

# Управляемый двухканальный стабилизатор тока

Сергей Шишкин (Нижегородская обл.)

В статье описан двухканальный импульсный стабилизатор тока с электронным регулятором на микроконтроллере.

Описываемый источник питания представляет собой двухканальный управляемый стабилизатор тока. Диапазон изменения выходного тока от 6 до 16 А. Устройство состоит из двух частей: собственно двухканального стабилизатора тока и электронного регулятора. Принципиальная электрическая схема двухканального стабилизатора тока представлена на рисунке 1, электронного регулятора – на рисунке 2.

Основные технические характеристики стабилизатора тока приведены в таблице 1. В стабилизаторе тока при-

менена двухканальная схема. Каждый канал представляет собой импульсный понижающий стабилизатор напряжения, работающий в режиме стабилизации тока (далее стабилизаторы тока № 1 и № 2). Стабилизатор тока № 1 собран на полевом транзисторе VT3, микросхеме DA2 (ШИМ-контроллер), диоде VD2, дросселе L3, датчике тока на R34 – R38 и дифференциальном усилителе DA4. Стабилизатор тока № 2 собран на полевом транзисторе VT4, микросхеме DA3, диоде VD3, дросселе L4, датчике тока R39 – R42 и диффе-

ренциальном усилителе DA5. Максимальный выходной ток каждого стабилизатора – 8 А. Выходные токи стабилизаторов суммируются в нагрузке. Каналы, одинаковые по схеме, не влияют друг на друга при работе.

Стабилизаторы тока реализованы на ШИМ-контроллере TL494CN (микросхема DA2 или DA3). Подробное описание микросхемы приведено в [1], основные технические характеристики – в таблице 2. Следует отметить, что независимые выходные формирователи микросхемы обеспечивают возможность работы выходного каскада по схеме с общим эмиттером (ОЭ) или с общим коллектором (ОК).

Входное напряжение 24 В поступает на стабилизаторы с соединителя X1 через самовосстанавливающий предохранитель FU1 и контакты реле K1. В стабилизаторе № 1 резистор R15 и конденсаторы C11, C16 задают частоту генератора пилообразного напряжения микросхемы DA2 ( $f = 1,1/R_1C_T$ ). Управляющее напряжение поступает на инвертирующий вход усилителя ошибки (вывод 2 микросхемы DA2) с делителя R21, R22, R23. Сигнал обратной связи подаётся на неинвертирующий вход усилителя ошибки микросхемы DA2. Резистор R19 и конденсатор C12 осуществляют частотную коррекцию.

Выходной формирователь микросхемы TL494 работает в однотактном режиме (вывод 13 заземлён), т.е. выходные транзисторы включены по схеме ОЭ и работают параллельно. При этом частота выходного сигнала равна частоте задающего генератора. Сигнал с выхода микросхемы через резистивный делитель R11, R13 управляет регулирующим элементом (РЭ) стабилизатора – полевым транзистором VT3. На микросхеме DA4 выполнен дифференциальный усилитель, преобразующий ток в напряжение, которое поступает на неинвертирующий вход усилителя ошибки DA2.

Параллельные резисторы R34 – R38, включенные последовательно с нагрузкой, являются датчиком тока. Значение тока в нагрузке (напряжение на инвертирующем входе усилителя DA2) задаётся делителем R21 – R23. Управляю-

Таблица 1. Основные характеристики стабилизатора тока

Параметры	Значение
Количество каналов	2
Режим работы	Стабилизатор тока
Входные питающие напряжения, В	24, ±15
Максимальный выходной ток, А	16
Максимальная выходная мощность, Вт	100
Энергетическая плотность (удельная мощность), Вт/дм <sup>3</sup>	250
Диапазон изменения выходного тока, А	6...16
Шаг изменения выходного тока (при изменении на единицу значения на индикаторах электронного регулятора), мА	100
Диапазон изменения управляющего напряжения, В	2,5...5
Нестабильность выходного тока при изменении тока нагрузки и температуры окружающей среды, %	1
Среднее значение КПД во всём интервале выходного тока, %	70
Частота преобразования, кГц	15

