

Ц 76

С-218

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1708



Ю.В. Сафрошкин

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

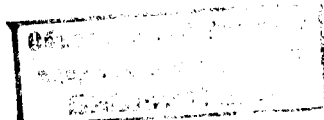
НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

1964

Ю.В. Сафрошкин

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

2651/3 чр.



Стабилизатор последовательного типа с простой самозащитой^{х)}

Основой принципиальной схемы источника питания, которая приведена на рис. 1, является последовательный стабилизатор, работающий следующим образом. T_3 и T_4 образуют составной регулирующий триод. Маломощные каскады на T_1 и T_2 работают как усилители с общим эмиттером. Начальный ток эмиттера T_3 задается сопротивлением R_8 (малая величина), начальный ток коллектора T_2 — сопротивлением R_8 , начальный ток коллектора T_1 — сопротивлением R_6 и входным напряжением T_2 , а также входным током T_2 . Все три каскада схемы (составной триод считаем за один) сфазированы таким образом, чтобы главная обратная связь была отрицательной, а токи во всех триодах в режиме стабилизации изменялись синхронным образом (увеличивались или уменьшались одновременно).

От типовой последовательной схемы без дополнительного источника питания, показанной для сравнения на рис. 2, данная схема отличается лишь обратной полярностью T_2 и подключением опорного диода к верхней отрицательной выходной шине. Однако эти простые меры значительно улучшают характеристики стабилизатора, а именно:

1. Коэффициент стабилизации по сети повышается за счет ослабления связи базы T_3 с отрицательной входной шиной.
2. Схема обладает внутренней быстродействующей защитой от коротких замыканий на выходе. Действительно, чтобы обесточить все триоды, достаточно обесточить T_1 . При замыкании выходных клемм база и эмиттер последнего оказываются эквипотенциальными, ток же коллектора уменьшается до малой остаточной величины, определяемой температурным током. Во всех остальных триодах и на выходе токи уменьшаются до уровня тепловых, и схема, таким образом, самоблокируется.

Началом регенеративного выключения при перегрузках схема обязана насыщению T_4 и большой нелинейности обратной вольт-амперной характеристики стабилизатора D_5 при малых токах. Уровень выходного напряжения, при котором происходит выключение, определяется опорным напряжением (см. нагрузочные характеристики на рис.3).

^{х)} Схемы стабилизаторов подобного типа см. также:

1. Труды 5-й конференции по ядерной электронике. т.2, ч.2. М., Госатомиздат, 1963 .стр.160.

2. R. Marshall , A. Transistor Voltage Regulator with Inherent Short-Circuit Protection. Electg. Eng., v.35, N=420, Febr. 1963, p. 106-108.

Остаточный ток порядка 0,1-0,2 от номинального в выключенном состоянии может быть получен легко. Его дальнейшее уменьшение осуществляется посредством уменьшения сопротивлений R_7 , R_8 и возможного запирания базовых цепей от отдельного вспомогательного выпрямителя. Обратное включение схемы после ликвидации короткого замыкания производится пусковой кнопкой K_2 или полным кратковременным снятием нагрузки.

Приведенные на рис. 1 номиналы соответствуют нерегулируемому варианту источника постоянного напряжения 15 вольт при токе нагрузки от 0 до 1 ампера. Схема имеет следующие показатели: а) коэффициент стабилизации по сети не меньше 200; б) пульсации выходного напряжения не больше 3 мВ ампл.; коэффициент ослабления пульсаций - около 500; в) выходное сопротивление в режиме стабилизации не больше 0,03 ом. Нагрузочные характеристики приведены на рис. 3 (кривые 1). При перегрузках выше 2-3 а схема устойчиво выключается. Данные по температурному дрейфу не приводятся, поскольку источник предназначен для использования в нормальных комнатных условиях. Возможности термокомпенсации такие же, как и у большинства остальных схем. Для получения других номиналов выходного напряжения требуется изменить величины сопротивлений R_{1-3} , а также параметры выпрямителя. Возможна плавная регулировка изменением R_1 .

Для сравнения приведем показатели эквивалентной по сложности и выходным напряжению и току типовой последовательной схемы (рис. 2): а) коэффициент стабилизации по сети около 50; б) коэффициент ослабления пульсаций около 120; в) выходное сопротивление около 0,06 ом. Нагрузочные характеристики приведены на рис. 3 (кривые 2). При коротких замыканиях и отсутствии специальной защиты регулирующей триод, как правило, выходит из строя.

Схему рис. 1 целесообразно использовать при построении источников питания среднего класса точности (порядка 0,5%) с выходными напряжениями от 6 до 20 в. Повышение напряжения выше 20 в возможно при использовании более высоковольтных триодов T_1 и T_2 .

Стабилизатор последовательного типа со сложной самозащитой

Недостатками схемы рис. 1 являются: а) зависимость порога ограничения выходного тока от уровня входного напряжения, мощности выпрямителя и величины отношения $U_{но}/U_{оп}^x$; б) воздействие на маломощные триоды T_1 и T_2 в случае короткого замыкания полного напряжения выпрямителя. Этих недостатков лишена другая источник питания последовательного типа, принципиальная схема которого приведена на

- х) $U_{но}$ - номинальное (максимальное расчетное) выходное напряжение,
 $U_{оп}$ - напряжение опорного источника.

рис. 4. Суммарная его погрешность - порядка 0,1% и меньше при изменении напряжения сети на 10%, тока нагрузки - от минимального до максимального и температуры окружающей среды - на 30°C. Подобные стабилизаторы обычно проектируются с дополнительным выпрямителем и термокомпенсирующими диодами. Рассматриваемая схема отличается от типовой последовательной (см. рис. 5) следующими особенностями: а) маломощная ступень составного триода заменена триодом обратной полярности, работающим по схеме с общим эмиттером; б) источник опорного напряжения и эмиттер первого усилительного триода подключены непосредственно к отрицательной выходной шине.

Для нормальной работы схемы рис. 4 нужны два выпрямителя: основной - на диодах $D_{3,4}$ и маломощный вспомогательный - на диодах $D_{1,2}$. Источник опорного напряжения - термокомпенсированный на стабилизаторах D_{7-10} . Разностный сигнал сравнения выходного и опорного напряжений, снимаемый с измерительного делителя R_3, R_5 , усиливается предварительными маломощными каскадами на триодах T_1, T_2 и затем поступает в базу составного триода T_3, T_4 . Начальный рабочий ток коллектора T_1 задается напряжением на опорном стабилитроне D_7 и сопротивлением R_8 . Начальные токи T_2 и T_3 задаются напряжением на стабилитроне D_5 и сопротивлениями R_7 и R_8 . Использование независимого источника положительного смещения базовых цепей составного триода способствует эффективному отводу тепловых токов и более надежной фиксации выключенного состояния источника. Триоды T_1 и T_2 работают при пониженном напряжении коллектор - эмиттер (порядка 2 в). На усилительных свойствах каскадов в режиме стабилизации снижение коллекторного напряжения сказывается незначительно.

