

ПРОСТОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР

Евгений Карпов
[NexTube](#)

В статье рассмотрена возможность применения полупроводниковых стабилизаторов для питания анодных цепей ламповых аудиоусилителей. Приведены результаты сравнительного тестирования двух типов высоковольтных источников питания – классической схемы с выходным LC- фильтром и с полупроводниковым стабилизатором.

Дано полное описание принципиальной схемы стабилизатора и приведен перечень её элементов. Подробно рассмотрена методика налаживания стабилизатора и особенности его конструкции.

Введение

Самый простой усилитель обязательно содержит в себе второе устройство – источник питания. Непосредственно усилителям посвящено множество публикаций, а источники питания находятся в тени, хотя от их параметров существенно зависит итоговый результат. Для твердотельных устройств с относительно низкими напряжениями питания реализация высококачественного источника не представляет особых проблем, за Вас уже подумали производители микросхем. С высоковольтными источниками питания для ламповых усилителей дела обстоят гораздо хуже. Тут образовался некий вакуум. Во-первых, нет подходящих микросхем, непосредственно рассчитанных на работу с высокими напряжениями.

Во-вторых, практически отсутствуют публикации профессиональных разработок, доступных для повторения любителями средней квалификации.

Я попытаюсь частично заполнить этот пробел и попутно решить еще один вопрос – вопрос качества выходных емкостей.

Позволю себе напомнить читателям, что в однотактных усилителях, пожалуй, наиболее популярных у начинающих конструкторов, ток сигнала выходного каскада непосредственно протекает через цепи источника питания [1],[2]. Следовательно, параметры источника (выходное сопротивление, нелинейность и динамика) непосредственно влияют на выходной сигнал.

Совершенно очевиден вывод, если источник анодного напряжения идеальный, а именно, имеет выходное сопротивление равное нулю в широком диапазоне частот и бесконечную энергетiku, то он и не окажет какого-либо влияния на выходной сигнал. К сожалению, ничего идеального нет (разве что, любимая женщина), но никто не запрещает к этому стремиться. Исходя из этой простой предпосылки, и был спроектирован высоковольтный стабилизатор.

Возможные альтернативы

Совершенно естественно выглядит следующая мысль: ламповая схема – ламповый стабилизатор. Но тут существует два «но».

Во-первых, чтобы получить хорошие выходные параметры (низкое выходное сопротивление и хорошую динамику), необходимо иметь высокий коэффициент усиления в петле обратной связи в широкой полосе частот. Такой усилитель сигнала ошибки можно реализовать на лампах, но его вряд ли можно будет назвать простым.

Во-вторых, существует проблема регулирующей лампы. Пригодные для этих целей лампы – дороги и дефицитны.

Путь решения первой проблемы существует, это гибридные схемы. Это вполне разумный подход, но вторая проблема остается.

Можно пытаться использовать для стабилизации высоких напряжений стандартные интегральные стабилизаторы (и такие попытки предпринимаются). Хотя такие стабилизаторы имеют отличные параметры, их использование затруднено малым значением максимального входного (типовое значение 40V) напряжения. Чтобы получить приемлемую надежность, обязательно использование предварительного стабилизатора, снабженного собственными цепями защиты по току. И все равно, надо использовать дополнительные цепи защиты от перенапряжения. Когда все вопросы обеспечения надежности решены, схему уже не назовешь простой.

Теоретически, можно использовать импульсные преобразователи, но, на мой взгляд, приемлемый уровень помех для таких деликатных устройств могут обеспечить только резонансные преобразователи. Такие устройства сложны и дороги.

Меня вообще удивляет тот факт, что с одной стороны, обсуждается вопрос влияния на качество звука коммутационных процессов в выпрямительных диодах, а с другой стороны, делаются попытки использовать импульсные блоки питания. В них на коллекторе силового транзистора и выпрямительных диодах действуют импульсные напряжения с амплитудой в сотни вольт и скоростью нарастания фронтов, достигающей тысяч вольт в микросекунду. При этом длительность импульсов (иногда и частота) модулирована частотой усиливаемого сигнала.

Для решения поставленной задачи я избрал другой путь: просто реализовать линейный высоковольтный стабилизатор, используя все возможности современной элементной базы. В результате, удалось реализовать стабилизатор, содержащий всего три активных элемента и обладающий достаточно хорошими параметрами, чтобы «прикидываться» идеальным в заданной рабочей области.

Тестирование

Прежде чем привести схему стабилизатора, я хочу представить результаты сравнительного тестирования типового источника с индуктивным П-фильтром [3] и источника со стабилизатором (попутно Вы решите, надо ли читать дальше).

Тестирование проводилось по схеме, показанной на рисунке 1.

