

5194

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13-5194



Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко, В.А. Пережогин

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ  
ТИРИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР  
БОЛЬШИХ ТОКОВ

1970

13-5194

Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко, В.А. Пережогин

**ПРЕЦИЗИОННЫЙ ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ  
ТИРИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР  
БОЛЬШИХ ТОКОВ**

**Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ**

Транзисторные компенсационные стабилизаторы тока широко используются в системах питания электромагнитов физических установок /1-5/. Такие стабилизаторы обеспечивают длительную стабильность тока возбуждения (0,01 - 0,001%) и подавление пульсаций до необходимого уровня.

Часто в электромагнитах, используемых в экспериментальной ядерной физике и ускорителях, бывает необходим широкий диапазон регулирования магнитного поля. Обеспечение такого диапазона возможно за счет изменения тока возбуждения от нескольких до сотен ампер. При таких больших изменениях тока нагрузки сильно возрастает перепад напряжения на транзисторном регуляторе и мощность, рассеиваемая в нем, может увеличиться до нескольких киловатт.

Увеличение перепада напряжения и рассеиваемой мощности требует значительного увеличения числа транзисторов в регуляторе, снижает его к.п.д. и надежность.

В связи с этим в широкодиапазонных транзисторных компенсационных стабилизаторах больших токов обычно применяется система двойного регулирования, состоящая из контуров точного и грубого регулирования. При помощи транзисторного регулятора и системы обратной связи с большим коэффициентом усиления и стабильным опорным напряжением (контур точного регулирования) ток нагрузки поддерживается постоянным с большой степенью точности. В то же время напряжение на выходе источника постоянного тока, питающего стабилизатор, при помощи цепи обратной связи регулируется так (контур грубого регулирования), чтобы падение напряжения на промежутке эмиттер-коллектор регулирующих транзисторов оставалось практически постоянным и не превышало нескольких вольт.

Обычно в таких схемах в качестве регулируемого источника постоянного тока используется электромашинный агрегат или регулируемый выпрямитель с дросселем насыщения.

Широкое распространение получило регулирование выпрямленного напряжения с помощью управляемых вентилях путем изменения фазы поджига вентилях. Такое регулирование дает возможность изменять выпрямленное напряжение плавно и в широких пределах. Использование в подобных регуляторах мощных управляемых полупроводниковых вентилях (тиристоров) позволяет создать компактные регуляторы, способные управлять большими мощностями при малых потерях в вентилях.

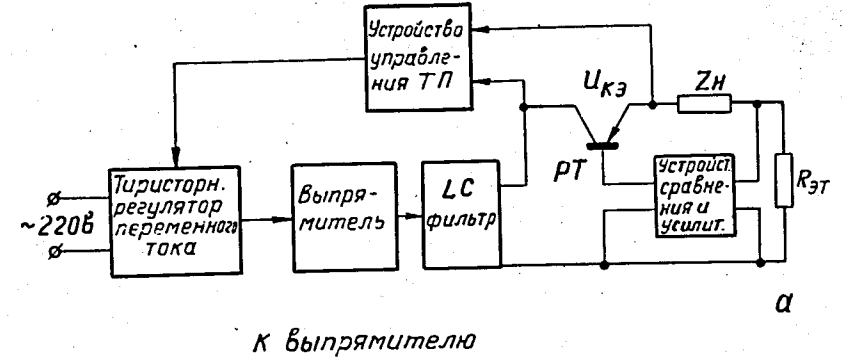
Однако изменение фазы поджига вентилях существенно влияет (причем не в лучшую сторону) на ход электромагнитных процессов в выпрямительных установках: искажается форма кривых выпрямленного тока и напряжения; увеличивается потребляемая из сети реактивная мощность, что вызывает уменьшение коэффициента мощности.

Регулирование выпрямленного напряжения может производиться изменением амплитуды переменного напряжения, подводимого к выпрямителю, путем изменения коэффициента трансформации силового трансформатора. Изменение коэффициента трансформации достигается посредством коммутаций обмоток силового трансформатора.

Регулятор этого типа обеспечивает ступенчатое изменение постоянно напряжения на выходе выпрямителя. При определенном значении величины ступенек напряжения такой способ может быть успешно использован в сочетании с точным транзисторным компенсационным регулятором.

Коммутацию обмоток целесообразно осуществлять с помощью тиристорных переключателей переменного тока. Использование тиристоров целесообразно потому, что они имеют: высокий к.п.д. за счет малого падения напряжения в открытом состоянии (около 1 в); высокое быстродействие (время включения тиристора 10–30 мксек); большой коэффициент усиления по мощности (порядка  $10^5$ – $10^6$ ); малые габариты; постоянную готовность к работе.

В Лаборатории ядерных проблем разработан прецизионный стабилизатор тока, в контуре грубого регулирования которого используется регулятор этого типа с коммутацией вторичных обмоток трансформатора тиристорными переключателями.



