

С3933

К-44  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

973/1-72



P13 - 6231

Ю. Ф. Киселев

СТАБИЛИЗАТОР ТОКА  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНоиДА

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1972

P13 - 6231

Ю.Ф. Киселев

СТАБИЛИЗАТОР ТОКА  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНОИДА

*Направлено в ЦТЭ*

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

## 1. Введение

Наиболее распространенный метод стабилизации тока сверхпроводящего соленоида (СПС) с помощью сверхпроводящей перемычки (СПП) оказывается неудобным или вообще не применимым для ряда физических задач, если источник тока СПС не обладает достаточно высокой кратковременной и долговременной стабильностью тока. В опытах по динамической поляризации ядер (ДПЯ) изменение тока нестабильного источника после охлаждения СПП не вызывает заметных смещений поля в СПС. Однако последующий перегрев СПП для осуществления небольших сдвигов поля может привести к значительным смещениям сигнала ЯМР и возможной утечке ядерной поляризации. Одной из основных причин нестабильности тока источника может быть изменение сопротивления медных вводов тока при изменении давления паров  $He^4$ , охлаждающих эти вводы. Например, увеличение давления паров  $He^4$  с 1 мм рт.ст. до 1,5 мм рт.ст. приводило к смещениям поля на 400 гс в поле  $27 \cdot 10^3$  гс при работе с источником фирмы "THE OXFORD INSTRUMENT CO. LTD".

Не всегда могут оказаться удобными наблюдаемые нами небольшие смещения поля СПС при переходе перемычки из нормального в сверхпроводящее состояние.

Аналогичное требование высокой стабильности источника тока возникает при измерении вольтамперных характеристик сверхпроводников вблизи критических токов и в других низкотемпературных экспериментах.

По нашему мнению, нестабильность тока  $7 \cdot 10^{-6}$  час<sup>-1</sup> - может быть достигнута без усложнения низкотемпературной системы, создающей магнитное поле, применением топологического генератора тока или системы стабилизации с различного рода датчиками поля.

В связи с вышесказанным в Лаборатории ядерных проблем (ОИЯИ) в основном для радиоспектроскопических исследования при сверхнизких температурах был разработан компактный, настольного типа прецизионный источник тока СПС со следующими параметрами:

1. Рабочий ток стабилизатора 0-100 А.
2. Кратковременная ( $\Delta/I$ ) нестабильность тока  $5 \cdot 10^{-6}$  минут<sup>-1</sup>.
3. Долговременная ( $\Delta/I$ ) нестабильность тока  $7 \cdot 10^{-6}$  час<sup>-1</sup>.
4. Скорость автоматического ввода (вывода) тока плавно регулируется в интервале (5-200) А/4АС.
5. Возможна автоматическая и ручная плавная развертка в небольшом диапазоне (0-6%) от основного тока.
6. Время развертки тока по п.5 плавно регулируется от 10 минут до 2 часов.
7. Точность абсолютного отсчета тока 0,1% и 0,002%, если имеется возможность калибровать диапазон плавной развертки (например, по сигналу ЯМР).
8. Питание стабилизатора осуществляется от 3-фазной сети переменного тока с частотой 50 гц.
9. Относительное изменение тока при одновременном изменении напряжения всех фаз с 210 до 240 в менее  $5 \cdot 10^{-6}$ .
10. Нестабильность тока при изменении температуры в комнате от 27 до 18°С приблизительно  $2 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup> при неизменном режиме водяного охлаждения шунта.

11. Предусмотрена тепловая и электрическая защита отдельных узлов стабилизатора.

12. Размеры источника тока (360x410x490) мм.

Схема прибора максимально упрощена за счёт использования интегральной микросхемы типа 1УТ401 и может быть применена для прецизионных стабилизаторов тока магнитов с обмоткой из медного провода с добавлением грубого регулятора напряжения на проходных транзисторах<sup>/2/</sup>.

В работе дано подробное описание всех элементов схемы стабилизатора, а также рекомендации по изменению параметров по П.П. 1.2.3.