В качестве тестируемой схемы включался или образцовый LC-фильтр, показанный на рисунке 2, или стабилизатор. Номиналы элементов фильтра выбраны близкими к типичным значениям, в фильтре ис-

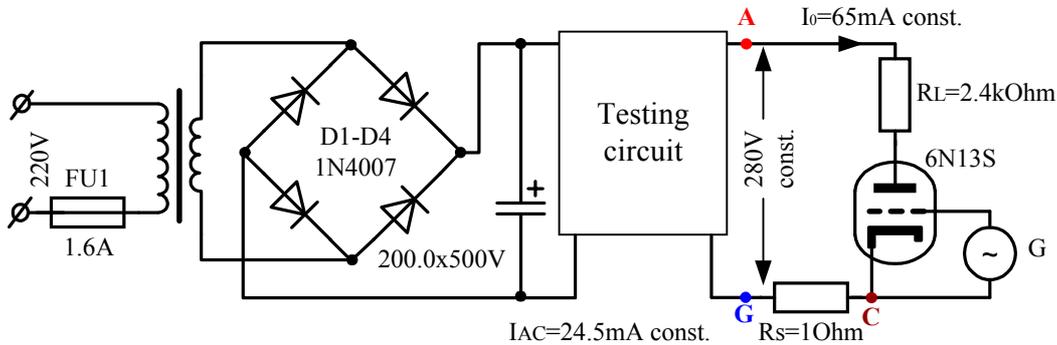


Рисунок 1

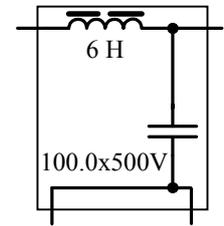


Рисунок 2

пользовалась высококачественная металобумажная емкость умопомрачительных габаритов. Для возбуждения переменной составляющей тока в цепи источника питания использовался каскад на мощном триоде с резистивной нагрузкой, работающий в классе «А» (цепи накала и смещения на рисунке не показаны). Это хорошая модель реальной нагрузки. Для измерения тока покоя и переменной составляющей анодного тока использовался резистор R_s . Все испытания проводились в строго одинаковых условиях (обозначены на рисунке 1).

Контролировались следующие параметры:

1. **Выходное сопротивление.** Измерения проводились следующим образом: устанавливалось значение переменного тока, текущего через источник в 24.5 мА (на первой гармонике), к точкам **G** и **A** подключался селективный вольтметр и измерялась переменная составляющая напряжения. Измерения проводились в диапазоне частот 30Hz÷50kHz (всего было получено 17 точек). По закону Ома вычислялось сопротивление. Результаты измерений показаны на рисунке 3.
2. **Реакция на нагрузку импульсного характера.** Для этой цели на вход каскада подавались прямоугольные импульсы. Размах тока устанавливался максимально возможным, но без отсечки анодного тока. К точкам **G** и **A** подключался осциллограф. Осциллограммы показаны на рисунках 4÷7.
3. **Уровень пульсаций выходного напряжения и общий уровень шумов.** Для этой цели к источнику подключался резистивный эквивалент нагрузки, а к точкам **G** и **A** спектроанализатор. Результаты измерений показаны на рисунках 8 и 9.
4. **Влияние источника на спектр выходного сигнала каскада.** Для этой цели спектроанализатор подключался параллельно датчику тока (к точкам **G** и **C**). Результаты измерений показаны на рисунках 10 и 11.
5. **Коэффициент стабилизации по току нагрузки и входному напряжению** (только для стабилизатора). Результаты измерений приведены в [таблице 1](#).

Для проведения испытаний использовались следующие приборы:

Спектроанализатор	- HP 3585A;
Селективный вольтметр	- Siemens D2008;
Осциллограф	- Tektronix 2425;
Генератор	- ГЗ-118;
Вольтметр	- В7-46/1;
Амперметр	- М1107;