Включение элементов по схеме рис. 4 позволяет совместить в некоторых из них по несколько функций одновременно. Так, диоды D_{7-10} выполняют функции термокомпенсированного источника опорного напряжения и обеспечивают рациональное питание каскадов на T_1 и T_2 (задаются начальные токи при малой потере усиления и облегченных режимах всех маломощных цепей предварительного усилителя). Кроме того, диоды D_{3-10} совместно с триодом T_4 и сопротивлениями $R_{3,4,5,8}$ принимают участие в формировании специальной нагрузочной характеристики, исключающей возможность выхода из строя триодов T_3 и T_4 как при малых и промежуточных перегрузках, так и при коротких замыканиях. Общий вид нагрузочной характеристики приведен на рис. 6 (кривая 1). Ограничение выходного тока на уровне I_n при уменьшающемся сопротивлении нагрузки обусловлено ростом базового напряжения T_3 и насыщением T_2 . Сопротивление R_8 нужно не для получения эффекта ограничения, а для уменьшения разброса I_n от образца к образцу (без него разброс определяется входными характеристиками T_3 и T_4 и может составлять 30%). При достигнутом ограничении

тока и продолжающемся уменьшении $R_{\text{н}}$ выходное напряжение уменьшается до некоего уровня $U_{\text{п}}$, после которого происходит регенеративное выключение схемы, сопровождающееся скачкообразным уменьшением выходного тока до малого остаточного уровня I_1 . Величина I_1 , равно как и $U_{\text{п}}$ и $I_{\text{п}}$, поддаются преднамеренной независимой регулировке путем выбора определенного сочетания номиналов элементов схемы. Участок уменьшения тока нагрузки характеристики I также по выбору может быть сделан регенеративным или обратимым принудительным. Другими словами, могут быть реализованы варианты с самостоятельным включением в режим стабилизации после устранения перегрузки или с принудительным включением путем вмешательства оператора.

Сопротивление R_6 , благодаря своему положению в схеме, позволяет совместно с R_9 осуществлять компенсацию нагрузочной характеристики в режиме стабилизации (изменение выходного напряжения с изменением тока нагрузки может быть уменьшено до нуля).

Схемы рис. 4 и 5 имеют следующие сравнительные параметры, измеренные на образцах с одинаковыми триодами и близкими номиналами деталей, одинаковыми выходными напряжением и током (второй столбец относится к типовой последовательной схеме):

коэффициент стабилизации по сети	около 2000	около 3000
коэффициент сглаживания пульсаций	около 4000	около 5000
выходное сопротивление	около 0,002 ом	около 0,015 ом.

По температурным характеристикам обе схемы одинаковы. В обеих для улучшения температурной стабильности первые усилительные каскады могут быть выполнены в балансном варианте. В схеме рис. 5 при коротких замыканиях и отсутствии специальной защиты регулирующий триод неизбежно выходит из строя. Ее нагрузочные характеристики для сравнения приведены на рис. 6 (кривые 2).

Резюмируя, подчеркнем еще раз достоинства схемы рис. 4 с точки зрения проектирования унифицированной серии низковольтных источников питания:

1. Порог ограничения тока нагрузки не зависит от уровня сетевого напряжения, мощности силового выпрямителя и номинала выходного напряжения;
2. выключенное состояние мало зависит от этих же факторов, а также от состояния цепи нагрузки;
3. облегченные стационарные режимы маломощных каскадов также не зависят от всех вышеперечисленных факторов;
4. для получения любого стабилизированного напряжения на выходе, практически,

от нуля до пятидесяти вольт, в пределах ресурсов силового выпрямителя и триода, необходимо изменение одного сопротивления R_6 .

5. добавлением одного токоизмерительного сопротивления реализуется стабилизатор тока с возможным диапазоном изменения выходного напряжения от нуля до пятидесяти вольт.

Источники питания на выходные напряжения 150 и 300 в

При напряжениях выше 100 в к замене ламповых стабилизаторов полупроводниковыми многие относятся осторожно ввиду низких допустимых напряжений мощных серийных триодов и особенно ввиду малой их стойкости к перегрузкам по напряжению, неизбежным при длительной работе источника питания. В то же время есть серьезный стимул для внедрения полупроводниковых приборов в этом направлении, а именно - низкий КПД ламповых стабилизаторов. Несмотря на то, что стабилизированный выпрямитель является преобразователем энергии переменного тока в постоянный, такой важнейший параметр преобразования, как КПД, в паспортах ламповых источников питания, выпускаемых ныне промышленностью в массовых количествах, даже не приводится, ввиду его крайне низких значений (от 0,1 у источников класса 0,1% ВС-11 и др. до 0,2-0,25 - у источников класса 0,5% УИП-1, СВК и др.).

Рассматриваемые ниже полупроводниковые источники питания на стандартные "ламповые" напряжения решают указанную задачу. Источники построены на базе двухконтурного стабилизатора, отличающегося от параллельного пониженным напряжением питания регулирующего триода и использованием нелинейного балластного элемента. Это позволило совместить ряд противоречивых, но важных требований: а) высокие выходные напряжение и мощность; б) надежность в эксплуатации; в) хорошие электрические параметры и КПД; г) простота схемы. Ниже даны краткие технические характеристики источников.

Источник питания на 300 в

напряжение сети	220 в +5%, -10%, 50гц
выходное напряжение	300 в
ток нагрузки в режиме стабилизации (при изменении напряжения сети в полном диапазоне)	от 0,15 до 0,4 а
номинальный КПД (напряжение сети 220 в, ток нагрузки 0,4 а)	60%
коэффициент стабилизации по сети	не меньше 1000
выходное сопротивление	не больше 0,1 ом
пульсации и шум на выходе	не больше 1 мв пик

дрейф выходного напряжения (за 24 часа в произвольном режиме при комнатной температуре) не больше 0,1%
 диапазон рабочих температур $20 \pm 15^\circ\text{C}$

средства защиты обеспечивают автоматическое отключение источника от сети при коротких замыканиях на выходе; в таких случаях полупроводниковые приборы и все остальные элементы схемы сохраняют полную работоспособность, а источник готов к повторному включению после устранения короткого замыкания.

Источник питания на 150 в
 напряжение сети $220 \text{ в} \pm 10\%$, 50 гц
 выходное напряжение 150 в
 ток нагрузки в режиме стабилизации от 0 до 0,6 а
 (при изменении напряжения сети в полном диапазоне)
 выходное сопротивление не больше 0,05 ом
 остальные параметры такие же, как у источника на 300 в

Оба источника имеют, по существу, одну принципиальную схему (рис.7)^x, которая работает следующим образом. Стабилизация выходного напряжения осуществляется за счет меняющегося (в зависимости от возмущений) тока силового триода T_4 и пропорционального току перепада напряжения на балластном элементе L_1 , который является общим для контура нагрузки и регулирующего контура. Пониженное напряжение питания последнего (коллектор T_4 через вспомогательный диод D_3 подключен к нижней секции выпрямителя) дало возможность значительно снизить требования к допустимым напряжению и мощности триода и повысить КПД стабилизатора. Использование нелинейного балластного элемента - лампы накаливания - позволило дополнительно снизить требования к T_4 по максимальному току и мощности примерно в полтора раза и повысить КПД по сравнению с таким же стабилизатором, использующим в качестве балластного элемента линейное активное сопротивление. В режиме стабилизации L_1 работает при перепадах напряжения в 5-10 раз меньших номинального, то есть с очень слабым накалом, и срок ее службы близок сроку службы мощных остеклованных сопротивлений, нелинейным заменителем которых она и является. Двухсекционные выпрямитель и фильтр, необходимые для работы стабилизатора, не требуют принципиальных усложнений по сравнению с обычным мостовым выпрямителем, если не считать дополнительных выводов от вторичной обмотки трансформатора и разделения одной фильтрующей емкости на две с меньшими рабочими напряжениями. Начальные коллекторные токи маломощных усилительных триодов T_1 и T_2 задаются сопротивлениями R_{10} и R_4 . Необходимое для непосредственной связи согласование потенциалов
 x) На рис.7 приведены номиналы источника на 300в. Источник на 150в имеет следующие отличия: $w_1=480$ ПЭВ 0,74; $w_2=92$, $w_3=130$ ПЭВ 0,74; $w_4=85$ ПЭВ 0,16; $D_{1,2,3}$ - типа Д302; $D_{4,5}$ - типа Д205; $D_{10,11,12}$ - отсутствуют; B_c - на 120 в; $C_1=800,0$; $C_2=450,0$; $C_3=200$ мф; $C_5=150$ мф; $R_1=50$ ом; $R_4=51$ ком; $R_6=0,5$ ком; $R_7=5,6$ ком; $R_9=2,0$ ком; $R_{11}=620$ ом.