к выпрямителю

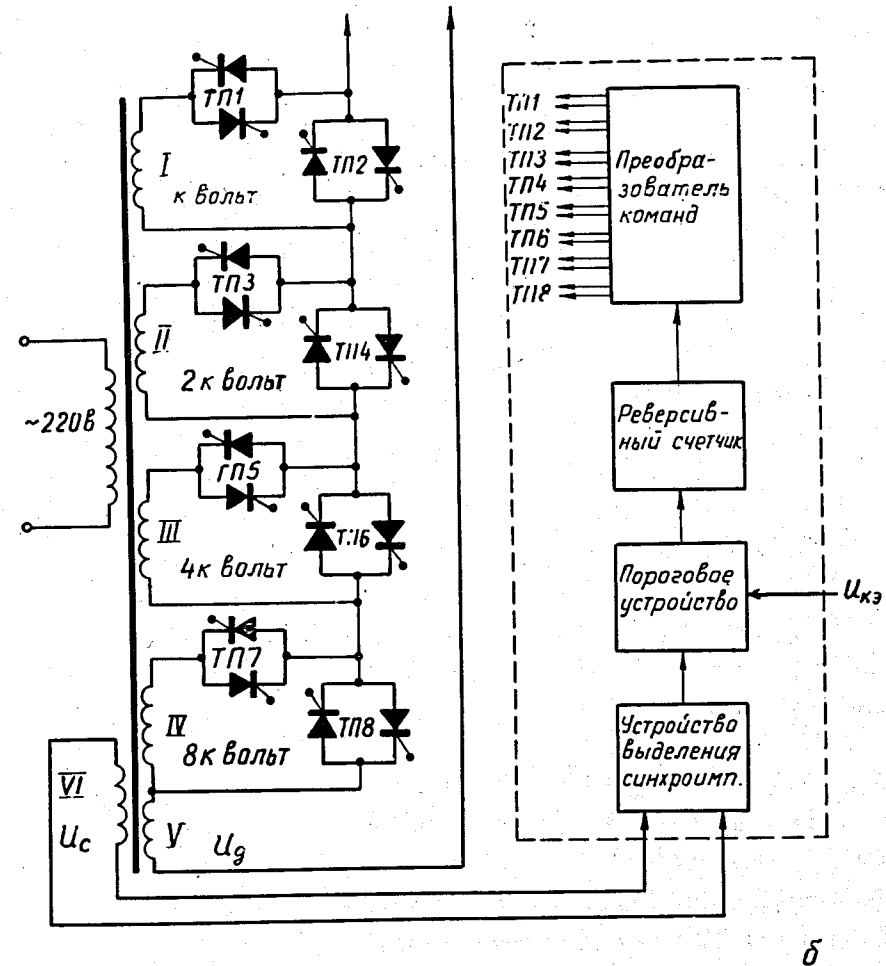


Рис. 1. а) Блок-схема тиристорно-транзисторного стабилизатора тока. б) Блок-схема грубого контура регулирования. ТП - тиристорный переключатель; k - величина ступеньки, вольт.

Блок-схема разработанного стабилизированного источника тока представлена на рис. 1а. Задача контура грубого регулирования — удерживать напряжение  $U_{кэ}$  регулирующих транзисторов в заданных пределах ( $U_{кэ\ min} \leq U_{кэ} \leq U_{кэ\ max}$ ). Если в процессе регулирования  $U_{кэ}$  оказывается вне рабочей области, устройство управления вырабатывает и посылает на регулятор контура соответствующие команды, после выполнения которых выпрямленное напряжение изменяется таким образом, чтобы  $U_{кэ}$  приняло требуемое значение.

Силовой трансформатор выпрямителя имеет  $n$  коммутируемых вторичных обмоток, числа витков которых ( $i$ , соответственно, напряжения на зажимах) пропорциональны  $2^{i-1}$ , где  $i$  — порядковый номер соответствующей обмотки. Если коэффициент пропорциональности равен  $k$  вольтам (величина ступеньки регулирования), то напряжение на вторичной стороне силового трансформатора путем соответствующих переключений обмоток может регулироваться в диапазоне значений  $U_{г} + [U_{г} + (2^n - 1)k]$  вольт.

В рассматриваемом случае в соответствии со схемой 1б  $n = 4$  и диапазон регулирования составляет  $U_{г} + (U_{г} + 15k)$  вольт. Дополнительная не коммутируемая обмотка V обеспечивает исходный уровень напряжения, компенсирующий потери на выпрямителе и точном регуляторе  $U_{кэ\ min}$ . Применение этой обмотки позволяет также уменьшить либо число коммутируемых обмоток, либо величину минимального шага регулирования напряжения (последнее позволяет уменьшить мощность, рассеиваемую транзисторным регулятором).

