

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13-96-326

Г.Г.Казакова, В.В.Калиниченко

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК  
ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ПИТАНИЯ  
ОБМОТКИ БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА

1996

Стабилизированный источник постоянного тока  
для питания обмотки бета-спектрометра

— Описан стабилизированный источник постоянного тока для питания обмотки бета-спектрометра. Диапазон регулирования тока составляет 0,3—20 А, номинальное напряжение источника — 30 В. Величины нестабильности тока и пульсаций составляют  $\sim 10^{-3}$  при рабочем токе 1 А. Приведены блок-схемы источника и датчика тока, а также принципиальные схемы ряда узлов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1996

Stabilized Direct-Current Power Supply Unit for the Winding of  
the Beta-Spectrometer

Stabilized DC power supply unit for the winding of the beta-spectrometer is described. The controlled current range of the unit is 0.3—20 A, the voltage rating of that is 30 V. The current instability and pulsation values are  $\sim 10^{-3}$  at the operating current 1 A. The block diagrams of the unit and of the current transducer, the circuit diagrams of its blocks are given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Упрощенная блок-схема стабилизированного источника постоянного тока для питания обмотки бета-спектрометра [1] представлена на рис.1. Источник содержит выпрямительный агрегат 1, транзисторный регулятор постоянного тока 2, датчик температуры 3, первый 4 и второй 5 измерительные преобразователи (датчики) постоянного тока, схему сравнения 6, усилитель тока 7, источник опорного напряжения 8, цифроаналоговый преобразователь 9, блок связи 10, переключатель режима работы источника S, измерительную схему тепловой защиты 11, исполнительный элемент тепловой защиты 12 и обратный диод VD3. На блок-схеме показаны также цепи коммутации выпрямительного агрегата 1 (магнитный пускатель ПМ с его контактами), элементы защиты (плавкие предохранители FS1—FS3), элементы управления (кнопки «вкл», «откл»), элементы сигнализации (светодиоды VD1, VD2).

Обсуждаемый стабилизированный источник постоянного тока представляет собой компенсационный стабилизатор тока с последовательным регулятором тока. Нагрузка (обмотка L бета-спектрометра) подключена к выходу постоянного тока выпрямительного агрегата 1 через последовательно соединен-

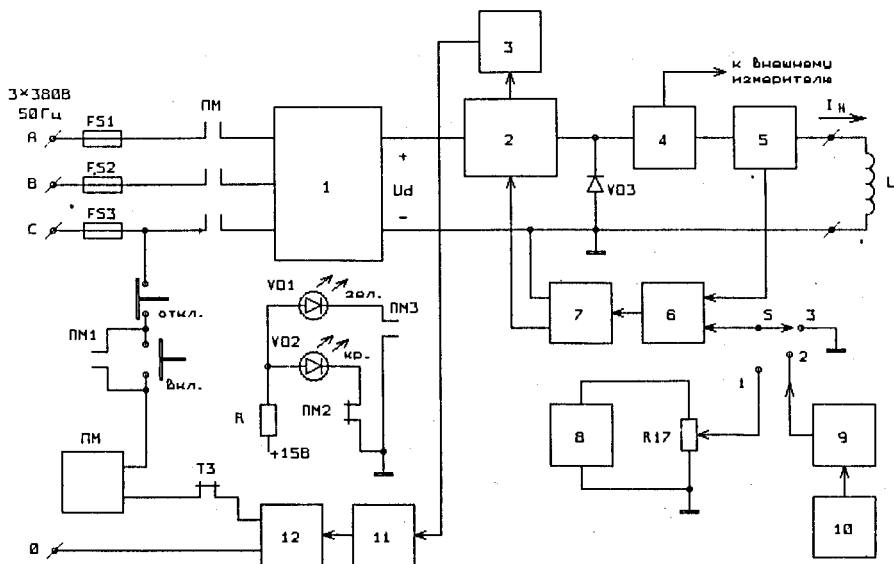
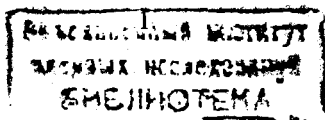


Рис.1. Упрощенная блок-схема стабилизированного источника постоянного тока для питания обмоток бета-спектрометра