OUTPUT RESISTANCE

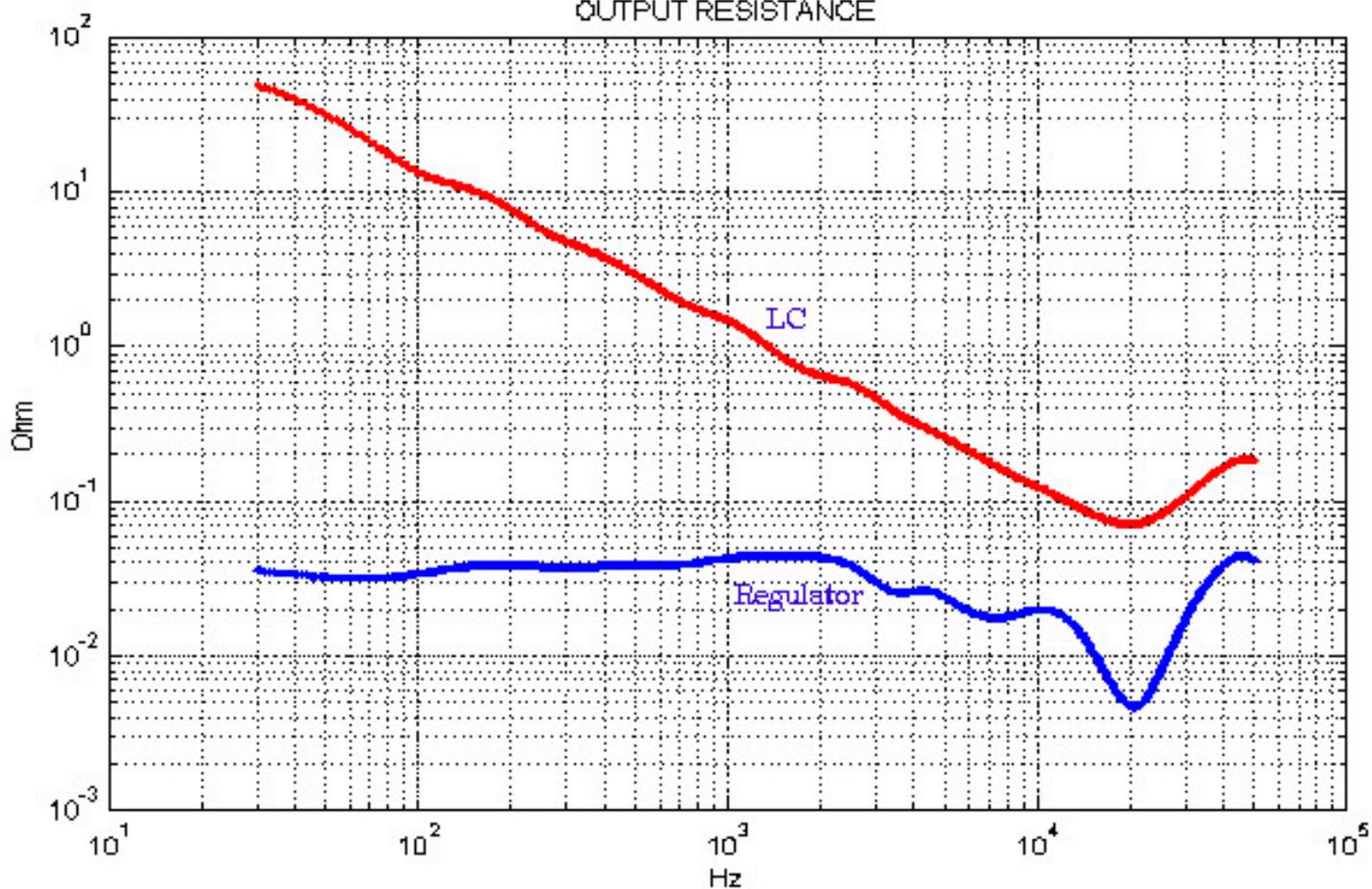


Рисунок 3

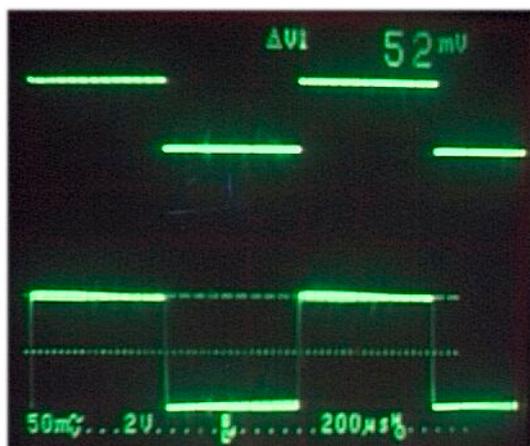


Рисунок 4

Ток нагрузки (нижний луч, стабилизатор)

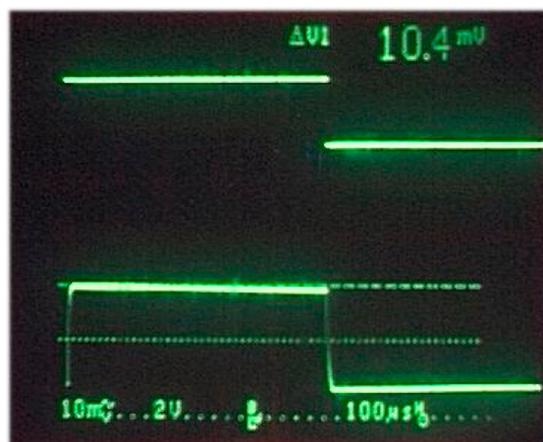


Рисунок 5

Напряжение питания (нижний луч, стабилизатор)

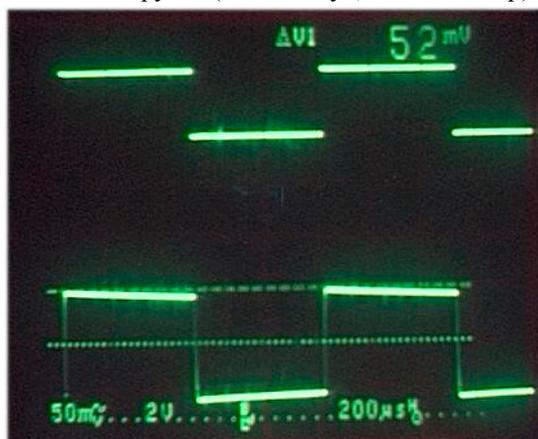


Рисунок 6

Ток нагрузки (нижний луч, LC - фильтр)

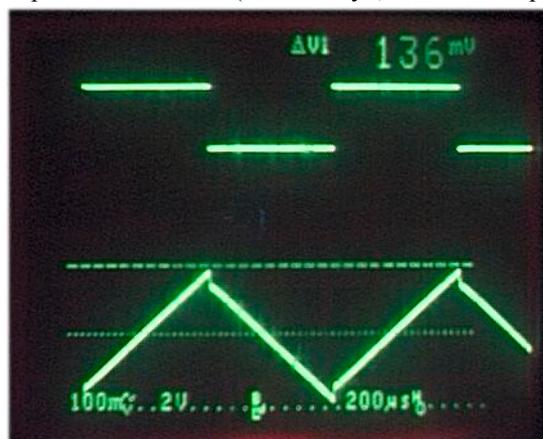


Рисунок 7

Напряжение питания (нижний луч, LC - фильтр)