Главными несомненными достоинствами такого варианта тиристорно-трансформаторного регулятора являются высокое значение к.п.д. и коэффициента мощности  $\cos \phi$ , а также незначительные искажения синусоидальной формы напряжения и тока на выходе регулятора благодаря тому, что коммутации осуществляются в моменты перехода тока через нуль, а время включения тиристорov, как уже отмечалось, мало.

Хотя для обсуждаемого регулятора требуется относительно большое число тиристорov, тем не менее в большинстве случаев могут применяться тиристоры с малым обратным напряжением, имеющие невысокую стоимость.

В описываемом регуляторе применяются тиристоры типа ВКДУ-50. Для уменьшения габаритов регулятора тиристоры устанавливаются на радиаторах, охлаждаемых водой.

Силовой трансформатор выполнен на сердечнике броневое типа. Площадь сечения сердечника  $S \approx 160 \text{ см}^2$ . Сетевая обмотка содержит 80 витков провода ПБД  $\phi 3,55$  мм. Вторичные обмотки: I — 2 витка, II — 4 витка, III — 8 витков, IV — 16 витков, V — 4 витка; эти обмотки намотаны проводом ПБД  $\phi 2,83$  (в два провода); VI — 4 витка провода ПЭЛБО  $\phi 0,59$ .

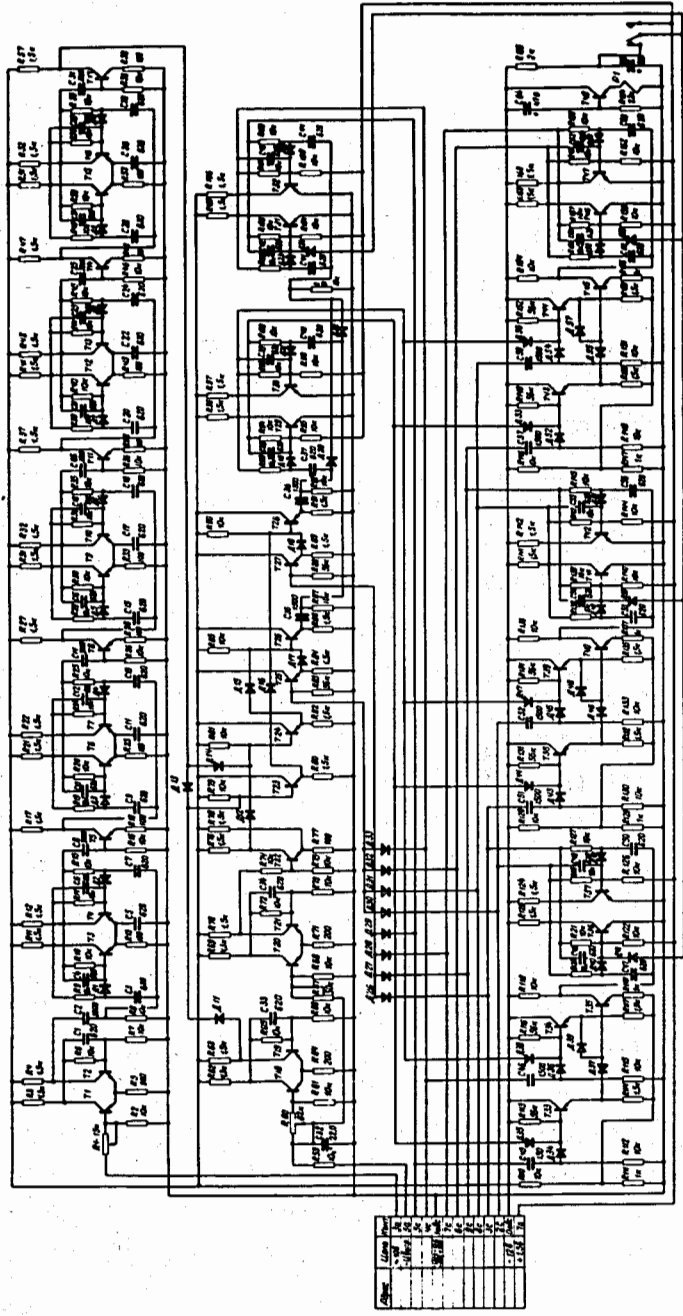
Выпрямитель выполнен по мостовой схеме на диодах Д242. В каждом плече выпрямительного моста включено параллельно 8 диодов. С помощью сопротивлений 0,1 ом, включенных в цепь каждого диода, достигается выравнивание токов через диоды.

Транзисторный регулятор эффективно подавляет пульсации напряжения (тока), если постоянная составляющая напряжения  $U_{кэ}$  превышает размах пульсаций напряжений не менее чем на 1,5–2 в. С другой стороны, для расширения диапазона регулирования желательно снижать значение  $U_{кэ\ min}$  до минимально возможного. В описываемом стабилизаторе выбрано  $U_{кэ\ min} \approx 6$  в. Таким образом, удвоенная амплитуда пульсаций напряжения на входе стабилизатора не должна превышать 4,5 в. Параметры фильтра выбираются такими, чтобы он обеспечивал подавление пульсаций при максимальном напряжении на выходе выпрямителя до указанной величины.