ные транзисторный регулятор 2 и измерительные преобразователи постоянного тока (ИППТ) 4 и 5. В ИППТ 4 и 5 стабилизируемый ток  $I_H$  преобразуется в адекватное напряжение, которое с выхода ИППТ 5 поступает на один из входов блока сравнения 6. На второй вход блока сравнения 6 подается напряжение с датчика величины тока  $I_H$ : при ручном управлении (положение 1 переключателя S) таким датчиком является гелипот R17, подключенный к источнику опорного напряжения 8; при управлении от ЭВМ (положение 2 переключателя S) датчиком служит цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) 9. Отметим, что ЦАП 9 имеет средства для ручной записи кода уставки тока, так что ЦАП 9 может быть использован в качестве датчика тока нагрузки и в режиме ручного управления источником. При отклонении величины тока  $I_H$  от установленного значения на выходе блока сравнения 6 произойдет изменение величины сигнала рассогласования. На управляющий вход регулятора тока 2 сигнал рассогласования подается через усилитель тока 7, под действием меняющегося сигнала рассогласования ток нагрузки также изменяется, приближаясь к установленному значению, и удерживается близко к этому значению с отклонением, равным величине действующего рассогласования в контуре стабилизации (авторегулирования).

ИППТ 4 служит для точного измерения величины тока  $I_H$ , выход этого ИППТ подключается к внешнему измерителю тока. Положение 3 переключателя S соответствует нулевой уставке тока нагрузки.

Обратный диод VD3 предотвращает возникновение перенапряжений в цепях регулятора 2 и нагрузки L при запирании регулятора 2.

Важнейшим узлом стабилизированного источника постоянного тока, существенно влияющим на точность стабилизации тока, является ИППТ. В обсуждаемом источнике используется ИППТ с магнитным сравнением постоянных токов (магнитный компаратор) [2], при этом ИППТ построен на основе магнитного модулятора с удвоением частоты, ввод которого в рабочую зону осуществляется путем медленного изменения компенсирующего тока [3]. Магнитный модулятор с удвоением частоты используется в качестве детектора неравновесия намагничивающих сил (н.с.) в преобразователе неравновесия н.с. Упрощенная блок-схема ИППТ показана на рис.2 (отметим, что ИППТ 4 и 5 идентичны).

ИППТ содержит магнитомодуляционный узел 1, генератор возбуждения 2 с выходами основной (F) и удвоенной (2F) частот, фазочувствительный детектор 3, усилитель постоянного тока 4, эталонный резистор 5, датчик насыщения магнитопроводов 6, балластный резистор 7 и резистивный делитель 8.

Магнитомодуляционный узел (ММУ) 1 содержит рабочие магнитопроводы T1 и T2 соответственно с обмотками возбуждения W1 и W2, магнитный экран T3, измерительную W и компенсационную  $W_k$  обмотки.