## II. Усилитель постоянного тока

Напряжение опорного источника сравнивается с напряжением на стабильном эталонном сопротивлении, по которому протекает ток СПС. Разница усиливается усилителем постоянного тока (УПТ), включенным в цепь отрицательной обратной связи (ООС). Такое сравнение при достаточно большом коэффициенте усиления УПТ происходит с точностью до температурного дрейфа напряжения входных каскадов (УПТ).

В настоящее время для стабилизаторов тока (напряжения) применяются УПТ двух типов:

1. УПТ по системе модулятор-демодулятор (МДМ)<sup>/1,2/</sup>.
2. УПТ без преобразования входного сигнала в сигнал другой формы<sup>/3,5/</sup>.

УПТ первого типа хотя и уменьшают дрейф по сравнению с УПТ второго типа в транзисторном варианте (сравни<sup>/1,2/</sup> и<sup>/3/</sup>), однако радикально<sup>/5/</sup> не устраняют влияния этого дрейфа. Узкополостность и сложность наиболее качественных вариантов этих УПТ по сравнению с УПТ второго типа, а также трудности устранения импульсных помех, создаваемых модулятором, привели нас к разработке УПТ второго типа.

В транзисторном варианте для разработки таких УПТ лучше всего, по-видимому, подходят транзисторы типа КТ-315 Г - прекрасно работающие в микроточном режиме при токе коллектора ( $I_k$ ) 25 мка,  $\beta = 30-50$ . Однако подбор транзисторов по  $I_k = I_k(V_{6.э})$  весьма трудоемкая работа. На рис. 1 изображена принципиальная схема, примененная в стабилизаторе тока СПС.

Транзисторы  $T_1-T_3$  согласуют модуль с составным транзистором ( $T_{14}-T_{18}$ , рис. 4) регулятора тока и позволяют ввести дополнительно к  $R_{\phi}$ ,  $C_{\phi}$  корректирующие звенья ( $L_1, C_1, C_2, C_3$ ), подбором которых устраняются собственные самовозбуждения УПТ во всем диапазоне рабочих токов регулятора (0-100) А. Коэффициент усиления УПТ  $\approx 30000$  измерялся по нестабильности тока при изменении напряжения питания сети.

Дрейф УПТ  $\approx 4$  мкв/ $^{\circ}$ С по крайней мере до  $35^{\circ}$ С и уменьшается за счёт сильной ООС в стабилизаторе ещё приблизительно в 3 раза<sup>/5/</sup>.

Параметрический источник опорного напряжения собран на 4-х скомпенсированных опорных стабилитронах типа Д-818Е. Сопротивление  $R_4$  подбирается таким образом, чтобы ток через  $R_2$  при среднем положении движка  $R_1$  был равен нулю. Изменением  $R_1$  можно в небольших пределах около 0 изменять ток через  $R_2$  и, таким образом, устанавливать диапазон плавной развертки  $\pm 3\%$  от основного тока при  $V_{\text{опорн.}} = 1,2$  в. Вывод тока осуществляется сопротивлением  $R_3$  как  $R_1$ , так и  $R_2$ ,  $R_3$  фирмы "ГАММА" с трехзначными счётчиками.

### III. Регулятор-стабилизатор оборотов двигателя

Оси сопротивлений  $R_2$  и  $R_3$  (рис. 1) сопряжены с редуктором от двигателей Д-83, Д-224, соответственно, которые, в свою очередь, с помощью коаксиального переходника соединяются с валом двигателей МН-250. На рис. 2 представлена принципиальная схема регулятора-стабили-