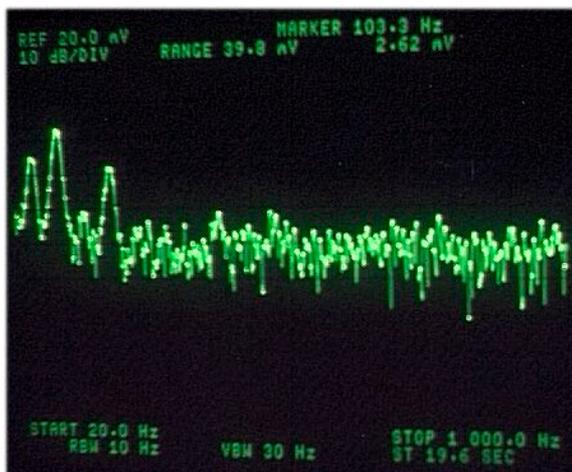


Рисунок 8
Пульсации и шум (стабилизатор)

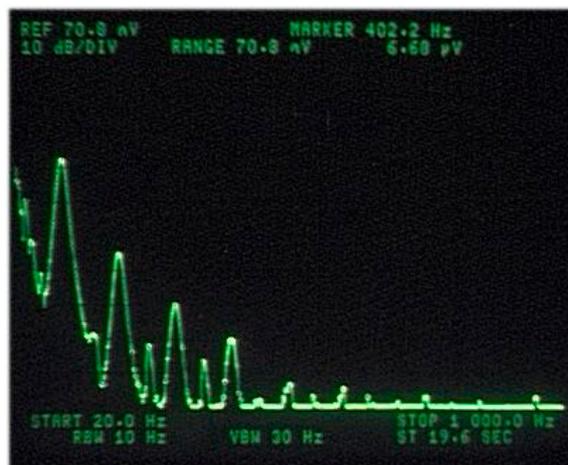


Рисунок 9
Пульсации и шум (LC - фильтр)

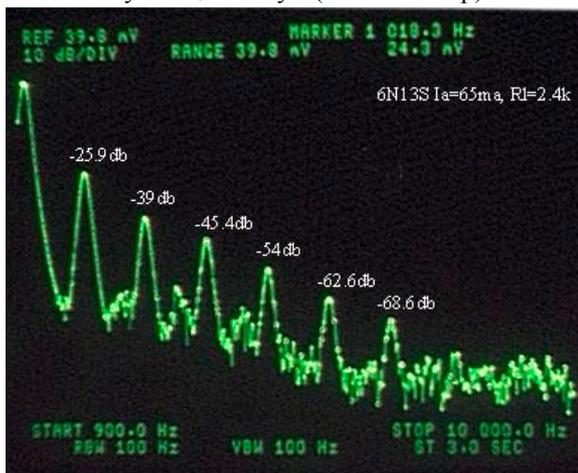


Рисунок 10
Спектр тока нагрузки (стабилизатор)

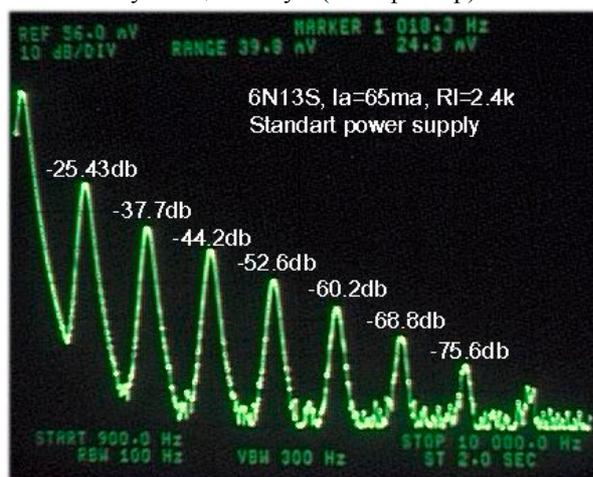


Рисунок 11
Спектр тока нагрузки (LC - фильтр)

Анализ результатов тестирования

На основании полученных результатов можно сделать ряд выводов.