Таблица 2. Основные характеристики микросхемы TL494CN

Параметры	Значение
Напряжение питания $U_{cc}$ , В	41
Входное напряжение усилителя, В	$U_{cc} + 0,3$
Выходное напряжение коллектора, В	41
Выходной ток коллектора (каждого транзистора), мА	250
Выходное опорное напряжение, В	$5 \pm 5\%$
Мощность рассеивания в непрерывном режиме (корпус DIP16, $T_a < 25^\circ\text{C}$ ), Вт	1
Рабочий диапазон температур окружающей среды, °C: ИС с суффиксом L ИС с суффиксом С	-25...85 0...70
Ток через вывод обратной связи, мА	<0,3
Ёмкость времязадающего конденсатора $C_T$ , нФ	0,047...10000
Сопротивление времязадающего резистора, кОм	1,8...500
Частота генератора, кГц	300
Ток потребления микросхемы, мА	< 20
Длительность фронта импульса выходного тока, нс	200
Длительность спада импульса выходного тока, нс	100

щее напряжение на делитель поступает с эмиттера транзистора VT2. Резистором R23 осуществляется корректировка подаваемого на вход 2 микросхемы DA2 управляющего напряжения. В результате стабилизация напряжения на датчике тока приводит к стабилизации тока в нагрузке. Независимые датчики тока в каждом стабилизаторе позволяют развязать каналы друг от друга.

Стабилизатор тока № 2 является копией первого и работает точно также. Следует отметить, что управляющее напряжение с эмиттера транзистора VT2 поступает на два стабилизатора одновременно. Для включения источника необходимо установить уровень сигнала «Вкл. электр.» в лог. 1 (ТТЛ), при этом открывается транзистор VT1. Контакты реле K1 включают оба стабилизатора, индикаторы HL1, HL2 позволяют визуально контролировать наличие напряжения на входе стабилизаторов.

Канал, формирующий управляющее напряжение, состоит из операционного усилителя DA1 и выходного транзистора VT2. Выходное напряжение с электронного регулятора соответствует определённому значению управля-

ющего напряжения, которое с эмиттера транзистора VT5 поступает на оба стабилизатора тока. Резисторами R2 и R6 устанавливается смещение и коэффициент усиления операционного усилителя DA1. Более точная регулировка в каналах стабилизации тока № 1 и № 2 осуществляется резисторами R23 и R26 соответственно.

Основные технические характеристики электронного регулятора приведены в таблице 3. Фактически регулятор представляет собой ЦАП, где двухзначному числу на индикаторе устройства соответствует выходной уровень постоянного напряжения. Регулятор состоит из генератора ШИМ-сигнала, выполненного на базе микроконтроллера AT902313, сглаживающего LC-фильтра и усилительного каскада на транзисторе VT1. Индикатор HL1 управляется с вывода 11 микроконтроллера DD1. Через порт В микроконтроллер DD1 управляет клавиатурой (кнопки S1 – S3) и динамической индикацией, реализованной на транзисторах VT1, VT2 и сдвоенном семисегментном индикаторе HG1. Коды для включения индикатора HG1 поступают на порт В микроконтроллера

**Таблица 3. Основные характеристики электронного регулятора**

Параметры	Значение
Напряжение питания, В	5
Число шагов регулирования	99
Диапазон регулирования уровня сигнала, дБ	25
Потребляемый ток при напряжении питания +5 В, не более, мА	100

DD1. Для функционирования клавиатуры также задействован вывод 6 микроконтроллера DD1. Рабочая частота 10 МГц микроконтроллера DD1 задаётся генератором с внешним резонатором ZQ1. ШИМ-сигнал с вывода 15 микроконтроллера DD1 через резистор R4 поступает на фильтр L1C4 и далее на эмиттерный повторитель VT1.

К интерфейсу устройства относятся клавиатура (кнопки S1 – S3), индикатор HL1 и сдвоенный семисегментный индикатор HG1. Кнопки клавиатуры имеют следующее назначение:

- S1 (Δ) – увеличение на единицу относительного значения выходного напряжения (в %) при удержании данной кнопки в нажатом состоянии более 2 с, значение выходного напряжения, индицируемое на дисплее, увеличивается на 5 единиц за 1 с;