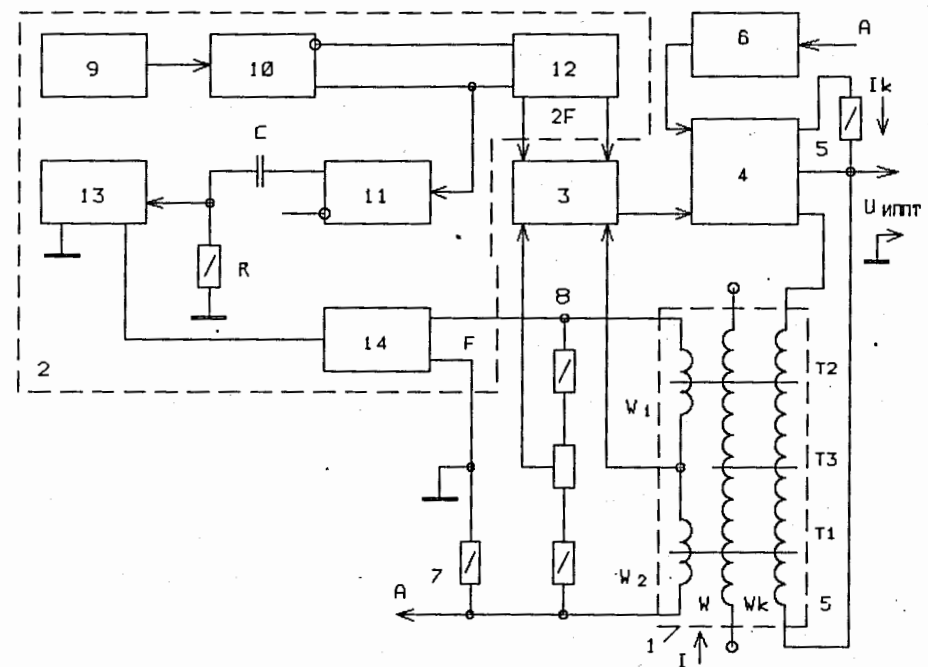


Рис.2. Упрощенная блок-схема измерительного преобразователя постоянного тока

Генератор возбуждения (ГВ) 2 содержит мультивибратор (задающий генератор) 9, первый 10 и второй 11 триггеры со счетным входом (делители частоты на 2), первый 12 и второй 13 импульсные усилители, оконечный усилитель 14. Первый триггер со счетным входом 10 и первый импульсный усилитель 12 вырабатывают напряжение прямоугольной формы частоты 2F, которое в качестве коммутирующего (опорного) подается на соответствующие входы фазочувствительного детектора 3.

На выходе второго триггера со счетным входом 11 вырабатывается последовательность прямоугольных импульсов напряжения с частотой повторения F. При этом длительности импульсов и пауз между ними равны. Это позволяет получить на выходе оконечного усилителя 14 переменное напряжение прямоугольной формы (напряжение возбуждения ММУ, подаваемое на обмотки W1 и W2), длительность положительной полувольты которого равна длительности его отрицательной полувольты. При таком соотношении указанное напряжение не содержит четных гармоник, что является одним из основных требований к генератору возбуждения магнитного модулятора с удвоением частоты. Выход триггера 11 подключен ко входу импульсного усилителя 13 через разделительный конденсатор C (R-резистор утечки).

Обсуждаемый ИППТ представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования следящего типа: его выходное напряжение  $U_{\text{ИППТ}}$  «следит» за входным током  $I_{\text{H}}$ . Работа подобных ИППТ (что касается контура авторегулирования, преобразователя неравновесия н.с. и других узлов) описывается в работах [4,5]. Входной ток и выходное напряжение ИППТ связаны соотношением:  $I_{\text{H}} = K U_{\text{ИППТ}}$ , где  $K = N_{\text{K}} / N R_3$ ,  $N_{\text{K}}$  и  $N$  — число витков компенсационной  $W_{\text{K}}$  и измерительной  $W$  обмоток соответственно,  $R_3$  — номинальное значение сопротивления эталонного резистора 5.

Приведем конструктивные данные ММУ на номинальный ток 20 А. В ММУ используются магнитопроводы кольцевого типа. Рабочие магнитопроводы  $T1$  и  $T2$  имеют размеры  $31 \times 24,5 \times 5$  мм, а магнитный экран  $T3$  —  $33 \times 22,5 \times 10$  мм. Для изготовления магнитопроводов использована лента из аморфного железа 71КНСП толщиной 20—30 мкм. Обмотки возбуждения  $W1$  и  $W2$  выполнены проводом ПЭВ-2  $\varnothing 0,28$  мм и содержат по 200 витков. Компенсационная обмотка  $W_{\text{K}}$  намотана тем же проводом и имеет 1000 витков. Измерительная обмотка  $W$  выполнена в виде одного проходного витка (медная трубка  $7 \times 1$ , мм).

На рис.3 приведена принципиальная электрическая схема блока ИППТ, содержащего все узлы генератора возбуждения 2, а также фазочувствительный детектор 3 и узлы 7, 8. Ниже приводится соответствие между функциональными узлами схем рис.2 и 3.

Задающий генератор 9 выполнен на трех элементах 2И-НЕ МС DD1. Частота генерации определяется значением постоянной времени  $R1C1$ . В качестве первого 10 и второго 11 триггеров служат D-триггеры МС DD2. Первый импульсный усилитель 12 содержит транзисторы  $VT7$ ,  $VT10$  и трансформатор  $T1$ . Второй импульсный усилитель 13 и оконечный усилитель 14 выполнены соответственно на транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$  и  $VT3$ ,  $VT4$ . Элементы  $C2$ ,  $R5$  и  $R14$  соответствуют элементам  $C$ ,  $R$  и 7 блок-схемы. Резистивный делитель 8 содержит резисторы  $R13$ ,  $R17$  и  $R21$ . Фазочувствительный детектор 3 выполнен на транзисторах  $VT5$ — $VT9$  и включает в себя развязывающий трансформатор  $T2$  и резисторы  $R15$ ,  $R19$ ,  $R20$  и  $R22$ . Его сигнальными входами служат выводы обмотки  $W_3$ .