В данном случае это достигается при значении  $L \cdot C \approx 80$  [гн.мкф].

На рис. 2 и 3 приведены принципиальные схемы блоков управления тиристорными переключателями. Блок выработки команд (рис. 2) включает в себя устройство выделения синхроимпульсов, пороговое устройство и реверсивный счетчик.

Устройство выделения синхроимпульсов служит для формирования командных импульсов, временное положение которых обеспечивает переключение тиристорных ключей в тот момент, когда напряжение на аноде тиристора приближается к нулевому значению. Это позволяет избежать одновременного запуска двух тиристорных переключателей и короткого замыкания обмоток. Временное положение синхроимпульса относительно



Ва трубки типа 6П16  
Ва диоды типа Д9К

Рис. 2. Принципиальная схема выработки команд управления.

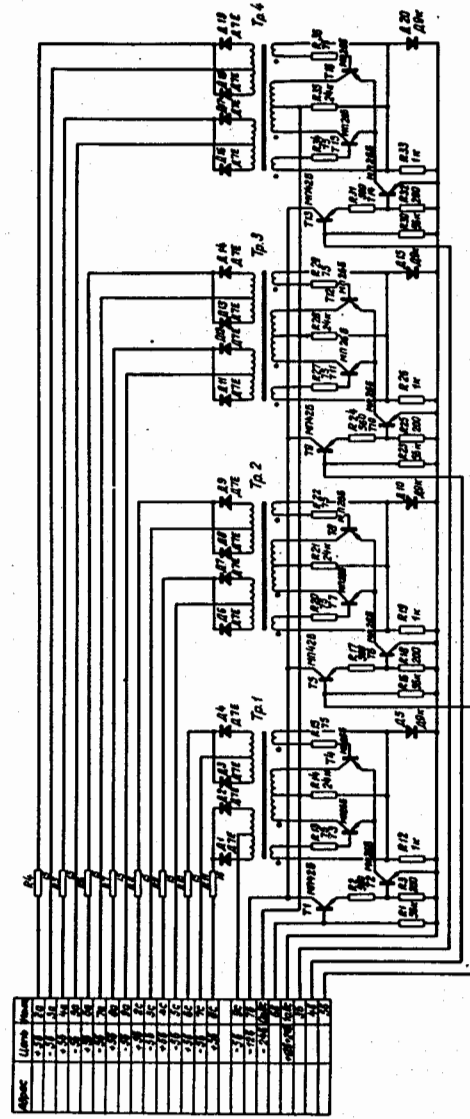


Рис. 3. Принципиальная схема блока преобразователя команд.

опорного синусоидального напряжения, снимаемого с обмотки VI силового трансформатора, определяется величиной сопротивления R1 и устанавливается в процессе настройки всего устройства в целом. Преобразование синусоидального напряжения в импульсное осуществляется схемой несимметричного триггера и делителя частоты из пяти триггеров, собранных на триодах T1-T17. Деление частоты необходимо для увеличения периода следования командных импульсов. Период повторения командных импульсов должен быть несколько больше времени, занимаемого переходными процессами в узлах всего стабилизатора. Пороговое устройство состоит из двух несимметричных триггеров, имеющих разные уровни срабатывания по входному напряжению и двух ключей, управляемых этими триггерами. Уровни входного напряжения, вызывающие срабатывание триггеров, устанавливаются с помощью переменных сопротивлений R60 и R67. Триггер (T20-T21) должен срабатывать при значении  $U_{кэ} \leq U_{кэ\ min}$ , а триггер (T18-T19) - при  $U_{кэ} \geq U_{кэ\ min}$ . Выходные напряжения триггеров управляют ключами (T23 и T24).

С помощью этих ключей осуществляется коммутация синхроимпульсов по входам реверсивного счетчика.

Если  $U_{кэ} < U_{кэ\ min}$ , ключ T24 открыт (ключ T23 закрыт) и синхроимпульсы поступают на вход "прямого счета" реверсивного счетчика. При этом вырабатываются команды на увеличение выпрямленного напряжения.

Если  $U_{кэ}$  превышает максимально допустимое значение  $U_{кэ\ max}$ , открывается ключ T23 (ключ T24 закрыт) и синхроимпульсы поступают на вход "обратного счета" реверсивного счетчика. Выпрямленное напряжение уменьшается.

Когда  $U_{кэ\ min} \leq U_{кэ} \leq U_{кэ\ max}$ , ключи T23 и T24 закрыты, и синхроимпульсы не поступают ни на один вход реверсивного счетчика.

Реверсивный счетчик содержит четыре двоичных разряда и собран на транзисторах T29-T47. Потенциальные уровни триггеров являются командами для включения и выключения тиристорных переключателей. Исходное состояние триггеров счетчика, соответствующее "нулевым" командам, т.е. минимальному выпрямленному напряжению, устанавливается

кратковременным замыканием контактов реле P1 при подаче напряжения питания счетчика.