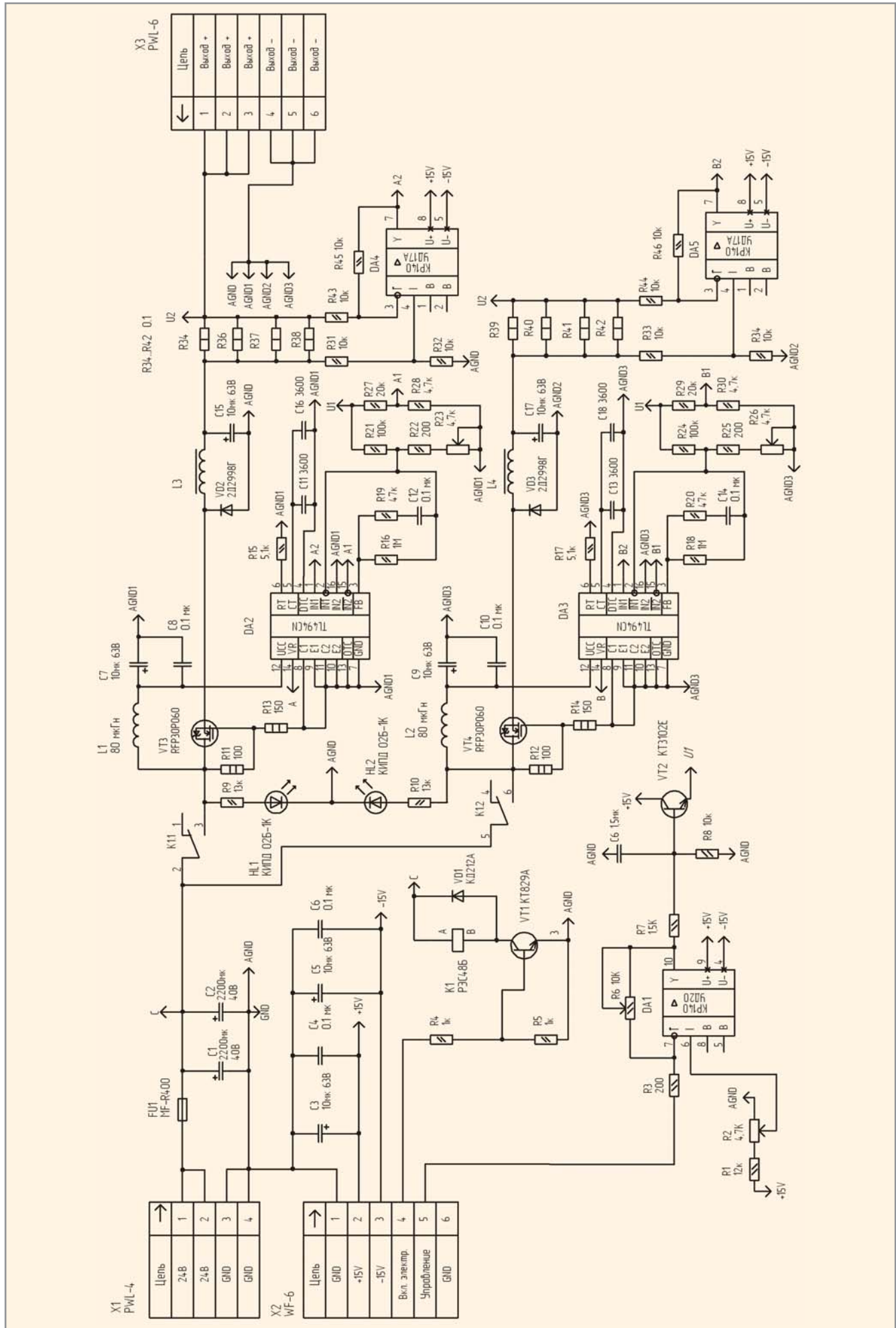


Рис. 1. Принципиальная схема двухканального стабилизатора тока

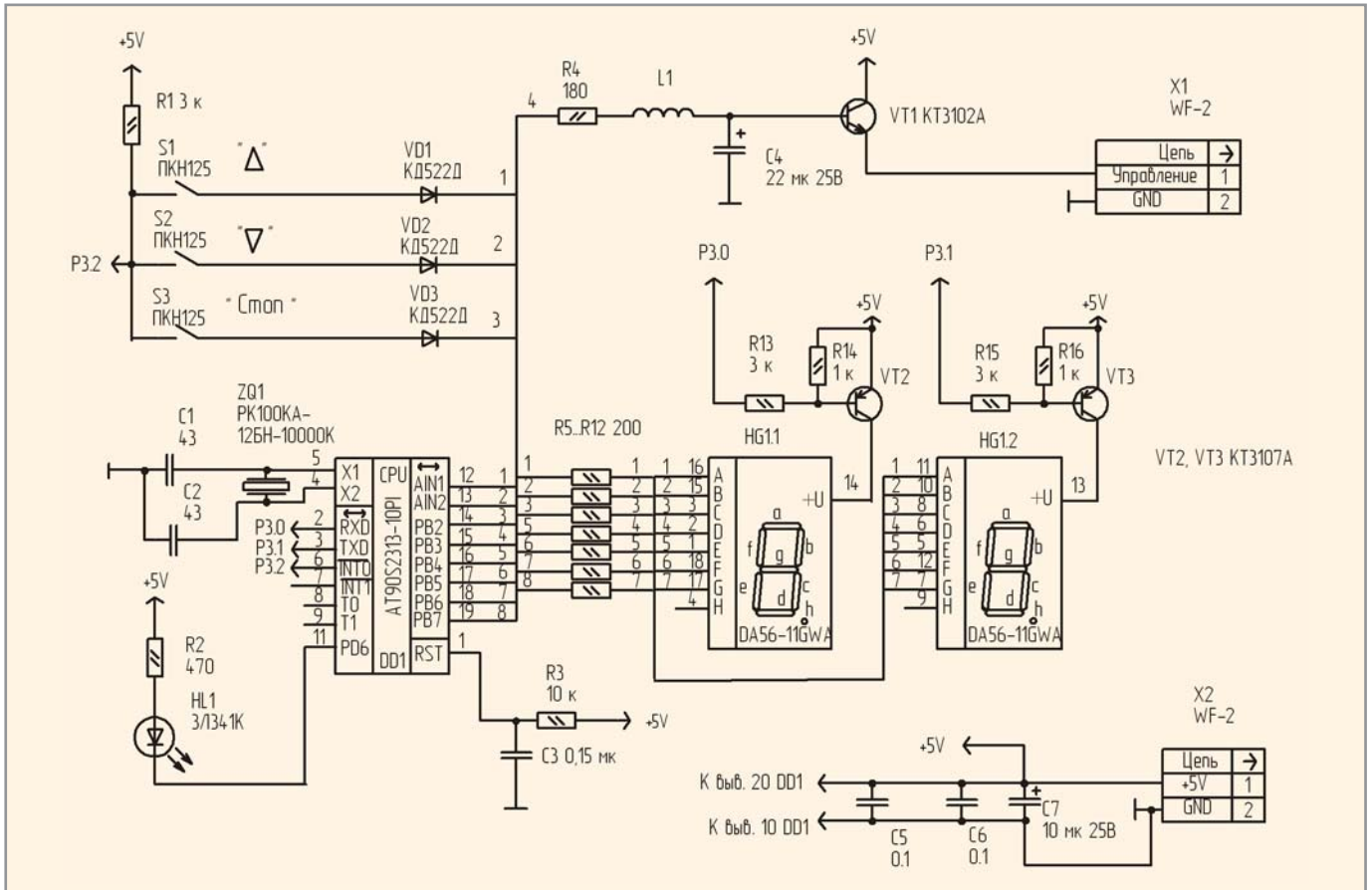


Рис. 2. Принципиальная схема электронного регулятора

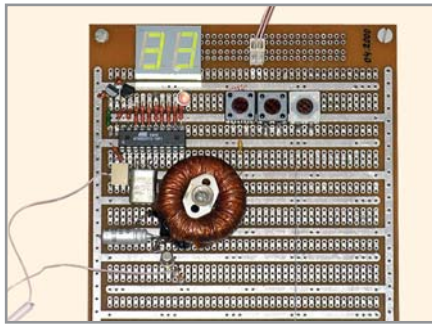


Рис. 3. Макет электронного регулятора



Рис. 4. Внешний вид опытного образца двухканального стабилизатора тока

- S2 (V) – уменьшение на единицу относительного значения выходного напряжения (в %) при удержании данной кнопки в нажатом состоянии более 2 с, значение выходного напряжения, индицируемое на дисплее, уменьшается на 5 единиц за 1 с;
- S3 (C) – выключение регулятора.