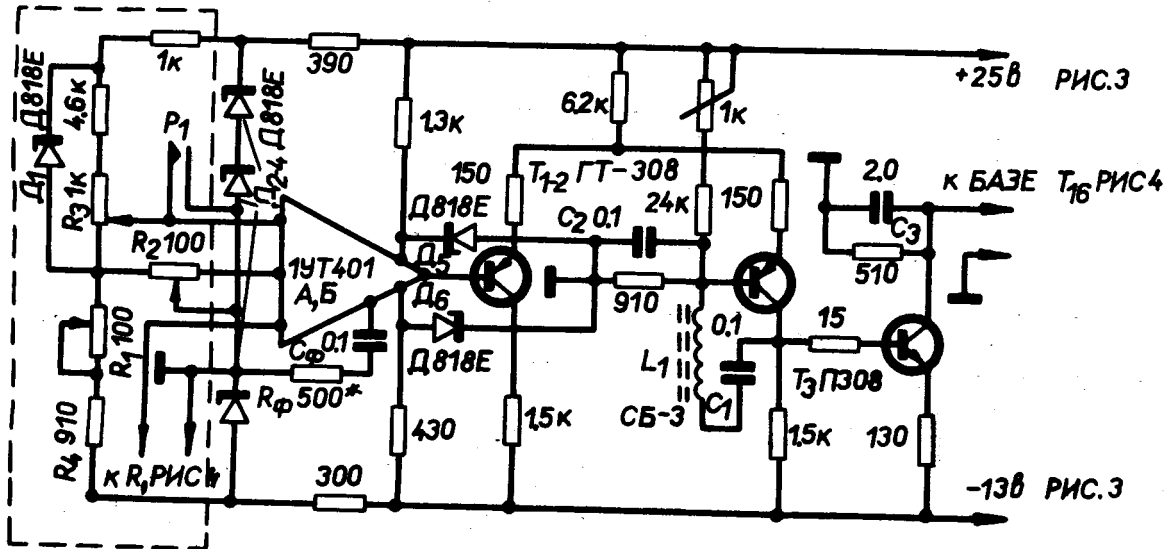


Рис.1. Принципиальная схема усилителя постоянного тока стабилизатора.  
 (Детали отмеченные звездочкой, подбираются при настройке)

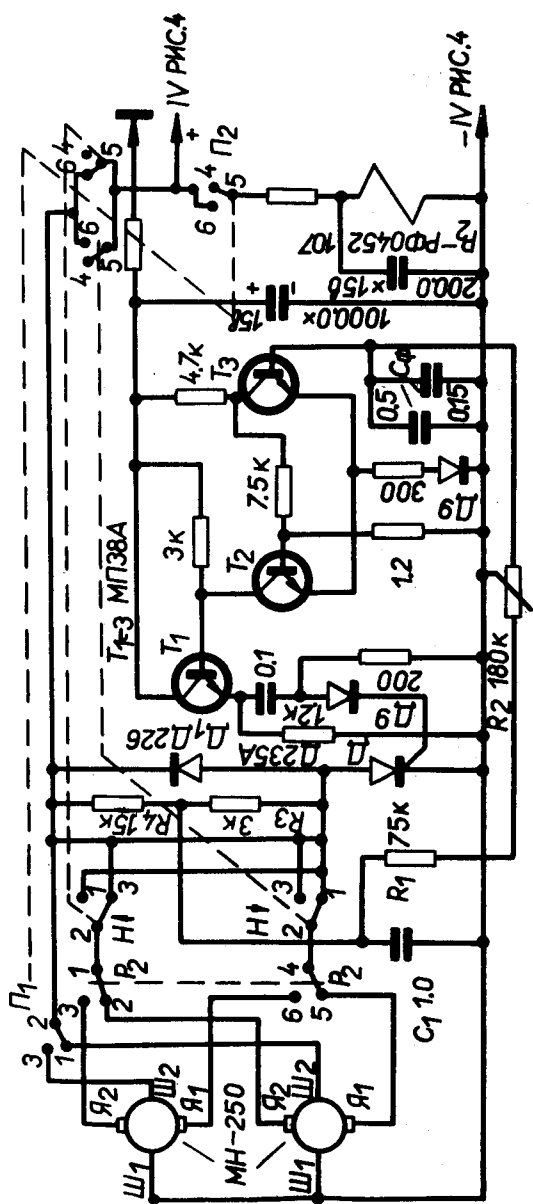


Рис.2. Принципиальная схема регулятора-стабилизатора оборотов двигателя

затора оборотов двигателя с параллельным возбуждением. Транзисторно-тиристорный регулятор позволяет плавно изменять скорость вращения вала двигателя от 0 до 150 об/мин, сохраняя при этом достаточную независимость этой скорости от нагрузки. В широких пределах это не удалось с помощью стабилизатора напряжения, кроме того проходной транзистор такого стабилизатора работал бы в крайне тяжелом тепловом режиме при низких оборотах двигателя. Обмотка возбуждения двигателя включена непосредственно к источнику пульсирующего напряжения питания. В начале каждого полупериода тиристор заперт, т.к. обмотка якоря замыкается диодом  $D_1$ , а напряжение питания становится равным 0. Разность напряжения питания и части напряжения противо-э.д.с. якорной обмотки с делителя  $R_3, R_4$  заряжает конденсатор  $C_\phi$  с постоянной времени  $\approx (R_1 + R_2) C_\phi$  на входе пороговой схемы  $T_2, T_3$  (триггер Шмитта), которая с помощью эмиттерного повторителя  $T_1$  управляет моментом включения тиристора.