лов осуществляется соответствующим подключением к диодам первого каскада параметрического стабилизатора. Начальный ток буферного эмиттерного повторителя T_3 задается сопротивлением R_3 и превышает наибольший неуправляемый ток базы T_4 . Разностный сигнал сравнения выходного напряжения и опорного, снимаемого со второго каскада параметрического стабилизатора, поступает на базу T_1 с измерительного делителя. В верхнем плече делителя имеются: B_c - батарея кремниевых или газовых стабилитронов для уменьшения дифференциального сопротивления; R_6 - термосопротивление, осуществляющее компенсацию температурного дрейфа опорных диодов и B_c ; R_7 - добавочное подстроечное сопротивление, необходимое для точной установки выходного напряжения на заданный уровень. Емкость C_4 уменьшает сопротивление делителя в переходных режимах и одновременно способствует устойчивости усилителя (с точки зрения частотной коррекции оптимальная величина C_4 - около 2000 пф). Последней цели служат и повышенные свойства, частотные характеристики триода во втором каскаде.

В двухконтурном стабилизаторе так же, как и в параллельном, при коротких замыканиях на выходе силовой триод обесточивается. Имеющаяся несложная защита источников выполняет ряд второстепенных функций. Пусковая кнопка K_1 и самоблокирующееся по сети реле P , замедленное по срабатыванию на время прогрева нити балластной лампы, защищают силовой триод от перенапряжений в момент включения, а также силовой выпрямитель, трансформатор и балластную лампу от длительных тепловых перегрузок (путем отключения блока от сети). На небольшой промежуток времени от замыкания на выходе до отпускания реле триоды T_3 и T_4 оказываются подключенными в инверсном направлении к верхней секции выпрямителя. Делитель R_3 - обратное сопротивление диода D_3 предназначен для снижения обратного напряжения на триодах до безопасной величины. Сопротивление R_1 , замыкаемое контактами кнопки отключения K_2 , обеспечивает быстрый разряд выходных емкостей при выключении блока и исключает возможность произвольного повторного пуска в режиме холостого хода за счет остаточного заряда этих емкостей. Плавкий предохранитель разрывает цепь сетевой обмотки при коротких замыканиях в цепях трансформатора, силового и вспомогательного выпрямителей и фильтров. Вероятность этого достаточно мала. В случае "мгновенного" замыкания выходных клемм емкость C_4 , заряженная до уровня стабилизируемого напряжения, разряжается через эмиттерный переход T_1 . Сопротивление R_8 ограничивает ток разряда безопасным, но не очень малым (чтобы не терять усиления) уровнем.

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости наибольшего и наименьшего токов нагрузки в режиме стабилизации от напряжения сети для обоих типов источников. Критерием определения границ области стабилизации являются резкое увеличение пульсаций и ухудшение стабилизирующих свойств схемы, обусловленные потерей усилительных свойств силового триода в состояниях отсечки и насыщения. Из этих зависимостей, в частности, следует, что при напряжениях сети выше 200 в источники

могут отдавать ток нагрузки больше номинального. Требуется лишь соответствующим образом рассчитать силовой выпрямитель. В таких случаях дополнительно облегчается режим силового триода и увеличивается КПД, что выгодно отличает двухконтурную схему от последовательной. Вариант источника на 300 вольт имеет более узкий диапазон тока нагрузки с тем, чтобы наибольшее возможное напряжение на T_4 не превысило допустимой по паспорту величины 60 в. Практически наибольшее напряжение 54-56 в достигается при минимальном напряжении сети и номинальном токе нагрузки. Расширение диапазона тока нагрузки нецелесообразно с энергетической точки зрения, ибо ведет к снижению КПД; кроме того, неразумно эксплуатировать мощный источник питания при токах нагрузки, составляющих малую долю от номинального. Выгоднее другой путь - менять номинальный ток нагрузки, изменяя величину балластного сопротивления (путем переключения или добавления его секций). Этот способ не приводит к увеличению напряжения на силовом триоде и к ухудшению КПД. Следует заметить, что полное отключение нагрузки для источника 300 в не опасно. В таких случаях, как следует из зависимости $I_{н\text{ мин}}(U_{н})$ (рис. 8-б), при $U_{н} > 217$ в только нарушается стабилизация за счет насыщения T_4 . Стабилизация и качество постоянного напряжения на выходе снова восстанавливаются с восстановлением нагрузки. Каких-либо других последствий сброс тока нагрузки не вызывает.

На рис. 9 приведена зависимость КПД источника на 300 вольт и для сравнения - такая же зависимость для серийного лампового стабилизатора УИП-1 (кривые 1 и 2, соответственно). Напряжение сети в обоих случаях номинальное - 200 в. Несмотря на то, что стабилизатор УИП-1 построен по последовательной схеме, в принципе более экономичной, неизбежные потери мощности на накал ламп за счет более низкого, по сравнению с транзисторами, КПД анодных цепей ламп настолько велики, что результирующий КПД лампового источника не менее, чем в два раза ниже при любых токах нагрузки. Интересно сравнить другие общие технико-экономические показатели обоих источников (такое сравнение не достаточно полное, поскольку по назначению эти источники не совсем эквивалентны).

	ламповый источник УИП-1	полупроводниковый источник на 300 в
класс точности	1%	0,1%
номинальная мощность	360 вт	120 вт
мощность, потребляемая в номинальном режиме	1400 вт	200 вт
номинальный КПД	0,25	0,8
габариты	480x380x280 мм ³	320 x 120 x 140 мм ³
полезная удельная объемная мощность	10 вт/дм ³	15 вт/дм ³
вес	45 кг	около 8 кг
стоимость	360 руб.	около 50 руб.

Главная погрешность, определяющая класс высокоточных источников питания, связана с температурным и временным дрейфом. На рис. 10 приведена диаграмма, отражающая дрейф выходного напряжения одного из экземпляров источника на 150 в за 40 часов непрерывной работы. Измерения проводились компенсационным способом с помощью самописца ЭПП-09 и внешнего эталонного напряжения в условиях естественных колебаний напряжения сети от 205 до 230 вольт. Нагрузкой источника являлось активное сопротивление 300 ом.

На рис. 11 приведена аналогичная диаграмма дрейфа источника на 300 в за 24 часа работы в условиях искусственного изменения режима. Запись начата через 15 минут после включения источника в сеть 210 в при токе нагрузки 0,4 а. Далее режим менялся следующим образом; t_1 - ток уменьшен до 0,2 а; t_2 - напряжение сети увеличено до 230 в, а ток нагрузки - до 0,4 а; t_3 - ток уменьшен до 0,08 а, напряжение - до 220 в. На обеих диаграммах легко усматриваются две различные компоненты дрейфа. Дрейф, связанный с изменением режима, в конечном счете обусловлен неточной термокомпенсацией и представляет предел, снизить который трудно из-за различных температурных зависимостей напряжения на опорных диодах, B_c и компенсирующем сопротивлении R_c . Без последнего эта составляющая увеличивается в несколько раз. Медленное монотонное изменение выходного напряжения, не зависящее от режима, связано со старением газовых стабилитронов и равно в среднем 2-4 мв/час по наблюдению за 200 часов непрерывной работы. Если в качестве B_c использовать высоковольтные кремниевые стабилитроны, то временной дрейф, связанный со старением, практически исключается.