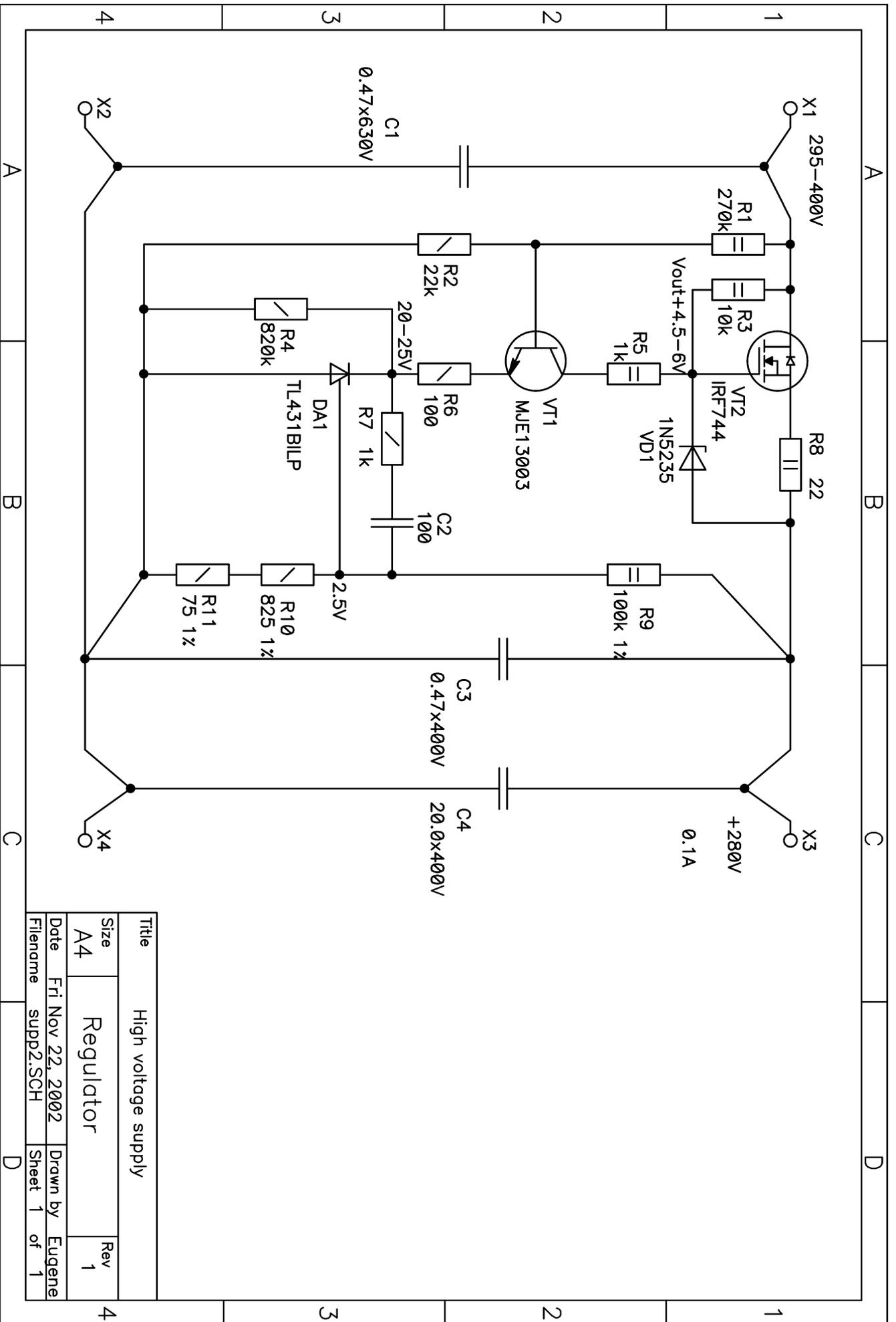
Наибольший практический интерес имеет возможность получения низкого выходного сопротивления в широкой полосе частот. Выходное сопротивление стабилизатора значительно ниже, чем у LC-фильтра, и имеет более стабильный характер. Это позволяет существенно уменьшить влияние источника на выходной сигнал, использовать выходную емкость гораздо меньшего номинала и питать от одного источника два канала усилителя, не уменьшая переходного затухания между каналами.

Реакция стабилизатора на импульсную нагрузку также более благоприятная. На рисунке 6 отчетливо виден скол импульса тока через лампу (нижний луч), возникающий за счет снижения напряжения источника питания (рис. 7). Частота возбуждающих импульсов (верхний луч на рис. 4÷7) равна 1 kHz, на более низких частотах величина скола будет расти.

Величина пульсаций на выходе источника с LC-фильтром и стабилизатором имеет сравнимые значения (ничто не мешает Вам, увеличив индуктивность дросселя, уменьшить уровень пульсаций). Но общий уровень шума на выходе стабилизатора выше, это маленькая ложка дегтя в бочке меда. Но меня, честно говоря, это не особенно смутило, шумовое напряжение на зажимах стабилизатора не превышает 280 микровольт. В реальном усилителе, где использовался такой источник, невзвешенный уровень шума составил -71db.

Существенного различия в спектре тока каскада для источника с LC-фильтром и стабилизатором не наблюдается (кстати, полученные спектры при работе каскада на абсолютно линейную нагрузку, будут интересны тем, кто использует или намеревается использовать лампу 6N13C).

Использование стабилизатора обеспечивает высокое постоянство анодного напряжения, на мой взгляд, это хорошо всегда. Также это позволяет без особого риска использовать лампу близко к предельным режимам.



Title		High voltage supply	
Size	A4	Regulator	Rev 1
Date	Fri Nov 22, 2002	Drawn by	Eugene
Filename	supr2.SCH	Sheet 1	of 1

Рисунок 12

Схема стабилизатора

Основные параметры стабилизатора приведены в таблице 1, температурная и долговременная нестабильность выходного напряжения, в основном, определяются параметрами примененной микросхемы TL431.