Балластный резистор  $R14$  (элемент 7 на блок-схеме рис.2) ограничивает ток в цепи последовательно соединенных обмоток возбуждения  $W1$  и  $W2$ . Падение напряжения на балластном резисторе  $R14$  содержит информацию о степени насыщения магнитопроводов ИППТ. Однополупериодный выпрямитель на диоде  $VD2$  с фильтром  $R3C2$  и ограничивающим резистором 14 является одним из узлов датчика насыщения магнитопроводов 6. На вход этого выпрямителя подается напряжение с балластного резистора  $R14$ , а его выход-

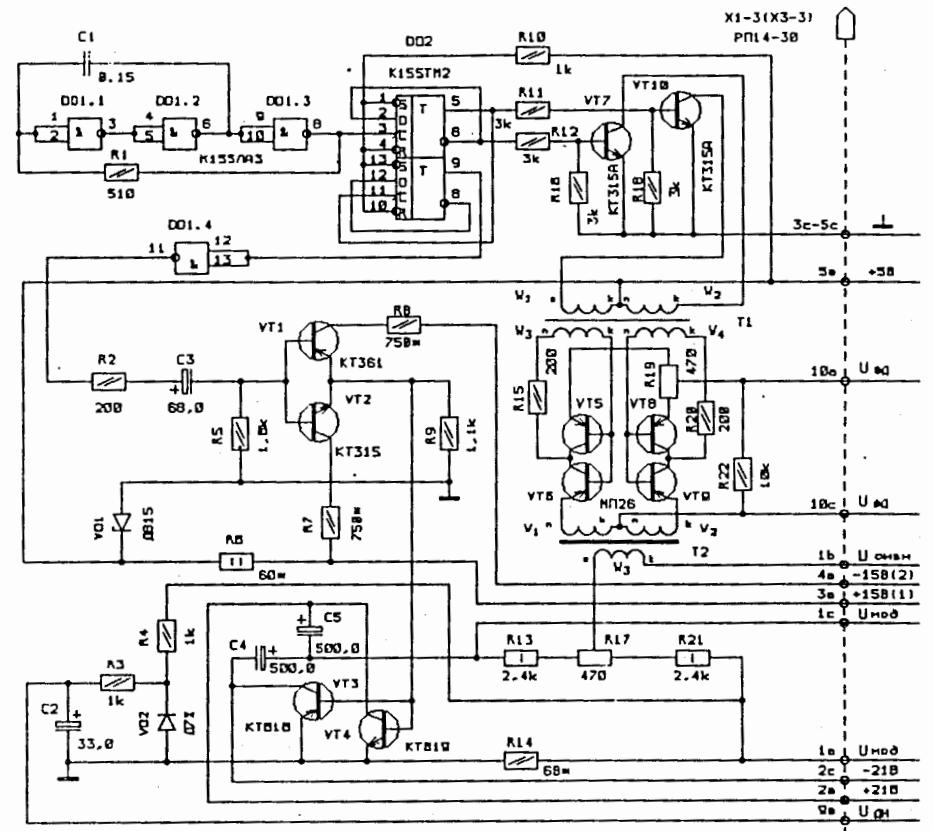


Рис.3. Принципиальная электрическая схема блока, содержащего генератор возбуждения и фазочувствительный детектор

ное напряжение  $U_{\text{дн}}$  используется для детектирования перехода магнитопроводов в состояние насыщения.

На рис.4 приведена принципиальная электрическая схема блока ИППТ, содержащего усилитель постоянного тока 4, узлы датчика насыщения магнитопроводов 6 и эталонный резистор 5, роль которого выполняет  $R18$ .

Усилитель постоянного тока (УПТ) 4 содержит усилитель напряжения на МС DA2 и усилитель тока на транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$ . Напряжение  $U_{\text{фд}}$  с выхода фазочувствительного детектора 3 через контакт 4а поступает на инвертирующий вход МС DA2. К неинвертирующему входу МС DA2 через делитель  $R3$ ,  $R4$  подключен конденсатор  $C1$ , на который через контакт  $S1$  и резистор  $R13$  подается напряжение с выхода МС DA3 (выход датчика насыщения магнитопроводов 6). УПТ охвачен местной отрицательной связью ( $R5$ ,  $C2$ ).