Конструктивное выполнение обоих источников одинаковое. Внешний вид приведен на рис. 12.

Рассмотренные источники представляют одно из возможных решений упомянутой проблемы замены малоэкономичных ламповых выпрямителей на полупроводниковые. На их примере можно оценить "экономический эффект", ожидаемый от подобной замены. Для сравнения снова возьмем УИП-1, который, хотя и является дорогим регулируемым мощным источником, для питания экспериментальной аппаратуры используется в настоящее время наиболее широко. На 20 кат выпрямленной стабилизированной мощности (масштаб потребностей ЛВЭ ОИЯИ) основные затраты по источникам УИП-1 составляют 20.000 руб, по полупроводниковым источникам - 8.400 руб. Расход электроэнергии, из расчета эксплуатации 300 дней в году по 7 часов и цены 4 коп/квтч, а также КПД 0,25 и 0,5, составит в денежном выражении 6.720 и 3.360 рублей, соответственно. Экономия основных затрат - 11.600 и на электроэнергии - 3.360 рублей в год. Значительно больший срок службы полупроводниковых приборов способствует дальнейшему снижению эксплуатационных затрат.

Источники питания с глубокой регулировкой напряжения

Рассматриваемые источники представляют собой два родственных стабилизированных выпрямителя среднего класса точности и предназначены для использования в нормальных лабораторных условиях. Ниже приведены их электрические параметры. Цифры первого столбца относятся к источнику с максимальным напряжением 80 в, второго столбца — к источнику с максимальным напряжением 30 в.

Напряжение сети	220 в ± 10%, 50 Гц
Диапазоны регулировки напряжения	2-30, 30-80 в 1-15, 15-30 в
Ток нагрузки	от 0 до 0,5 а от 0 до 1 а
Коэффициент стабилизации	не меньше 500
Выходное сопротивление	не больше 0,02 и 0,01 ом
Пульсации выходного напряжения	не больше 1 мв пик.

Оба источника выполнены по одной принципиальной схеме, приведенной на рис. 13^х). Основной схемой является стабилизатор параллельного типа с переменной гасящей нагрузкой (комбинация сопротивлений R_1, R_2 и переключателей Π_1, Π_2) и нелинейным балластным сопротивлением (лампа накаливания). Такой выбор сделан по ряду причин.

Прежде всего потому, что параллельная схема обеспечивает наибольший диапазон регулировки выходного напряжения. Максимальное напряжение определяется падением напряжения на насыщенном триоде T_4 и при отборе триодов по указанному признаку может быть снижено до 0,5 в. Максимальное напряжение, которое можно получить от схем такого типа, равно допустимому напряжению коллектор-эмиттер силового триода T_4 .

Во-вторых, данная схема при полных диапазонах допустимых изменений напряжения и тока нагрузки в режиме стабилизации обеспечивает среди всех прочих схем наименьшую мощность силового триода. При выходной номинальной мощности 30 ватт наибольшая мощность триода не превышает 10 вт. Последовательная схема с такими же параметрами должна иметь в несколько раз более мощный регулирующий триод. При использовании триодов типа П4 рассматриваемая схема может иметь, если требуется, значительно большую мощность. Снижение мощности T_4 достигнуто главным образом за счет введения гасящей нагрузки. Последняя выполнена секционированной для увеличения плавности регулировки и ввиду отсутствия одного переменного сопротивления с необходимыми ресурсами по току и мощности.

х) Отмеченные на принципиальной схеме номиналы соответствуют варианту источника с максимальным напряжением 80 в. Спецификация источника 30 в имеет следующие отличия: балластная лампа — типа СМ-17; T_4 — типа П4Д; $C_1 = C_4 = 500$ мкф; $D_{1,2}$ — типа Д302; $C_2 = 100$ мкф; $R_1 = R_2 = 10$ ом; $R = R = 1,5$ ком; $R = 1,2$ ком.

В большинстве схем относительная точность стабилизации резко ухудшается с уменьшением выходного напряжения до уровня единиц вольт и ниже. Главной причиной этого является значительная величина входного сопротивления первого каскада УПТ, ограничивающая пропорциональный рост результирующей крутизны первого каскада и измерительного делителя. В данной схеме влияние указанной причины значительно ослабляется за счет роста суммарного балластного сопротивления одновременно с уменьшением напряжения и перемещением движка R_2 вниз. С этой же целью при переключении диапазонов напряжения не использована коммутация вторичной обмотки трансформатора, то есть сохранение удовлетворительной стабильности при малых напряжениях (см. таблицу параметров) достигнуто за счет ухудшения КПД. Последний в стабилизаторах с глубокой регулировкой не является существенным параметром.

Для данных источников, как и для рассмотренных ранее, характерна эксплуатационная надежность, причем здесь она обеспечивается не специальными средствами защиты, а в силу самой специфики работы параллельных стабилизаторов. Вся схема, как видно из рис. 13, остается достаточно простой.

Питание силовой цепи и вспомогательного параметрического стабилизатора осуществляется от мостового выпрямителя с выведенной средней точкой вторичной обмотки трансформатора. Поскольку параллельный стабилизатор потребляет от выпрямителя мало изменяющийся ток, для сглаживания пульсаций целесообразно использовать сложный Г-образный фильтр с компенсацией переменной составляющей напряжения на выходе. При тех же габаритах он оказывается в несколько раз более эффективным, чем простой Г-образный фильтр. Вообще же, для питания низкоомных нагрузок фильтры с индуктивным входом всегда предпочтительнее, чем фильтры с емкостным входом, ибо габариты входной емкости, при которых обеспечивается допустимый по паспорту уровень пульсаций для электролитических конденсаторов, оказываются чрезмерно большими. Г-образные фильтры по своему выходному сопротивлению и методике расчета близки к индуктивным фильтрам при токах нагрузки, превышающих некоторую критическую величину (0,1-0,5 от номинального).

Лабораторный источник питания многоцелевого назначения

В лабораторной практике необходимы источники не только стабильного постоянного напряжения, но и стабильного тока (для питания различного рода магнитных отклоняющих и фокусирующих систем, датчиков Холла и т.д.). Использовать в различных случаях специализированные источники дорого и не всегда удобно. Две

указанные функции можно объединить в одном приборе на базе общего силового выпрямителя, видоизменив лишь схему стабилизатора. Такой универсальный источник ввиду более частого использования нуждается в высокоэффективной системе защиты. Ниже рассматривается одна из возможных реализаций, основой которой является последовательный стабилизатор со сложной самозащитой.