Системный сброс микроконтроллера DD1 осуществляется сигналом низкого уровня через цепь R3C3. Сразу после подачи питания индикатор HL1 отключен. На индикаторах HG1, HG2 индицируются нули. Для перевода устройства в рабочий режим необходимо кнопками S1 (A) и S2 (V) установить необходимое значение выходного напряжения. При значении выходного напряжения, отличном от нуля, включается индикатор HL1. Для выключения необходимо нажать на кнопку S3 (C), при этом на выходе регулятора установится нулевое значение выходного напряжения.

Программа микроконтроллера состоит из трёх основных частей: инициализации, основной программы, работающей в замкнутом цикле, и подпрограммы обработки прерывания от таймера T/C0 (соответственно метки INIT, SE1, S0).

Основная программа осуществляет инкремент и декремент заданного значения выходного напряжения ШИМ. В подпрограмме обработки прерывания от таймера T/C0 происходит опрос кла-

виатуры и перекодировка двоичного числа значений времени в код для отображения информации на семисегментных индикаторах и отображения разрядов с динамической индикацией.

В памяти данных микроконтроллера с адреса \$60 по \$61 организован буфер отображения для динамической индикации. В подпрограмме обработки прерывания таймера T/C0 (метка S0) каждый байт из функциональной группы циклически, после перекодировки, выводится в порт В микроконтроллера. Для включения индикаторов HG1, HG2 необходимо установить лог. 0 на выводах 2 и 3 микроконтроллера DD1. Чтобы на индикаторе HG1 индицировалось число «1», необходимо двоично-десятичное число, расположенное по адресу \$60, перекодировать, вывести в порт В микроконтроллера и установить лог. 0 на выводе 2 микроконтроллера DD1. Записывая поочередно в циклическом режиме в порт В микроконтроллера байты из функциональной группы буфера отображения и лог. 0 на соответствующие выводы порта D, мы реализуем режим динамической индикации.

При нажатии на кнопку S1 относительное значение выходного напряжения на дисплее увеличивается на единицу. Одновременно запускается счётчик, организованный на R2 и формирующий интервал 2 с. Если кнопка удерживается более 2 с, значение, индицируемое на дисплее, увеличивается на 5 единиц за 1 с. Интервал времени, в течение которого происходит приращение, организован в R1. При отпускании кнопки S1 все вышеуказанные счётчики обнуляются.

Аналогичным образом организована работа кнопки S2 для уменьшения относительного значения выходного напряжения, индицируемого на дисплее. При нажатии на кнопку S2 текущее значение, индицируемое на дисплее, уменьшается на единицу. Если кнопка удерживается более 2 с, значение, индицируемое на дисплее, уменьшается на 5 единиц за 1 с. Счётчики для кнопки S2 организованы в регистрах R3, R4.

В регистре R22 осуществляется выбор разрядов в динамической индикации. При инициализации в R22 заносится число 0b00000001. При каждом обращении к подпрограмме обработки прерывания единица сдвигается влево, подготавливая включение следующего разряда. В подпрограмме также осуществляется проверка, не вышла ли единица за пределы разрядной сет-

ки, т.е. после числа 0b00000100 в R22 загружается снова 0b00000001. Все флаги, которые используются при работе программы, выполнены на регистрах R24, R25. Назначение каждого флага приведено в тексте программы.

Нетрудно подсчитать, что значение суммарного тока стабилизаторов в диапазоне 6...16 А при инкременте или декременте числа, индицируемого на индикаторах регулятора, изменяется с шагом порядка 100 мА.

Микросхема TL494 позволяет организовать и двухтактный режим работы, т.е. можно обойтись одним корпусом данной микросхемы, а также исключить реле К1 для выключения источника питания, статически управляя ключевыми транзисторами VT3, VT4 с помощью микросхемы TL494. Однако, по соображениям надёжности и безопасности, использованы два независимых канала стабилизатора тока, контроль тока в каждом канале и включение источника питания с помощью реле.

Для защиты стабилизатора тока от перегрузки по току используется самовосстанавливающийся предохранитель FU1 MF-R400 фирмы BORNIS. Уменьшить коммутационные потери и повысить КПД стабилизаторов удалось благодаря использованию диодов Шоттки (VD2, VD3) КД2998Г (постоянное прямое напряжение 0,54 В; средний прямой ток 30 А; диапазон частот 10...200 кГц; импульсное обратное напряжение 35 В).