Для устранения возможности перехода счетчика из "нулевого" состояния непосредственно в "единичное" и обратно (в том случае, если будут продолжать поступать командные импульсы на дальнейшее повышение или понижение выпрямленного напряжения при исчерпанных возможностях ключевого управления) служат ключи T25-T26 и T27-T28. Командные импульсы, поступающие из порогового устройства, подаются на входы реверсивного счетчика через эти ключи. Когда триггеры счетчика находятся в "нулевых" состояниях, соответствующих минимальному выпрямленному напряжению, ключ T27-T28 закрыт и прохождение командных импульсов на вход "обратного счета" исключается.

Если все триггеры счетчика переходят в "единичные" состояния, соответствующие максимальному выпрямленному напряжению, ключ T25-T26 закрывается и прохождение командных импульсов на вход "прямого счета" прекращается.

Передача команд, заданных в виде потенциальных уровней триггеров, на тиристорные ключи осуществляется с помощью восьми идентичных управляемых преобразователей напряжения. (На рис. 3 показана схема одного блока, содержащая 4 преобразователя напряжения). Преобразователь напряжения выполнен на транзисторах типа МП26Б по схеме с общим эмиттером. С двух выходных обмоток трансформатора управляющее напряжение, выпрямленное с помощью двухполупериодных выпрямителей, подается на управляющие электроды соответствующей пары тиристоров.

Управление собственно преобразователем напряжения осуществляется транзисторным ключом (МП26Б), включенным в эмиттерную цепь преобразователя. Включение и выключение ключа производится потенциалом соответствующего плеча триггера реверсивного счетчика через трансформатор сопротивления на транзисторе типа МП16Б.

На рис. 4 приведена принципиальная схема блока питания устройства управления.

В контур точного регулирования тока в нагрузке входят: транзисторный регулятор, источник опорного напряжения, модулятор, уси-