Таблица 1

Параметр	Режим измерения	Значение	Единицы
Максимальное входное напряжение (V_{IN})	$I_{LOAD}=0.1A, V_{OUT}=280V$	420	V
Максимальный выходной ток (I_{LOAD})	$V_{IN}=295\div 400V$	0.12	A
Ограничение выходного тока	$V_{IN}=295\div 400V$	$1.5\div 2.5 I_{LOAD}$	A
Выходное напряжение (V_{OUT})	$I_{LOAD}=0\div 0.1A$	280	V
Максимальное падение напряжения на стабилизаторе	$I_{LOAD}=0.1A$	15	V
Нестабильность выходного напряжения от входного	$V_{IN}=295\div 400V, I_{LOAD}=0.1A$	0.35	%
Нестабильность выходного напряжения от тока нагрузки	$V_{IN}=330V, I_{LOAD}=0\div 0.1A$	0.5	%
Подавление пульсаций входного напряжения на частоте 100Hz	$V_{IN}=330V, I_{LOAD}=0.1A$	-51	db
Выходное сопротивление в диапазоне частот 30Hz÷20kHz	$V_{IN}=330V, I_{LOAD}=0.065A$	<0.1	Ω

Схема стабилизатора показана на рисунке 12. Для облегчения повторения и налаживания схемы я кратко опишу назначение её элементов и особенности работы.

Стабилизатор выполнен с последовательным включением регулирующего элемента. В качестве регулирующего элемента использован мощный полевой транзистор VT2, включенный истоковым повторителем.

Для управления проходным транзистором используется своеобразный каскодный усилитель, выполненный на транзисторе VT1 и интегральном стабилизаторе DA1. Этот усилитель имеет два управляющих входа, первым входом является база транзистора VT1, вторым – управляющий вход интегрального стабилизатора. Основное усиление сигнала ошибки, точностные и частотные свойства стабилизатора, в основном, определяются параметрами микросхемы DA1. С делителя напряжения R9÷R11 часть выходного напряжения поступает на управляющий вход DA1, где сравнивается с напряжением опорного источника, встроенного в микросхему. Сигнал ошибки усиливается микросхемой и преобразуется в величину втекающего в нее тока, который управляет транзистором VT1. Фактически, транзистор VT1 транслирует через себя ток DA2 (минус ток его базы), ток преобразуется в напряжение, управляющее проходным транзистором, на резисторах R3, R5. Конечно, резистор R5 уменьшает общее усиление в петле обратной связи, но позволяет разгрузить VT1 по мощности.

Второй вход усилителя используется двояко.

Во-первых, транзистор VT1 для элементов, включенных в цепь эмиттера, является эмиттерным повторителем. Следовательно, задав напряжение с помощью делителя R1, R2 на его базе, мы задаем микросхеме DA1 рабочее напряжение (около 20 V).

Во-вторых, так как делитель R1, R2 подключен непосредственно к входному напряжению стабилизатора, то все возмущающие воздействия (пульсации, например), присутствующие во входном напряжении, поступают в цепь его базы и усиливаются, выделяясь на коллекторной нагрузке R3 (в этом случае транзистор включен в схеме с общим эмиттером). Усиленный сигнал возмущения воздействует на затвор проходного транзистора, а так как его фаза инвертирована, то возникает прямая связь, которая дополнительно стабилизирует выходное напряжение. Хотя глубина этой связи не велика, она действует параллельно и не зависимо от основной петли обратной связи и повышает общий коэффициент стабилизации напряжения.

Цепочка R7, C2 служит для улучшения вида переходного процесса при резких скачках тока нагрузки и предотвращает самовозбуждение.

Цепь защиты от коротких замыканий реализована на резисторе R8 и стабилитроне VD1. Когда сумма порогового напряжения транзистора (напряжение затвор – исток, при котором транзистор начинает отпираться) VT2 и напряжения на резисторе R8 превысят напряжение стабилизации VD1, он начнет отпираться. При этом проходной транзистор совместно с элементами R8, VD1, превращается в источник тока. Величина этого тока сильно зависит от параметров элементов, особенно транзистора (порогового напряжения и крутизны), поэтому точно указать эту величину сложно. Главное другое, что ток не превысит нескольких сотен миллиампер, и проходной транзистор не будет поврежден. Таким образом, стабилизатору не страшны кратковременные перегрузки и замыкания. Однако следует помнить, что в таком режиме на транзисторе выделяется значительная мощность, и при длительной перегрузке произойдет тепловой пробой [4], [5].

Перечень используемых компонентов приведен в [приложении 1](#).

Конструкция стабилизатора

Наилучшим решением будет монтаж всех элементов стабилизатора на печатной плате (емкость С4 можно разместить отдельно). Теплоотводящие поверхности транзисторов VT1, VT2 должны выходить за пределы платы так, чтобы их можно было прикрепить к теплоотводу. Теплоотвод должен рассеять мощность порядка 15W (достаточна площадь 350÷400см²). При конструировании печатной платы Вам необходимо помнить, что усилитель ошибки имеет большое усиление в широкой полосе частот. Поэтому необходимо стремиться делать все проводники минимальной длины и правильно трассировать земляную цепь. Желательно, чтобы топология платы соответствовала показанной на принципиальной схеме. Пример конструкции стабилизатора показан в [приложении 2](#).

Налаживание стабилизатора

Особого налаживания стабилизатор не требует. Первое включение целесообразно делать, плавно повышая напряжение на входе и подключив к выходу стабилизатора эквивалент нагрузки (20÷30% номинальной). Когда стабилизатор войдет в режим, установите на входе 330V и проверьте значения напряжений в точках, отмеченных на принципиальной схеме. Возможно, придется подстроить выходное напряжение (особенно, если в делителе R9÷R11 используются резисторы низкой точности) изменением величины резистора R11.