Общие данные прибора:

Габариты	380 x 200 x 140 мм ³
Вес	около 12 кг
Диапазон рабочих температур	20 ± 15°С
Напряжение сети	220 в ± 10%, 50 гц
Мощность, потребляемая на холостом ходу	не более 20 вт
Полный КПД в номинальном режиме (напряжение сети 220 в, напряжение нагрузки 24 в, ток - 4а)	не меньше 0,6

Электрические параметры в режиме стабилизации напряжения:

Выходное напряжение	регулируется плавно от 8 до 16 и 16-24 в
Ток нагрузки	произвольный от 0 до 4 а
Класс точности по сумме всех погрешностей	не хуже 0,1%
Коэффициент стабилизации по сети	не меньше 1000
Выходное сопротивление	не больше 0,002 ом
Пulsации выходного напряжения	не больше 0,01%
Длительный дрейф напряжения в произвольном режиме после 1 часа прогрева за 8 часов	не больше 0,1 %

Электрические параметры в режиме стабилизации тока:

Ток нагрузки	регулируется плавно от 1 до 2 и от 2 до 4 а
Выходное напряжение	произвольное от 7 до 16 и от 15 до 24 в.
Класс точности по сумме всех погрешностей	не хуже 0,1%
Коэффициент стабилизации по сети	не меньше 1000
Относительная выходная проводимость (приведенная к номинальной проводимости нагрузки)	не больше 10 ⁻³
Пulsации тока нагрузки	не больше 0,02%
Длительный дрейф тока нагрузки (после 1 часа прогрева в произвольном режиме за 6 часов)	не больше 0,2%

Электронная система защиты прибора выполняет следующие функции: 1) при перегрузках ограничивает выходной ток на уровне 4,2-4,5 а; 2) при

снижении по любой причине выходного напряжения до 6-7 в выключает силовую цепь (ток нагрузки уменьшается до нуля).

Структурная схема стабилизатора (см. рис. 15) работает следующим образом. В силовом контуре, кроме сопротивления нагрузки R_H , имеются: источник питающего напряжения U_1 , регулирующий проходной триод РТ, образцовое сопротивление r_1 для измерения тока нагрузки. Разностный сигнал сравнения стабилизируемого и опорного напряжений через предварительный усилитель УПТ подается на базу РТ. При стабилизации напряжения на измерительный делитель (сопротивления R_U, R_0) подается непосредственно выходное напряжение. При стабилизации тока измеряется падение напряжения на образцовом сопротивлении r_1 . Точностью последнего, помимо всех прочих факторов, определяется точность стабилизации тока. Режим работы (стабилизация тока или напряжения) определяется положением переключателя П. Регулировка тока или напряжения в заданных диапазонах осуществляется изменением сопротивлений R_U и R_I в соответствии с равенствами:

$$a) U_H = U_{оп} R_U / R_0, \quad \delta) I_H = U_{оп} R_I / r_1 R_0. \quad (1)$$

При написании (1) допустимо пренебречь: входным током УПТ по сравнению с рабочим током I_0 делителя, током I_0 по сравнению с током нагрузки, входным напряжением УПТ и ошибкой регулирования.

Принципиальная схема (полная) источника приведена на рис. 14. Различные детали на ней сгруппированы в узлы согласно структурной схеме. Силовой и вспомогательный выпрямители и фильтры расположены слева по чертежу. В последовательном L-звене силового фильтра использован резонансный фильтр-пробка, настроенный на частоту 100 гц. Уровень пульсаций на его выходе в 2-5 раз ниже, чем у простого П-фильтра при тех же габаритах деталей.

Термокомпенсированный источник опорного напряжения - диоды D_{10-13} , УПТ - два балансных каскада на триодах T_{1-4} и цепи их питания на схеме обведены пунктирной линией, а в приборе смонтированы на отдельной плате.

В качестве регулирующих используются два триода типа П210, соединенные параллельно. Раскачка от эмиттерного повторителя на триоде П202, симметрирование токов посредством эмиттерных сопротивлений R_{21}, R_{23} по 0,5 ом каждое.

В нижней части рис. 14 расположены измерительные цепи стабилизатора и, в частности, переключатель режимов работы П₂, переключатель диапазонов напряжения П₁, переключатель диапазонов тока П₃ и все измерительные сопротивления. В верхнем диапазоне тока работают параллельно два токоизмерительных сопротивления R_{19} и R_{20} , в нижнем - одно R_{19} . Это сделано с целью уменьшения изменений напряжения на токоизмерительном сопротивлении при достаточно глубокой регулировке тока. Последнее,

в свою очередь, дает возможность снизить общий уровень этого напряжения (изменяется от 0,5 до 1 в) и компромиссно решить противоречивые вопросы высокого КПД и высокой точности в режиме стабилизации тока. В режиме стабилизации напряжения оба сопротивления шунтируются переключателем Π_{2-2} .

Индикация напряжения и тока нагрузки (точнее пропорционального току падения напряжения на сопротивлении R_{21}) по выбору осуществляется стрелочным прибором с добавочными сопротивлениями и переключателем.

Ввиду большой точности стабилизации тока все сколько-нибудь значительные потребители тока (контрольная лампа и главная выходная емкость, имеющая утечку порядка миллиампер) питаются, минуя измерительное сопротивление. В противном случае стабилизироваться будет не ток нагрузки, а сумма токов, протекающих через измерительное сопротивление. Следовательно, равенство (1-6) будет нарушаться. Аналогичную осторожность следует соблюдать и при проверке точности стабилизации тока непосредственно на выходных клеммах.

Контакты переключателя Π_{2-2} и соединительные провода имеют заметное сопротивление постоянному току, которое портит нагрузочную характеристику стабилизатора напряжения. Для компенсации этого влияния в схему стабилизатора напряжения введена прямая связь по току нагрузки. Через сопротивление R_{16} на вход УПТ подается сигнал, пропорциональный току нагрузки. Компенсацию целесообразно проводить при некотором промежуточном напряжении, скажем, 10-15 в. Тогда отклонения нагрузочной характеристики от полностью скомпенсированной в крайних точках диапазона регулировки напряжения не превышают, как правило, 0,05% и имеют противоположный знак.

В схеме УПТ с целью уменьшения температурного дрейфа, ослабления внутренних отрицательных связей и повышения коэффициента усиления использованы балансные каскады. На случай точной регулировки температурного коэффициента опорного напряжения предусмотрена возможность введения подстроечного сопротивления R_3 .

Устойчивость против самовозбуждения. Ввиду высокого усиления в замкнутой петле основной обратной связи (порядка 10^4) стабилизатор имеет определенную тенденцию к самовозбуждению на высоких частотах, причем борьба с ним осложняется наличием двух взаимоисключающих режимов работы. Фазокорректирующая емкость C_4 в измерительной цепи стабилизатора напряжения существенно снижает склонность к самовозбуждению в этом режиме. Однако подобная же емкость C_5 в измерительной цепи стабилизатора тока неэффективна ввиду неоптимального, с этой точки зрения, соотношения величин сопротивлений. Полностью устранить самовозбуждение во втором случае помогают вспомогательные выходные емкости $C_7=20$ мкф ЭТО

и $C_8=2$ мкф МБГО (на схеме не показана), снижающие верхнюю граничную частоту, которая при стабилизации тока незначительна в большинстве практических случаев. Поставленные непосредственно у выходных клемм и обладающие малой утечкой и индуктивностью, эти емкости одновременно уменьшают отрицательное влияние переходного сопротивления контактов переключателя Π_{2-2} на частотную характеристику стабилизатора напряжения. Использование в первом или во втором каскадах высокочастотных триодов также способствует повышению устойчивости. Если упомянутые средства не устраняют полностью самовозбуждение в отдельном образце прибора, то главными причинами этого являются неудачный монтаж или слишком большой коэффициент усиления. В последнем случае для снижения усиления следует ввести добавочное гасящее сопротивление в любую разумную точку схемы (например, между эмиттером T_5 и общей отрицательной шиной или между базами триодов балансных каскадов и т.д.).