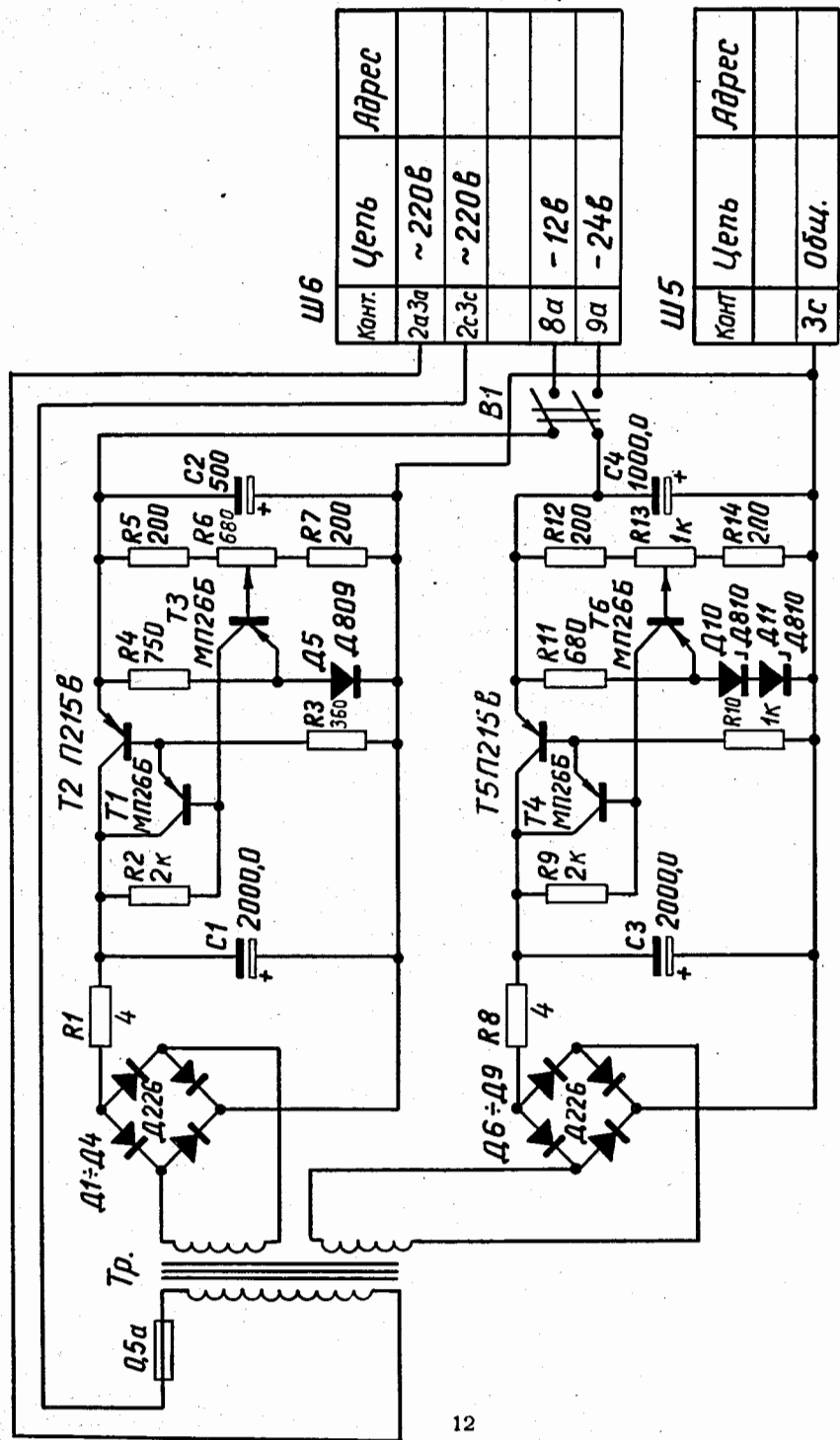


Рис. 4. Принципиальная схема блока питания устройства управления.

литель низкой частоты, фазовый детектор, а также ряд вспомогательных устройств.

Схема регулирующего блока, обеспечивающего ток в нагрузке до  $I_{H \max} = 50$  а, показана на рис. 5. Регулирующие транзисторы Т2-Т17, а также согласующий эмиттерный повторитель Т1 устанавливаются на латунном радиаторе, охлаждаемом водой. Симметрирование транзисторов по току достигается установкой в цепи эмиттера каждого транзистора сопротивления 0,8 ом.

На рис. 6 представлена схема блока сравнения и усиления сигнала ошибки.

Источником опорного напряжения в схеме сравнения служит трехконтурный стабилизатор напряжения. Первый контур стабилизации выполнен по схеме транзисторного компенсационного стабилизатора напряжения на транзисторах Т12-Т13 и диодах Д7-Д9. Напряжение на выходе этого стабилизатора подбором сопротивлений делителя R26 и R27 устанавливается равным  $55 \pm 1$  в. Вторым контуром служит параметрический стабилизатор на диодах Д3-Д6 типа Д818А. И, наконец, последняя ступень, являющаяся также параметрическим стабилизатором на диоде Д818Е, позволяет получить высокостабильное напряжение, равное 9 в. Общий коэффициент стабилизации при изменении напряжения сети составляет  $\approx 10^4$ .

Разность между падением напряжения на эталонном сопротивлении (включенном в цепи стабилизируемого тока) и регулируемой частью опорного напряжения поступает на вход транзисторного модулятора Т1-Т2, где преобразуется в переменное напряжение прямоугольной формы - сигнал ошибки. Регулируемая часть опорного напряжения снимается с делителя R17, R19 и R20. В качестве R17 используется многооборотное переменное сопротивление 1 ком, позволяющее достаточно плавно изменять напряжение на выходе делителя в диапазоне  $1 \pm 2,25$  в.

Модулятор выполнен на транзисторах типа П30 по схеме параллельно-последовательного транзисторного ключа [6]. Сердечник модуляционного трансформатора набран вперекрышку из пермалловых пластин Ш-12, толщина пакета 12 мм.



Требования к триодам П4Д

для  $T_1$   $\beta \geq 50$ ;  $S = 2 \pm 4\%$ ;  $I_{ко} \leq 1 \text{ мА}$ ;

для  $T_2$ - $T_7$   $\beta \geq 30$ ;  $S = 2 \pm 4\%$ ;  $I_{ко} \leq 1 \text{ мА}$ .

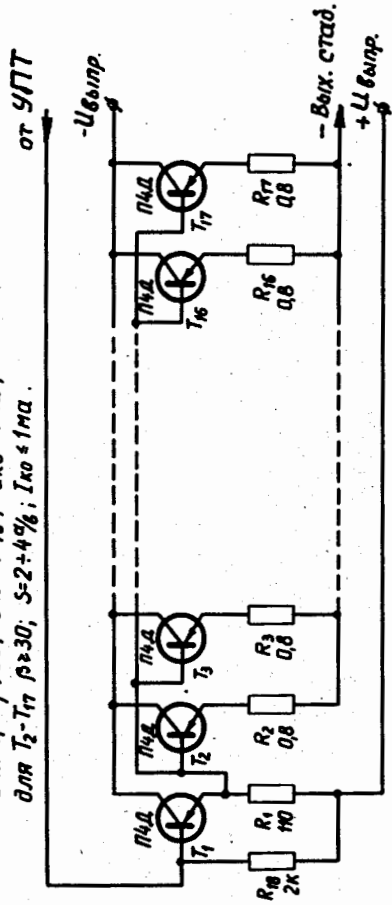


Рис. 5. Принципиальная схема транзисторного регулятора 50 а.