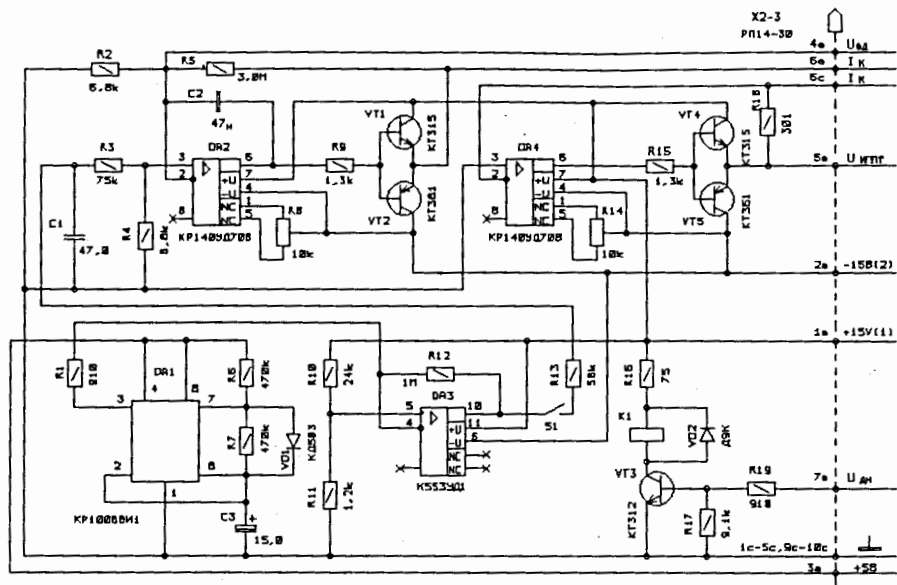


Рис.4. Принципиальная электрическая схема блока усилителя постоянного тока и датчика насыщения магнитопроводов

К контактам 6а и 6с блока подключена компенсационная обмотка  $W_k$ , в которую подается компенсирующий ток  $I_k$  с выхода УПТ. В цепь тока  $I_k$  включен также эталонный резистор R18 через трансформатор сопротивления [6], который выполнен на МС ДА4 и транзисторах VT4, VT5. Эта мера (введение трансформатора сопротивления) позволяет практически предотвратить существенное ухудшение частотных свойств ИППТ, которое произошло бы при прямом включении относительно большого сопротивления R18 (в нашем случае собственное активное сопротивление обмотки  $W_k$  составляет ~ 10 Ом, а R18 — 301 Ом). Дело в том, что прямая трансформаторная связь между обмотками измерительной W и компенсационной  $W_k$  может быть эффективно использована для формирования широкой полосы пропускания ИППТ при условии, что суммарное активное сопротивление в цепи обмотки  $W_k$  относительно невелико.

Детектором насыщения магнитопроводов ИППТ служит пороговая схема на транзисторе VT3. Через контакт 7а на ее вход поступает напряжение  $U_{дн}$ . Исполнительным элементом является электромагнитное реле K1. Через его контакт S1 и резистор R13 переменное напряжение прямоугольной формы с выхода датчика насыщения подается на конденсатор C1, если произошло насыщение магнитопроводов. На конденсаторе C1 формируется двухполярное

напряжение пилообразной формы, под действием которого ток  $I_k$  в обмотке  $W_k$  относительно медленно изменяется от  $-I_{км}$  до  $+I_{км}$ . При этом происходит поиск рабочей зоны магнитного модулятора и ввод в нее, после чего выход датчика насыщения магнитопроводов отключается от конденсатора C1. Переменное напряжение прямоугольной формы вырабатывается МС ДА3, на вход которой поступают прямоугольные импульсы напряжения с задающего генератора, выполненного на МС ДА1. Частота повторения импульсов порядка 0,1 Гц.

На рис.5 представлена принципиальная электрическая схема блока, в котором находятся узлы, показанные на блок-схеме рис.1: схема сравнения 6, усилитель тока 7, источник опорного напряжения 8, переключатель режима работы S, гелипот для ручной установки тока R17.

Схема сравнения выполнена на МС ДА1. Через цепочку C1R4 замыкается цепь местной отрицательной обратной связи. На неинвертирующий вход МС ДА1 через контакт 3а подается напряжение  $U_{иппт}$  с выхода ИППТ 5. На инвертирующий вход МС ДА1 могут быть поданы следующие сигналы:

а) через переключатель S1.1 напряжение уставки с гелипота R17 (режим ручного управления);

