми входами для стабилизаторов на базе ОУ MC34072MTTBG и MC33072DR2G, показали следующее.

При одинаковом размахе пульсации входного напряжения в 860 мВ (надпись «Vpp(1) = 860mV» в левом нижнем углу рис. 8а и рис. 8б) размах пульсации выходного напряжения для MC34072MTTBG чуть больше:

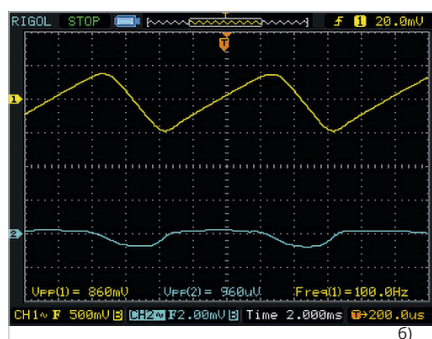
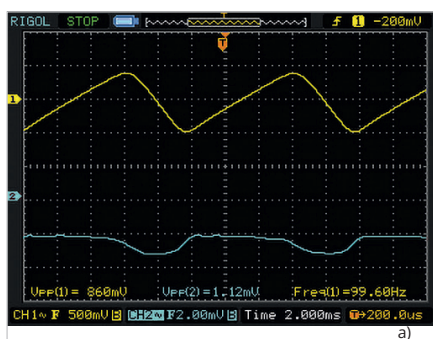


Рис. 8. Пульсации входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) напряжений стабилизаторов при токе 9 А: а – для MC34072MTTBG, б – для MC33072DR2G

1,12 мВ (надпись «Vpp(2) = 1.12mV» внизу в середине рис. 8а) против 960 мкВ (надпись «Vpp(2) = 960uV» внизу в середине рис. 8б) для MC33072DR2G. Осциллограммы сняты при токе чуть больше 9 А. По сравнению с размахом пульсации выходного напряжения стабилизатора на базе ОУ ADA4522-2 и полевого транзистора IRFP4710 (1,36 мВ) [3], размах пульсации выходного напряжения описанного стабилизатора снизился почти в полтора раза.

Плата на базе ОУ MC33072DR2G и IGBT-транзистора DG20X06T2 была признана автором как наилучший вариант (самая дешёвая и имеющая самый маленький размах пульсации выходного напряжения – 0,96 мВ). Она и была установлена на радиатор ИП (рис. 9).

## Заключение

Применение IGBT-транзистора позволило усовершенствовать описанный в [3] стабилизатор напряжения, повысить надёжность его работы, снизить размах пульсации его выходного напряжения

и существенно его удешевить, применив ОУ MC34072MTTBG/MC33072DR2G и IGBT-транзистор DG20X06T2. Настоящий стабилизатор автор применил в ИП, описанном в [3], для питания современного аудиоусилителя, хотя область применения подобного стабилизатора, на взгляд автора, гораздо шире. Кроме того, пониженная ёмкость затвор–эмиттер, более высокое пороговое напряжение затвора, меньшее тепловыделение и, наконец, невысокая стоимость современных IGBT-транзисторов составляют существенную конкуренцию полевым транзисторам при конструировании относительно мощных линейных стабилизаторов напряжения на их основе совместно с ОУ. Вообще, линейный режим (а не, как правило, переключательный, использующийся, например, в импульсных ИП или инверторах сварочных аппаратов) работы IGBT-транзисторов, их существенно более лёгкая управляемость по сравнению с полевыми и тем более биполярными транзисторами позволяют под-

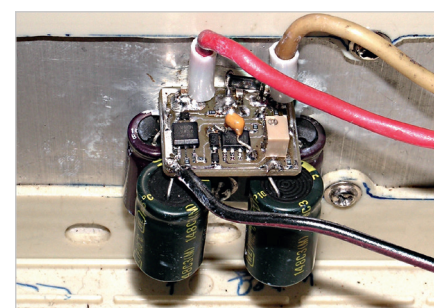


Рис. 9. Плата на базе ОУ MC33072DR2G и транзистора DG20X06T2, установленная на радиаторе ИП

ключать затвор IGBT непосредственно (либо через резистор) к выходу практически любого ОУ, что даёт возможность не только построения на их основе совместно с ОУ линейных стабилизаторов, как описано в настоящей статье, но и использования таких транзисторов в более широких областях.

## Литература

1. Кузьминов А. Использование мощных полевых транзисторов и операционных усилителей в прецизионных регуляторах и стабилизаторах напряжения // Современная электроника. 2012. № 7.
2. Кузьминов А. Однополярное питание аудиоусилителя на мощных ОУ в мостовом включении // Современная электроника. 2020. № 1, № 2.
3. Кузьминов А. Модернизированный стабилизированный блок питания для аудиоусилителя с защитой по току и низким уровнем пульсаций // Современная электроника. 2024. № X.



## НОВОСТИ МИРА

### 2,7-дюймовый графический OLED-дисплей с обширным набором интерфейсов для связи с микроконтроллерами

Предлагаемое устройство управляется микросхемой драйвера-контроллера SH1106 (производится компанией SINO WEALTH), который обеспечивает обмен данными с внешним микроконтроллером через стандартные параллельные интерфейсы микропроцессоров типа 8080/6080 в 8-битовом режиме и последовательные интерфейсы: I<sup>2</sup>C (Inter Integrated Circuit) и 4-проводной SPI (Serial Peripheral Interface). Разнообразие интерфейсных вариантов позволяет использовать этот дисплейный модуль практически в любом проекте или системе. Новинка оптимальна для применения в системах типа интеллектуальный дом, торговых терминалах (Point of Sale system), облач-

ных системах, медицинских приборах, системах IoT (Интернет вещей) и других.

Для работы логической схемы дисплея требуется напряжение питания от 1,65 до 3,3 В (типичное значение 3 В). Кристалл драйвера SH1106 соединён с выводами на стеклянной подложке по технологии COG (Chip On Glass), при этом обеспечивается небольшая толщина конструкции кристалл + стекло.

Предлагаемая модель REX012864AM WPP3N00000 характеризуется свечением экрана белого цвета. Коэффициент мультиплексирования строк 1/64 (64 – число адресуемых строк). Контрастность дисплея 10 000:1, что позволяет воспринимать изображение в широком диапазоне внешней освещённости при небольшой яркости свечения экрана 80 кд/м<sup>2</sup>.

Основные параметры:

- Размер матрицы: 128×64 точек

- Размер диагонали 2,7"
- Габаритные размеры модуля 73×41,86×2,01 мм
- Рабочая площадь экрана: 61,41×30,69 мм
- Размер пикселя 0,45×0,45 мм
- Шаг пикселя 0,48×0,48 мм
- Контрастность 10 000:1
- Тип адресации дисплея: пассивно-матричная
- Цвет свечения экрана: белый (планируется выпуск моделей с жёлтым цветом свечения экрана)
- Коэффициент мультиплексирования строк 1/64
- Микросхема контроллера управления SH1106
- Диапазон рабочих температур –40...+80°C
- Диапазон температур хранения –40...+85°C