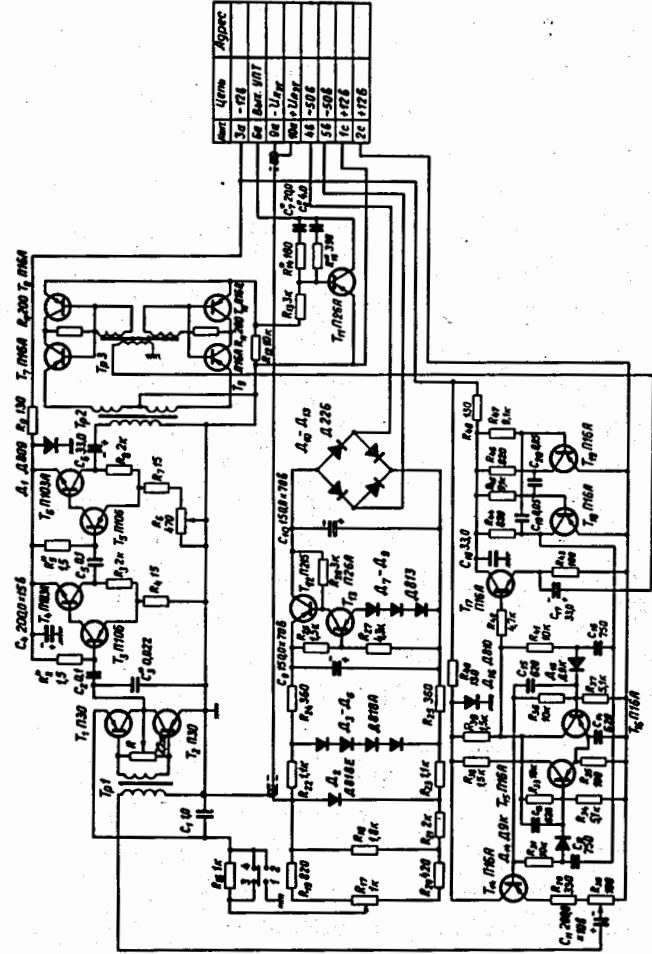


Рис. 6. Принципиальная схема блока сравнения и усиления сигнала ошибки.

Обмотки трансформатора выполнены следующим образом. Первой наматывается обмотка II - в два провода. Она содержит 2x150 витков провода ПЭВ-2  $\phi$  0,14 мм. Обе половины обмотки включаются последовательно. Затем наматывается слой лакоткани, накладывается электростатический экран из медной фольги, снова слой лакоткани и, наконец, наматывается первичная обмотка - 480 витков провода ПЭВ-2  $\phi$  0,14.

Усиление сигнала ошибки осуществляется транзисторным усилителем низкой частоты Т3+Т6. Затем напряжение сигнала ошибки выпрямляется фазочувствительным детектором (Т7-Т10) и поступает на вход УПТ (Т11). Выходное напряжение УПТ через согласующие каскады Т1 и Т2 (рис. 7) управляет транзисторным регулятором. Максимальное значение коэффициента передачи от входа модулятора до выхода фазового детектора равно  $\approx 1200$ .

Транзистор УПТ Т11 (типа П26А или П21А) подбирается с малым значением тока  $I_{к0}$ . Температурная стабильность УПТ может быть повышена включением небольшого сопротивления (200 ом) в цепь эмиттера Т11.

Коммутирующие напряжения на модулятор и фазовый детектор снимаются с плеч триггера (Т15-Т16) через развязывающие эмиттерные повторители (Т14, Т17). Использование для получения коммутирующего напряжения триггера, работающего в режиме деления частоты, позволяет получить прямоугольные импульсы напряжения со стабильной скважностью, равной 0,5. Частота коммутации выбрана равной 800 гц. Задающий мультивибратор (Т18-Т19) должен работать на удвоенной частоте.

Описанный стабилизированный источник тока питает обмотки электромагнита, применяемого для калибровки магнитометров. Диапазон регулирования тока 0,7+34 а.

На рис. 8 представлена кривая дрейфа тока, записанная с помощью измерителя нестабильности. Стабилизатор включен за 40 минут до начала записи. Режим работы стабилизатора:  $I_H = 10$  а,  $U_H = 22$  в,  $U_{кэ} = 10$  в. Максимальное отклонение тока в нагрузке от первоначально установленной величины не превышает  $\approx 8 \cdot 10^{-3}\%$ . На графике отмечены колебания температуры в помещении, где установлен стабилизированный источник и электромагнит.