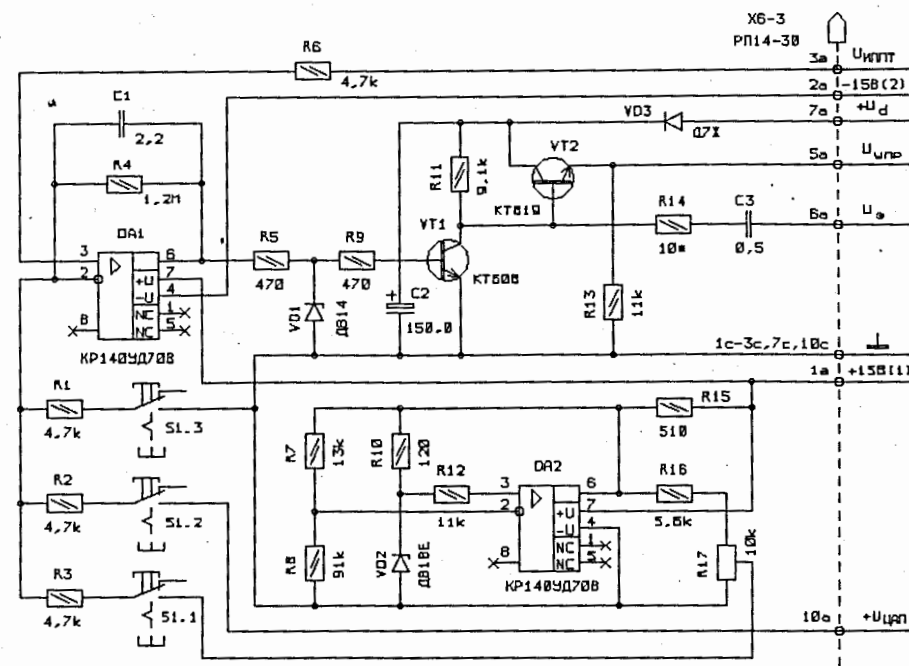


Рис.5. Принципиальная электрическая схема блока сравнения, усиления и опорного напряжения

б) через переключатель S1.2 и контакт 10а напряжение уставки  $U_{цап}$  с выхода ЦАП 9 (режим управления от ЭВМ, режим ручного управления);

в) через переключатель S1.3 нулевое напряжение, что соответствует нулевой уставке тока нагрузки.

Сигнал рассогласования с выхода схемы сравнения (вывод 6 МС ДА1) поступает на вход усилителя тока, выполненного на транзисторах VT1 (усилитель напряжения) и VT2 (усилитель тока). Питание коллекторных цепей транзисторов VT1 и VT2 осуществляется постоянным напряжением  $U_d$  с выхода выпрямительного агрегата 1 через фильтр VD3, C2. Цепочка VD1, R9 защищает ДА1 от высокого напряжения  $U_d$  (~ 50 В), которое будет подано на вывод 6 ДА1 при пробое промежутка коллектор-база транзистора VT1. Цепочка C3, R14 служит для подавления высокочастотных колебаний, возбуждающихся в блоках 2, 7 за счет паразитных связей.

Источник опорного напряжения (ИОН) выполнен по схеме, описанной в [7], и содержит МС ДА2, стабилитрон VD2 и резисторы R7, R8, R10, R12 и R15. Нагрузкой ИОН является делитель R16, R17.

На рис.6 показана принципиальная электрическая схема блока, содержащего измерительную схему тепловой защиты 11 и исполнительный элемент тепловой защиты 12. Здесь же условно показан датчик температуры 3, в качестве которого служит транзистор VT17 в диодном включении. Транзистор VT17 установлен на радиаторе транзисторного регулятора постоянного тока 2 и включен в плечо измерительного моста, в который входят также резисторы R1, R3, R4 и R5. Мост питается от параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на транзисторе VT1 и стабилитроне VD1. Настройка моста осуществляется таким образом, чтобы при выполнении условия  $T_p < T_{рдоп}$  потенциал на неинвертирующем (вывод 3) входе МС ДА1 был выше потенциала на его инвертирующем (вывод 2) входе (здесь  $T_p$  — текущее значение температуры радиатора транзисторного регулятора постоянного тока,  $T_{рдоп}$  — допустимое значение температуры этого радиатора). В этом случае на выходе МС ДА1 (вывод 6) вырабатывается положительное напряжение, через светодиод VD2 протекает ток, часть этого тока поступает в базу транзистора VT2 и поддерживает его в открытом состоянии. Это, в свою очередь, обеспечивает открытое состояние исполнительного элемента тепловой защиты — тиристорного ключа, выполненного на оптронных тиристорах VD3, VD4, соединенных по силовой цепи встречно-параллельно. Такое состояние соответствует нормальной работе источника, что индицируется свечением светодиода VD2.