Формирование нагрузочной характеристики. На рис. 16 приведены нагрузочные характеристики источника при стабилизации напряжения (кривые 1) и при стабилизации тока (кривые 3). На том же рисунке для сравнения приведена нагрузочная характеристика обычного последовательного стабилизатора напряжения (кривая 2). Принцип действия сложной внутренней самозащиты от токовых перегрузок во многом похож на ранее рассмотренную схему последовательного стабилизатора напряжения. Так, порог ограничения тока на кривых 1 обусловлен насыщением триода T_3 и подчиняется тем же закономерностям. Однако, механизм развития регенеративного выключения (участок "в") несколько иной. Насыщение T_3 обуславливает уменьшение величины номинально отрицательного коэффициента регенерации схемы. Смена же знака этого коэффициента на положительный объясняется действием положительной обратной связи через эмиттерную цепочку R_{10}, R_7, D_{14} . В режиме стабилизации и на этапе ограничения тока (участки "а" и "б") коэффициент передачи цепочки весьма мал за счет блокирующего действия стабилитрона D_{14} . При полном перераспределении тока в плечах первого каскада, а также при уменьшении до нуля тока стабилитрона и увеличении его дифференциального сопротивления (то есть при напряжении 8-9 вольт), коэффициент положительной связи начинает резко нарастать. Регенеративное выключение происходит при несколько меньшем напряжении, когда выходят из насыщения триод T_3 , и коэффициент положительной связи становится равным единице. С выходом T_3 из насыщения в начале участка "в" коэффициент отрицательной связи продолжает оставаться малым за счет полного перераспределения токов в обоих балансных каскадах и за счет насыщения T_1 .

В режиме стабилизации тока (кривые 3) рабочим является вертикальный участок нагрузочной характеристики. Надобности в ограничении тока нагрузки нет, поскольку его постоянство поддерживается действием отрицательной обратной связи, а максимальное значение, согласно расчетным номиналам сопротивлений делителя, не может пре-

высить 4 а. Механизм ограничения тока может вступить в действие лишь при нарушении нормальной работы стабилизатора тока. Однако участок "в" нагрузочной характеристики сохраняет свой смысл, поскольку необходимо уберечь силовые триоды от чрезмерной мощности, выделяющейся при максимальном токе нагрузки и слишком малых выходных напряжениях. Регенеративное выключение источника на уровне $U_{п}$ производится за счет эмиттерной цепочки первого каскада и перераспределения тока в плечах. Напряжение нагрузки в этом режиме может меняться произвольно от $U_{п}$ до наибольшей величины 15-18 или 23-27 в в зависимости от напряжения сети и положения Π_{1-1} , переключающего отводы вторичной обмотки.

Скорость регенеративного выключения, то есть время спада выходного тока до весьма малого значения, зависит от скорости нарастания перегрузки по току непосредственно перед выключением и может изменяться от единиц миллисекунд до десятков микросекунд. Следовательно, и в данной схеме "электронная" внутренняя защита по быстрдействию превосходит электромагнитные реле.

Источник, автоматически выключившийся под действием перегрузки, остается в этом состоянии неограниченное время, в течение которого триоды T_6 , T_7 подвергаются воздействию полного входного напряжения при нулевой (практически, весьма малой) рассеиваемой мощности, как и в других подобных схемах. Такое состояние для них не опасно, если напряжение не превышает допустимого по паспорту коллекторного напряжения. Для эффективного отвода тепловых токов базы триодов $T_{6,7}$ и T_5 независимо от величины выходного напряжения предусмотрен стабилитрон D_9 . После устранения замыкания на выходе силовой канал включается нажатием кнопки "пуск", подающей через R_{22} на выход ток, достаточный для того, чтобы D_{14} вошел в режим стабилизации и заблокировал положительную обратную связь. После этого стабилизируемая величина устанавливается на нужном уровне действием отрицательной связи.

Отвод тепла от силовых триодов осуществляется через посредство ребристых алюминиевых радиаторов площадью 15 дм^2 , являющихся частью конструкции прибора и имеющих хороший электрический и тепловой контакт с массивным шасси - основанием (см. рис. 17). Триоды крепятся к радиаторам изнутри через посредство специальных медных кронштейнов. Последние имеют тепловой контакт с радиатором по значительной площади и изолированы от него тонкой пленкой тефлона. Посадочные поверхности триодов, переходников и радиаторов смазываются любым неусыхающим маслом, например, касторовым. Указанная конструкция обеспечивает переходное тепловое сопротивление между корпусом триода П210 и радиатором порядка $0,3^\circ\text{C}/\text{вт}$ и надежную изоляцию коллектора от шасси. При температуре окружающего воздуха 20°C и рассеиваемой мощности 20 вт температура радиатора не превышает 45°C ,

а температура коллекторного перехода - 70°C . Такая мощность является максимальной и выделяется на каждом триоде при токе нагрузки 4 а, выходном напряжении - 18 в и верхнем положении переключателя Π_{1-1} (включена вся вторичная обмотка). Если при эксплуатации источника вероятность возникновения такого крайнего режима незначительна, то в качестве силовых могут быть использованы более доступные транзисторы типа П4, причем без ущерба для электрических параметров.

Характер дрейфа выходного напряжения одного из экземпляров источника в течение 32 последовательных часов эксплуатации отражен на диаграммах рис. 18. Измерения выполнены разностным способом с помощью самописца ЭПП-09 и внешнего калибровочного опорного источника^{х)} с напряжением 10 в. Первые три полосы соответствуют трем последовательным включениям источника с неизменным током нагрузки около 4 а и при естественных колебаниях напряжения сети от 210 до 225 в. В таких условиях за 8 часов работы обеспечивается стабильность порядка 0,01%. Последняя полоса отражает изменения выходного напряжения при следующих изменениях тока нагрузки $I_{н}$ и напряжения сети U_0 :

- t_1 - включение в сеть 215 в при токе 4,2 а;
- $t_2 - v_0$ увеличено от 215 до 230 в при неизменном токе;
- $t_3 - v_0$ уменьшено от 230 до 210 в при неизменном токе;
- t_4 - сброс $I_{н}$ от 4,2 а до нуля при неизменном напряжении сети;
- $t_5 - v_0$ увеличено от 210 до 240 в при нулевом токе;
- $t_6 - v_0$ уменьшено от 240 до 205 в при нулевом токе;
- $t_7 - I_{н}$ увеличен от нуля до 4,2 в;
- $t_8 - v_0$ увеличено от 205 до 220 в при неизменном токе.

На основании последней диаграммы точность данного экземпляра при переменной нагрузке можно оценить в 0,02-0,03%.

З а к л ю ч е н и е

Основная цель настоящей работы - показать практически, что типовая последовательная структура полупроводникового стабилизатора (см. рис. 2 и 5), которой в литературе уделяется наибольшее внимание, не является наилучшей во всех отношениях. При унификации источников питания, а такой вопрос стоит в настоящее время остро, использовать ее следует с осторожностью. Ряд рассмотренных выше схем реализован и эксплуатируется в малом количестве (от двух до четырех экземпляров). Вторая задача работы - привлечь внимание к этим схемам, что способствовало бы более широкой

х) Термокомпенсированный кремниевый стабилитрон, питаемый стабильным током и теплоизолированный от окружающей среды.

их проверке, более четкому выявлению достоинств и недостатков, а также перспектив дальнейшего их совершенствования и внедрения.

В заключение автор благодарит В.П.Саранцева за поддержку работы, Э.Ф.Матвеева, принимавшего участие в монтаже отдельных блоков, А.С.Гаврилова за внимательное рецензирование рукописи. Автор будет благодарен за все критические замечания по работе.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июня 1964 г.