Стабилизатор тока обеспечивает максимальный КПД порядка 75% при минимальном выходном токе 6 А; КПД при максимальном выходном токе 16 А снижается до 70%.

На рисунке 3 приведена фотография макета электронного регулятора, а на рисунке 4 – фотография опытного образца двухканального стабилизатора тока для электролизера.

В схеме стабилизатора тока дроссели L3, L4 выполнены на двух сложенных вместе кольцевых магнитопроводах МП-140 типоразмером К36 × 25 × 9,7 и содержат 45 витков двойного провода ПЭТВ-2 1,1 уложенных равномерно в два слоя по всему периметру кольца. Между слоями проложены два слоя лакоткани ЛШМС-105-0,06 ГОСТ 2214-78. Индуктивность дросселей порядка 400 мкГн. Конденсаторы С1 – С3, С5, С7, С9, С15, С17 – К50-35; остальные конденсаторы типа К10-17. Микросхему TL494CN можно заменить на

TL494LN или KP1114EY4. Дроссели L1, L2 типа ДМ-0,1-80. Самовосстанавливающийся предохранитель MF-R400 можно заменить на любой другой с аналогичными характеристиками. Диоды VD2, VD3 можно заменить любым диодами Шоттки с аналогичными параметрами, например 20TQ045.

Для уменьшения потерь мощности датчики тока (резисторы R34 – R42) выполнены с минимальным сопротивлением 0,025 Ом каждый. При максимальном токе нагрузки 16 А рассеиваемая на датчиках мощность составляет 3,2 Вт. Резисторы R34 – R42 типа C5-16MB-1 Вт-0,1 Ом ± 1%. Резисторы R2, R6, R23, R26 типа СП5-3 или СП5-2ВА.

Ключевые транзисторы в стабилизаторах VT3, VT4 и диоды VD2, VD3 установлены на отдельных теплоотводах. Площадь эффективной поверхности теплоотвода для транзистора должна быть не менее 100 см<sup>2</sup>, для диода – не менее 40 см<sup>2</sup>.

В схеме электронного регулятора использованы конденсаторы C1, C2, C5, C6 типа K10-17а. Конденсатор C3, C7 типа K50-35, конденсатор C4 типа K50-24. Дроссель L1 выполнен на магни-

топроводе МП140 типоразмером K28 × 16 × 9, обмотка содержит 150 витков провода ПЭТВ-2 0,28. Сдвоенный индикатор HG1 зелёного цвета типа DA56-11GWA. Индикатор HL1 типа ЗЛ341К красного цвета ( $I_{пр} = 10$  mA).

Для обеспечения устойчивой работы стабилизатора тока, при разработке печатной платы следует уделить внимание минимизации электромагнитных излучений. Целесообразно разделить в каждом канале общие проводники ключевого каскада и микросхемы управления (ШИМ-контроллера), а точку их соединения сделать перед выходным соединителем X3.

Настройку целесообразно начинать с формирователя управляющего напряжения, при этом каналы стабилизаторов тока следует отключить (подать лог. 0 на контакт 4 соединителя X2). Далее устанавливаем нулевое значение на индикаторах электронного регулятора и, вращая движок переменного резистора R2, устанавливаем напряжение 2,5 В на эмиттере VT5. Затем устанавливаем максимальное значение (99) на индикаторах электронного регулятора и, вращая движок R6, подстраиваем напряжение на эмиттере VT5 до 5 В.

Проверку и настройку стабилизатора тока можно проводить с резистивной нагрузкой порядка 0,2 Ом, рассчитанной на ток не менее 20 А. Первое включение лучше сделать при минимальном токе 6 А, затем медленно увеличивать ток нагрузки до максимального значения 16 А. Руководствуясь вышеуказанной методикой, можно расширить диапазон изменения выходного тока до 0...16 А, при этом шаг изменения выходного тока увеличится до примерно 160 мА.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. Додека, 1997.
2. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: справочник. Под ред. Г.С. Найвельта. Радио и связь, 1985.
3. Хрусталева Д. Особенности конструирования печатных плат для импульсных источников питания. Схемотехника. 2002. № 12. С. 18–19.
4. Голубцов М.С., Кириченко А.В. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному. СОЛОН-Пресс, 2005.
5. Ежков Ю. Экспоненциальный электронный регулятор громкости. Радио. 1997. № 11. С. 15–16.