При перегреве транзисторов транзисторного регулятора ( $T_p > T_{рдоп}$ ) падение напряжения на VT17 уменьшается и потенциал на выводе 2 МС ДА1

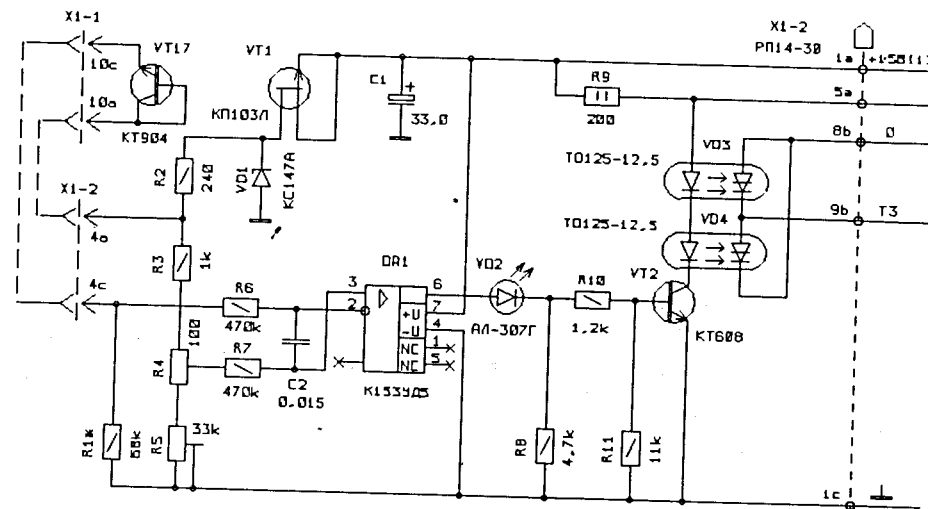


Рис.6. Принципиальная электрическая схема блока тепловой защиты транзисторного регулятора постоянного тока

становится выше потенциала на ее выводе 3. При этом на выходе МС ДА1 напряжение уменьшается до 1,5—2 В, что приводит к запирающему транзистора VT2 и, соответственно, тиристорного ключа VD3, VD4. Это вызывает отключение обмотки магнитного пускателя ПМ от сетевого напряжения и выключение источника. Пока перегрев будет сохраняться ( $T_p > T_{рдоп}$ ), будет отсутствовать свечение светодиода VD2 и тепловая защита не позволит включить источник с помощью элементов управления.

Принципиальная электрическая схема транзисторного регулятора постоянного тока показана на рис.7. Он содержит 14 силовых транзисторов VT1—VT14, соединенных параллельно. В цепи эмиттера каждого транзистора включены уравнивающий резистор 0,7 Ом и плавкий предохранитель. Совместно с усилительными транзисторами VT15 и VT16 силовые транзисторы образуют составной транзистор, работающий в качестве эмиттерного повторителя. Все транзисторы установлены на медной плите (радиаторе), охлаждаемой проточной водой. В блоке регулятора постоянного тока имеется светодиодная индикация. При пробое какого-либо силового транзистора начинает светиться соответствующий светодиод. На плите установлен также транзистор VT17, являющийся датчиком температуры.

Выпрямительный агрегат 1, упрощенная принципиальная схема которого приведена на рис.8, содержит трехфазный силовой трансформатор Т и мос-