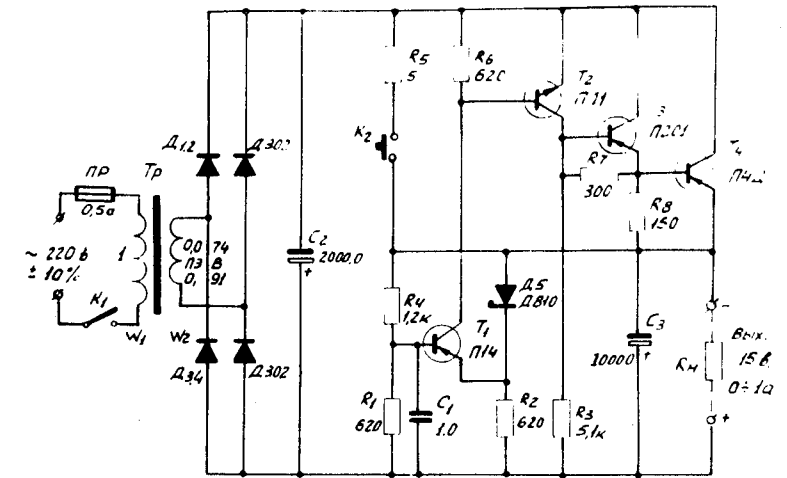


Рис.1.

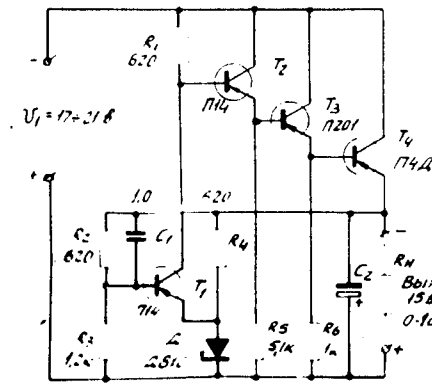


Рис.2.

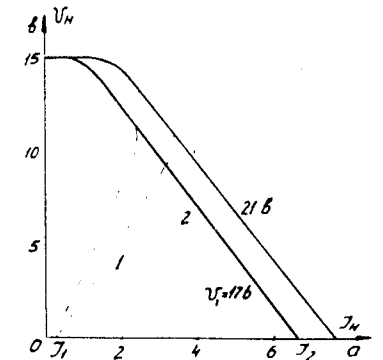


Рис.3.

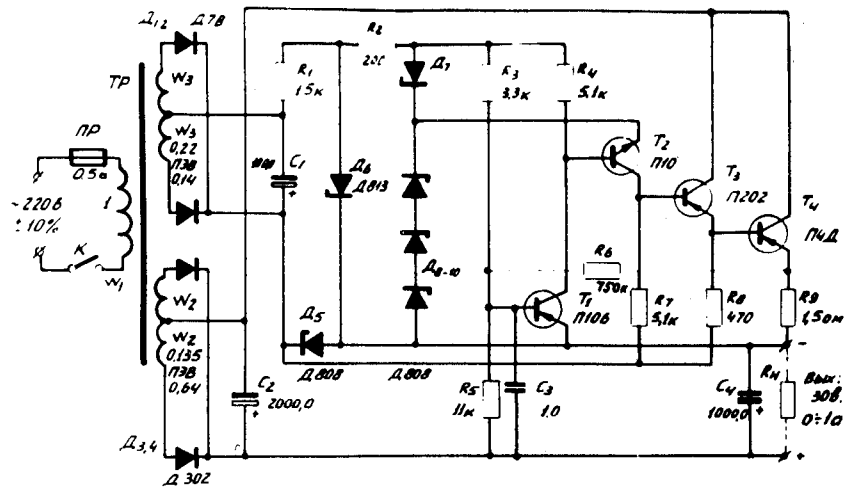


Рис.4.

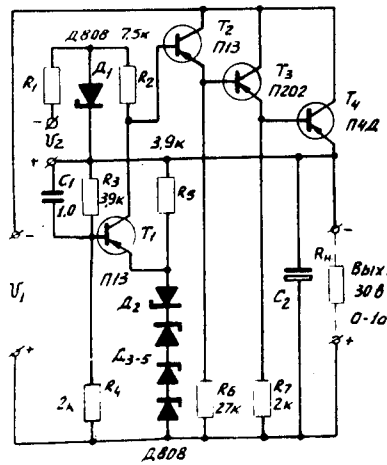


Рис.5.

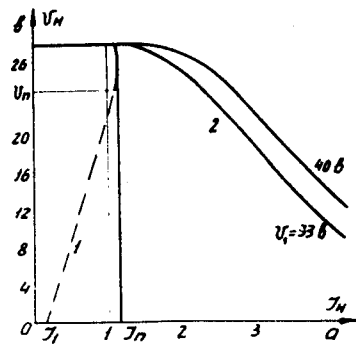


Рис.6.

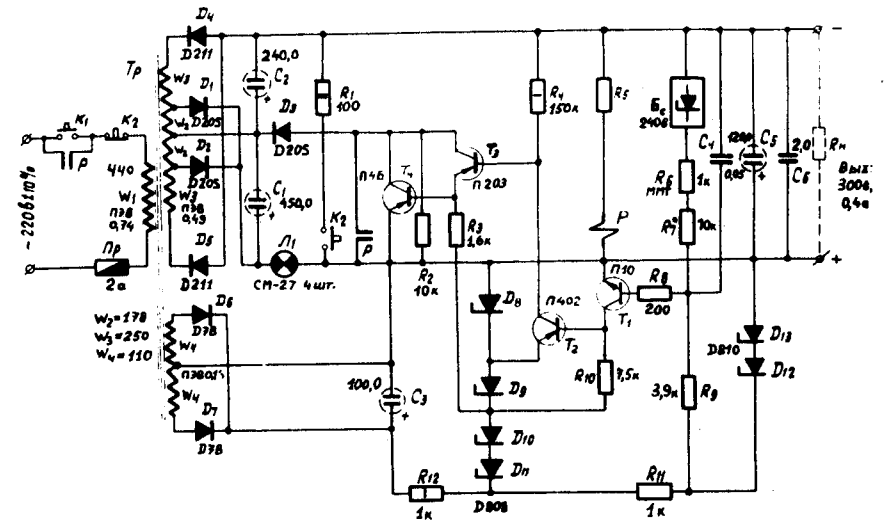


Рис.7.

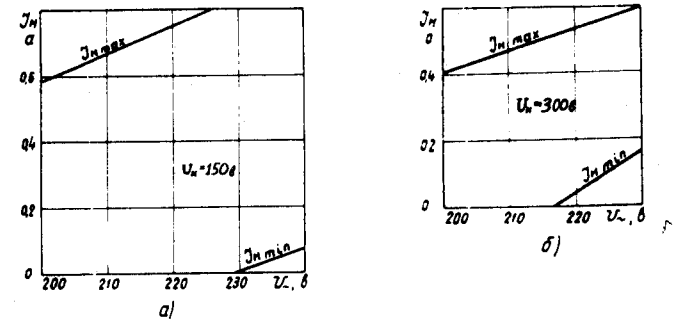


Рис.8.

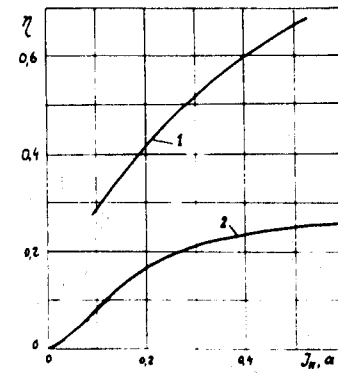


Рис.9.