Самой главной операцией является проверка отсутствия самовозбуждения во всех режимах работы. Возникновение генерации, в общем случае, является первым признаком неудачного монтажа. Для проверки соберите схему, показанную на рисунке 13. Величины сопротивлений определяются по формулам :

$$R1 = \frac{V_{OUT}}{0.07 \div 0.1 * I_{OUT}}, \quad R2 = \frac{V_{OUT}}{0.7 \div 0.9 * I_{OUT}}.$$

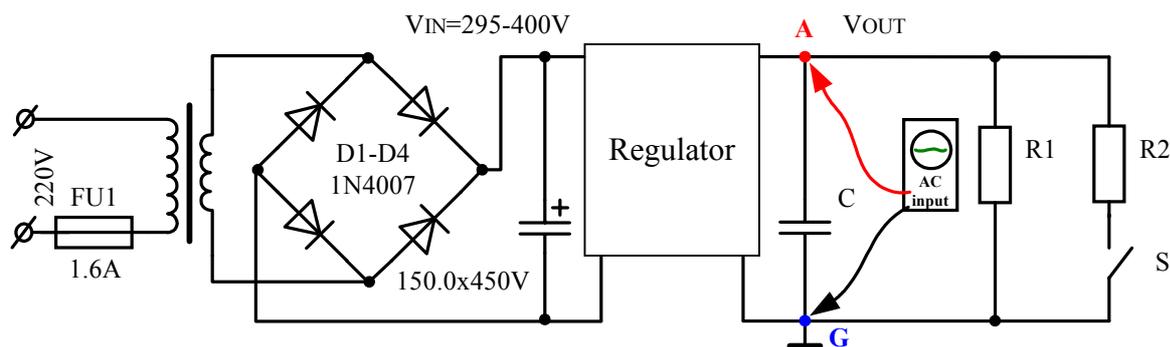


Рисунок 13
Тестовая схема

Внимание, вход осциллографа должен допускать уровень постоянной составляющей, равной V_{OUT}. Установив чувствительность входа порядка 200÷300mV, наблюдайте осциллограмму. На выходе стабилизатора не должно наблюдаться генерации в любом положении ключа S. Установив ждущий режим развертки и периодически коммутируя ключ S, Вы сможете увидеть переходной процесс установки напряжения. В момент коммутации на фронтах могут наблюдаться несколько затухающих колебаний с амплитудой в сотни милливольт. Если в любом из режимов возникает генерация, ее надо устранить. Для устранения генерации первоначально немного уменьшите общий коэффициент усиления, увеличив резистор R5 до 10 kΩ. Если это не поможет, придется подобрать номиналы элементов цепочки R7, C2. Значение емкости надо увеличивать. Когда генерация устранена, увеличивайте величину R7 до возникновения генерации. Установите резистор с сопротивлением приблизительно на 10% меньше. **Имейте в виду, что увеличение значений номиналов корректирующей цепочки ухудшает параметры стабилизатора.**

Изменение выходного напряжения и тока

Максимальное значение выходного тока можно изменить, меняя величину резистора R8. Приблизительный порог начала ограничения тока можно определить по формуле:

$$I_{MAX} = \frac{2.8}{R8(\Omega)} \text{ (A)}.$$

Увеличивая выходной ток, не забудьте соответственно увеличить габариты охладителя.

Для изменения значения выходного напряжения стабилизатора необходимо изменить величину суммы резисторов R10, R11 (в любом сочетании).

$$(R10 + R11) = \frac{2.495 * R9(\Omega)}{V_{OUT} - 2.495 - 4 * 10^{-6} * R9(\Omega)} (\Omega).$$

Если Вы, изменяя выходное напряжение, существенно измените и входное (V_{IN}), необходимо изменить параметры делителя R1, R2. На базе транзистора VT1 должно быть напряжение порядка 15÷20V при номинальном входном напряжении. Ток через делитель выбирается в пределах 1÷1.5 mA.

Изменение выходного и входного напряжения приводит к изменению рассеиваемых мощностей на элементах схемы, не забывайте их контролировать и вносить соответствующие коррекции. При замене типов компонентов обязательно учитывайте их максимальные рабочие напряжения (это относится и к резисторам) и рассеиваемые мощности.

Заключение

Применение этого стабилизатора позволяет частично решить проблему выходной емкости фильтра, исключить применение дросселя (моточные узлы вызывают наибольшие затруднения), повысить общие качественные показатели усилителя. На мой взгляд, его использование целиком оправдано для одноконтурных схем и двухконтурных усилителей, работающих в классе «AB».