Если скорость вращения якоря двигателя уменьшается, эта разность увеличивается и  $C_\phi$  раньше заряжается до порога срабатывания триггера Шмитта и, следовательно, увеличивается порция энергии, подводимая к двигателю. Регулировкой делителя  $R_3, R_4$  и  $C_1$  удается добиться как требуемого диапазона регулировки оборотов, так и необходимой "жесткости" работы двигателя.

С помощью клавишного переключателя  $\Pi_1, \Pi_2$  и реле  $P_2$  можно подключить регулятор оборотов к двигателю, осуществляющему ввод-вывод тока в СПС, или к двигателю, осуществляющему плавную развертку поля ( $R_2$ ). Изменение направления вращения двигателей осуществляется реверсированием тока якорной обмотки ( $H+$ ;  $H-$ ).



IV. Регулятор тока (0-100) А. Стабилизаторы напряжения  
питания управляющих схем

Стабилизатор тока питается от 3-фазной сети переменного тока 50 гц, 220в. Силовой трансформатор (рис.4) марки ТС-1,5/0,5, вторичные обмотки трансформатора перемотаны, 3 сильноточные обмотки намотаны проводом  $\phi$  5 мм с отводом от средней точки. В такой схеме<sup>/4/</sup> вентили В-50 располагаются все на одном охлаждающем экране, что существенно упрощает схему теплоотвода. Силовые транзисторы ( $T_1-T_{13}$ ) П210А подбирались по зависимости  $V_{бэ} = V_{бэ}(I_k)$  и при двух значениях тока коллектора ( $I_k$ ):  $I_{k1} = 2A$  и  $I_{k2} = 8A$ . В каждой из двух партий по 50 штук транзисторов удавалось отбирать по 13 транзисторов с 5% разбросом  $V_{бэ}$ . Этот разброс параметров компенсировался добавочными сопротивлениями по 0,1 ом в эмиттерах транзисторов. Все транзисторы (рис. 4) располагались на латунном П-образном экране, охлаждаемом водой. Между экраном и транзисторами прокладывалась свинцовая фольга, резко уменьшающая тепловое сопротивление контакта транзистор-экран. Добавочные сопротивления располагались внутри экрана на массивном латунном стержне, прижатом к середине экрана через слюдяные прокладки для электроизоляции. Тепло, выделяемое этими сопротивлениями, частично отводилось к теплоотводящему экрану. Вторичные обмотки I и II предназначены для питания стабилизаторов напряжения управляющих схем и параметрического стабилизатора опорного напряжения.

Стабилизаторы напряжения (рис. 3) компенсационного типа с двухкаскадными, дифференциальными УПТ на транзисторах КТ-315 и МП-25Б. Напряжение пульсаций на выходе стабилизаторов  $\approx 1,5$  мв. Температурная неустойчивость выходного напряжения  $\approx 10^{-40}$  С. Емкости  $C_1$  и  $C_2$  устраняют самовозбуждение УПТ стабилизатора.