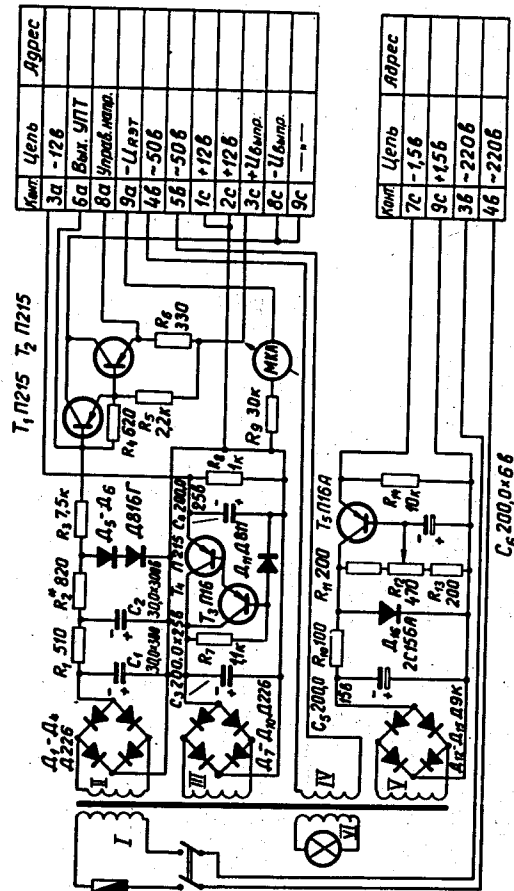


Рис. 7. Принципиальная схема блока согласующих УПТ и источников питания.

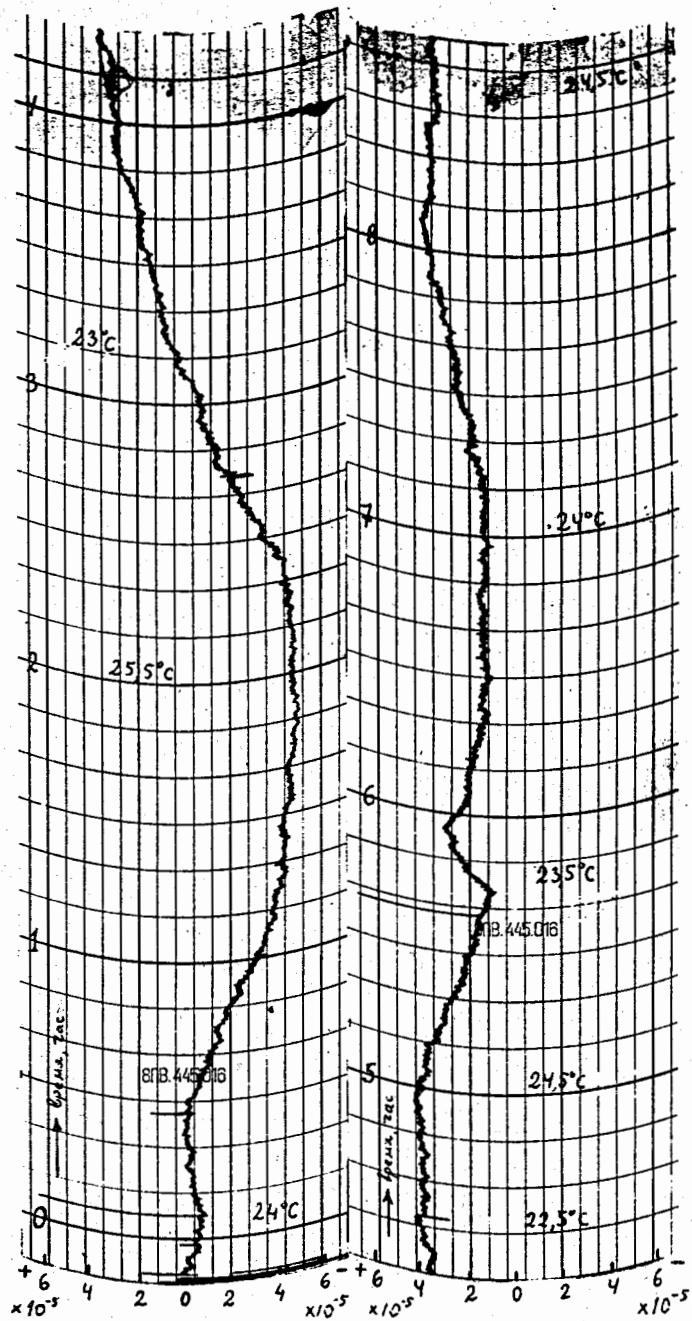


Рис. 8. Кривая дрейфа тока.

Л и т е р а т у р а

1. R.L. Garvin. *Rev.Scient.Instrum.*, 29, 223-224 (1958).
2. M.H.N. Potok. *Electr.Engin.*, 31, 745-746 (1959).
3. I. Lutz, Ch. Pike. *Rev.Scient.Instrum.*, 30, 841 (1959).
4. J.C.S. Richard. *Electr.Engin.*, 32, 22-23 (1960).
5. Ю.Н. Денисов, В.В. Калиниченко, А.Г. Комиссаров, Ю.И. Сусов. Препринт ОИЯИ, 13-5068, Дубна, 1970 г.
6. И.И. Акулов, В.Я. Баржин, Р.А. Валитов и др. Теория и расчет основных радиотехнических схем на транзисторах. Изд. "Связь", 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 июня 1970 года.