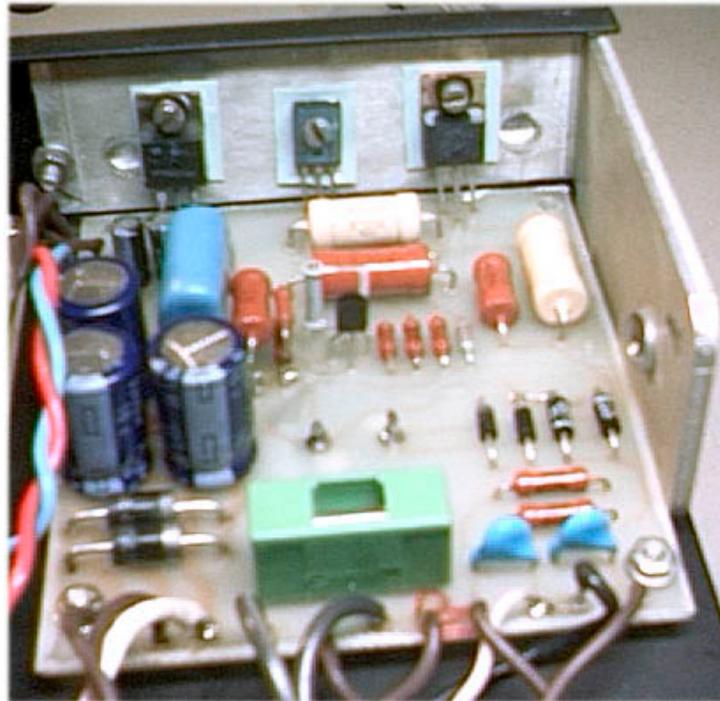
Я надеюсь, что достаточно подробное описание позволит легко повторить стабилизатор даже начинающим любителям.

Литература

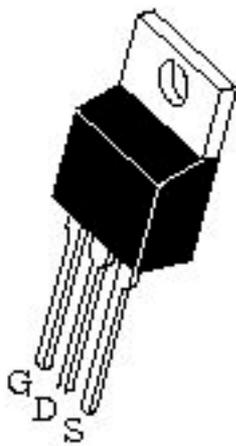
1. Г.В. Войшвилло, [Усилители низкой частоты](#), Связьиздат, 1939.
2. Е.В. Карпов, [Источники питания для ламповой High-End аудио аппаратуры](#), NexTube, 2002.
3. R.W. Landee, D. C. Davis, A.P. Albrecht, Electronic designers' handbook, 1957.
4. С.Д. Додик, Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока, Советское Радио, 1980.
5. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры, Л.А. Краус и др., Энергия, 1980.

Перечень компонентов

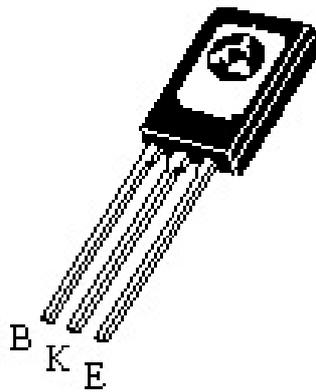
Amount	RefDes	Name	Value	Manufacturer	Part Number	Vendor	Replacement
1	C1	Capacitor	0.47x630V	CDE	DME6P47K		K73-17
1	C2	Capacitor	100	BCcomponents	K101J15C0GF5TH5	Digi-Key #BC1042CT-ND	KM-4
1	C3	Capacitor	0.47x400V	CDE	DME4P47K		K73-17
1	C4	Capacitor	20.0x400V	CDE	OTBE206KNPIR		MBTO
1	DA1	IC		ON Semiconductor	TL431BILP	Digi-Key #296-1292-ND	KP142EH19
1	R1	Resistor	270k	BC Components	5083NW270K0J12AFX	Digi-Key # BC270KW-2CT-ND	MJT-2-5%
1	R2	Resistor	22k	YAGEO	CFR Series 1/4 Watt, 5%	Digi-Key #22KQBK-ND	MJT-0.25-5%
1	R3	Resistor	10k	BC Components	5083NW10K00J12AFX	Digi-Key # BC10KW-2CT-ND	MJT-2-5%
1	R4	Resistor	820k	YAGEO	CFR Series 1/4 Watt, 5%	Digi-Key #820KQBK-ND	MJT-0.25-5%
1	R5	Resistor	1k	BC Components	5083NW1K000J12AFX	Digi-Key # BC1KW-2CT-ND	MJT-2-5%
1	R6	Resistor	100	YAGEO	CFR Series 1/4 Watt, 5%	Digi-Key #100QBK-ND	MJT-0.25-5%
1	R7	Resistor	1k	YAGEO	CFR Series 1/4 Watt, 5%	Digi-Key #1.0KQBK-ND	MJT-0.25-5%
1	R8	Resistor	22	BC Components	5083NW22R00J12AFX	Digi-Key # BC22W-2CT-ND	MJT-2-5%
1	R9	Resistor	100k 1%	BC Components	PR02, 2W, 1%		C2-23-2-1%
1	R10	Resistor	825 1%	YAGEO	MFR Series, 1/4W, 1%	Digi-Key # 825XBK-ND	C2-23-0.25-1%
1	R11	Resistor	75 1%	YAGEO	MFR Series, 1/4W, 1%	Digi-Key # 75XBK-ND	C2-23-0.25-1%
1	VD1	Diode		Microsemi Corp.	1N5235	Digi-Key # 1N5235BDICT-ND	KC170A



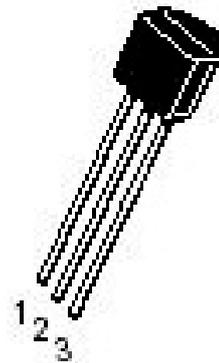
Вид на монтаж стабилизатора



IRF744



MJE13003



TL431

Pin 1. Reference
2. Anode
3. Cathode

Расположение выводов элементов