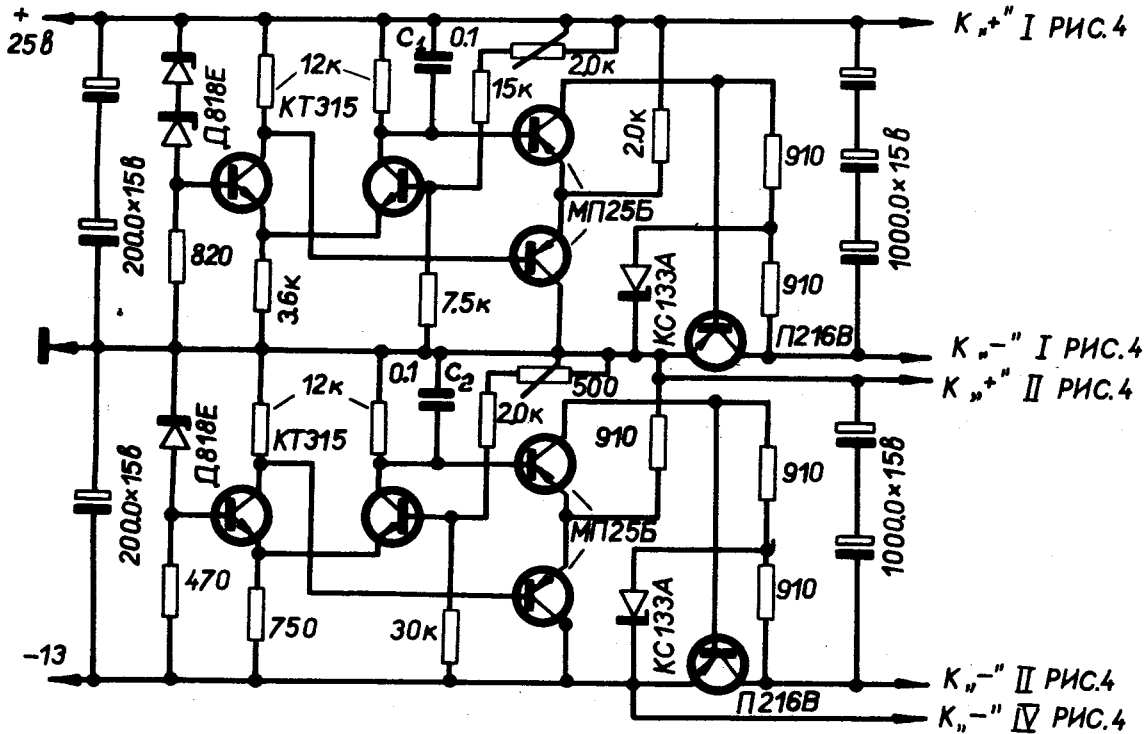


Рис.3. Принципиальная схема стабилизаторов напряжения питания управляющих схем.