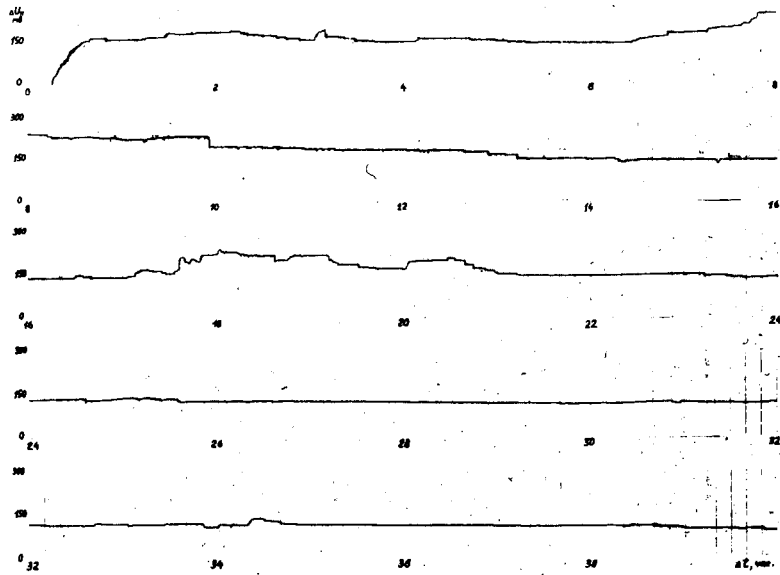


Рис.10

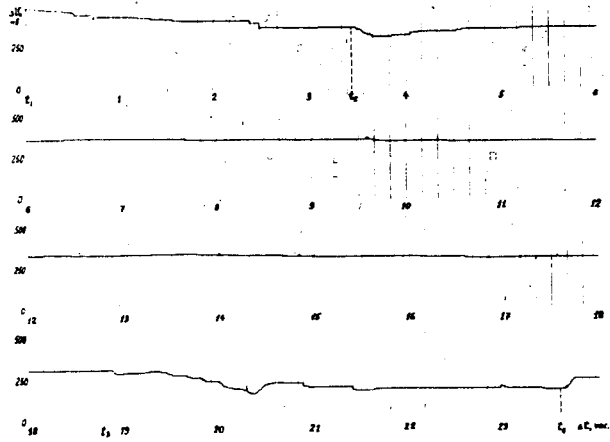


Рис.11.

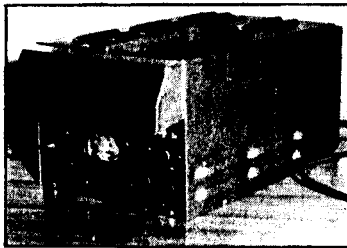


Рис.12.

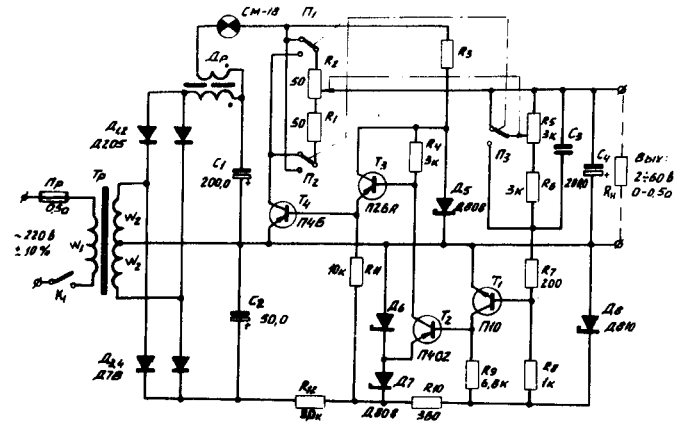


Рис.13.

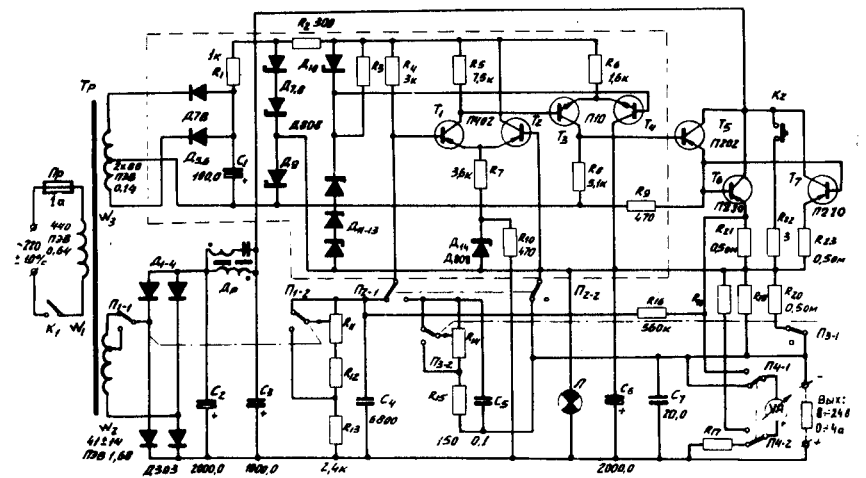


Рис.14.

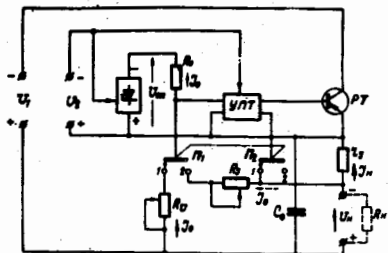


Рис.15.

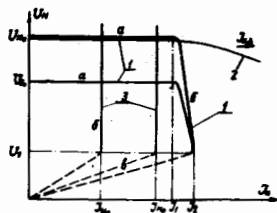


Рис.16.



Рис.17.

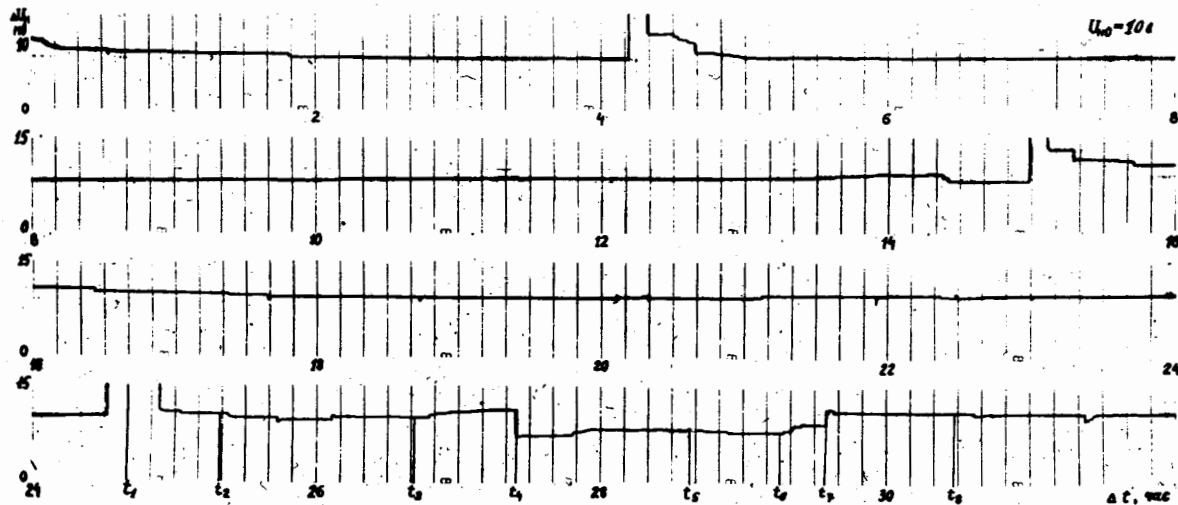


Рис.18.