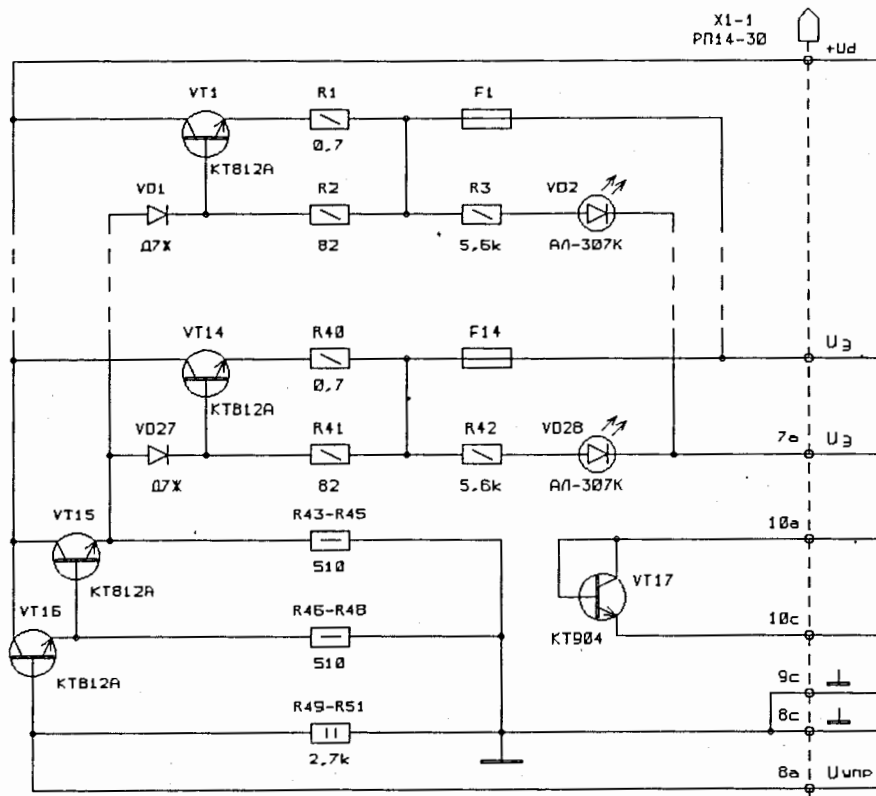


Рис.7. Принципиальная электрическая схема блока транзисторного регулятора постоянного тока

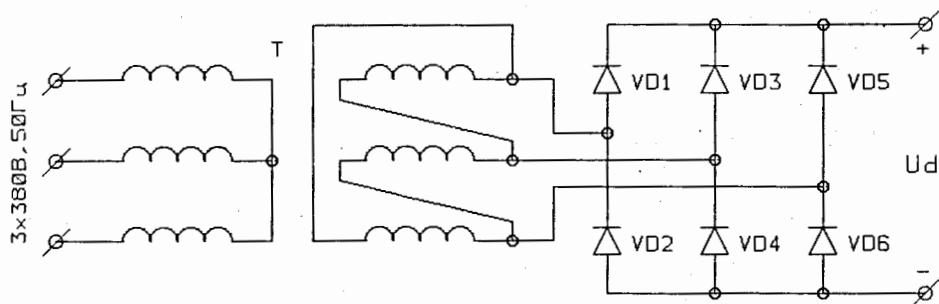


Рис.8. Упрощенная принципиальная электрическая схема выпрямительного агрегата

товой выпрямител на силовых полупроводниковых вентилях VD1—VD6. Применен серийно выпускаемый промышленностью трансформатор типа ТСЗИ-1,6,380/36 В. Силовые вентили установлены на стандартных радиа-

торах воздушного охлаждения. В агрегате используются вентили типа В-50, которые при всех рабочих режимах агрегата работают с естественным воздушным охлаждением.

В заключение приведем основные технические характеристики рассматриваемого стабилизированного источника постоянного тока.

1. Сопротивление нагрузки — 1,53 Ом, номинальное напряжение — 30 В.
2. Диапазон регулирования тока — 0,3—20 А.
3. Дискретность регулирования — 10 мА.
4. Относительная ошибка стабилизации (включая нестабильность и пульсации) при токе 1 А — 0,1%.

В таблице приведены результаты испытаний источника в различных режимах. За все время испытаний температура в помещении изменялась не более чем на 5°C, наблюдаемые изменения напряжения сети составляли ± 3%.

Ток нагрузки, А	1	2	5	10	15	20
Выбег за 0,5 часа, %	0,15	0,1	0,09	0,04	0,03	0,03
Нестабильность за 6 часов, %	0,1	0,05	0,04	0,01	0,007	0,005

Авторы выражают благодарность В.А.Морозову за постановку задачи и Г.П.Лещенко за помощь при подготовке материалов к печати.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов В.А., Муминов Т.М. — Препринт ОИЯИ Р13-3431, Дубна, 1967.
2. Денисов Ю.Н., Калиниченко В.В. — Сообщение ОИЯИ 13-5960, Дубна, 1971.
3. Калиниченко В.В. — Сообщение ОИЯИ Р13-95-168, Дубна, 1995.
4. Спектор С.А. — Измерение больших постоянных токов. Л.: Энергия, 1978.
5. Розенблат М.А. — Магнетоника. М.: Наука, 1967.
6. Шило В.Л. — Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Советское радио, 1979.
7. Федорков Б.Г., Телец В.А. — Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 сентября 1996 года.