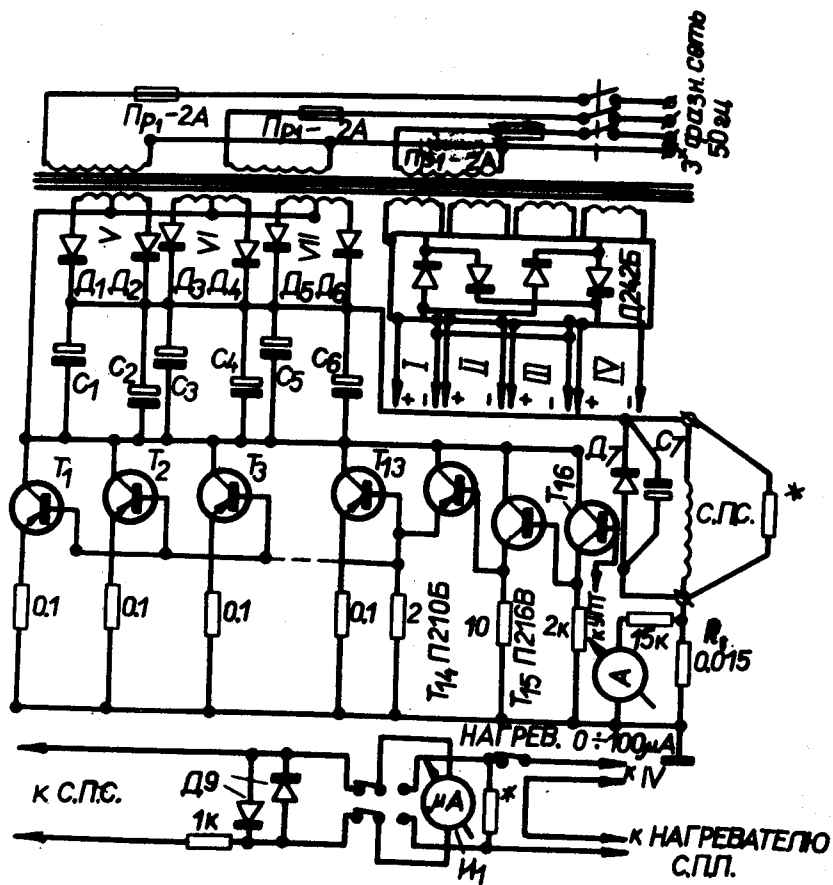


Рис.4. Принципиальная схема регулятора тока (0-100А)  
 Электролитические конденсаторы  $C_1-C_7$  4000 $\times$ 12В;  
 Транзисторы  $T_1-T_{13}$  П210А,  $T_{16}$  МП25Б,  $I_1$  100 $\mu$ А-0-100 $\mu$ А.  
 Диоды  $D_1-D_7$  тип В-50. Напряжения на выходе  
 выпрямителей при холостом режиме работы  
 трансформатора:  
 I-33В; II-18В; III-13В; IV-13В пульсирующее,  
 V, VI, VII - 6,5В.

## V. Электротепловая защита стабилизатора.

### Термостат

На рис. 6 приведена принципиальная схема электротепловой защиты транзисторов стабилизатора. При температуре теплоотводящего экрана  $\approx 50^\circ C$  (в случае, например, отключения воды) происходит обратный разбаланс моста из термосопротивления  $R_1$ , имеющего тепловой контакт с экраном, и сопротивлений ( $R_2, R_3, R_4$ ). Этот разбаланс усиливается транзистором  $T_1$  и тиристор включает реле  $P_1$ , выключающее опорное напряжение.

Схема срабатывает также и при появлении напряжения на СПС  $\approx 0,5$  в. Так как тиристор питается от постоянного напряжения, то после срабатывания реле  $P_1$  необходима внешняя деблокировка для повторного ввода тока в СПС, что может быть сделано лишь после устранения причин аварии. Сопротивлением  $R_4$  легко изменить температуру срабатывания этого устройства.

На рис. 5 изображена часто применяемая схема теплорегулятора термостата делителя  $R_1, R_2, R_3$  (рис. 1) опорного элемента, отличающаяся от<sup>13/</sup> лишь незначительными изменениями, приспособляющими схему к конкретному стабилизатору, так и применением транзистора П702, имеющего меньший ток  $I_{к0}$ , и, следовательно, уменьшающего медленное "плавание" температуры термостата. Температура в термостате  $39 \pm 0,05^\circ$ .

## VI. Результаты и обсуждение

На рис. 7 изображен график нестабильности напряжения на шунте при токе 80А, измеренный прибором В2-13 в течение  $\approx 7,5$  часов непрерывной работы, начиная с момента включения прибора. Нестабильность тока  $\Delta I/I$  измерялась в наиболее трудном режиме для стабилизатора, когда выходные клеммы стабилизатора просто были замкнуты медной перемычкой  $\phi$  5 мм. В этом случае из-за отсутствия большой ( $\approx 2$  гн)

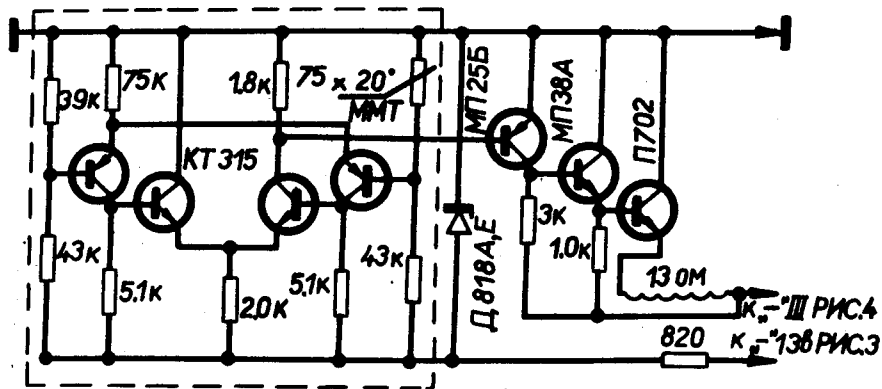


Рис. 5. Принципиальная схема термостабилизатора термостата.

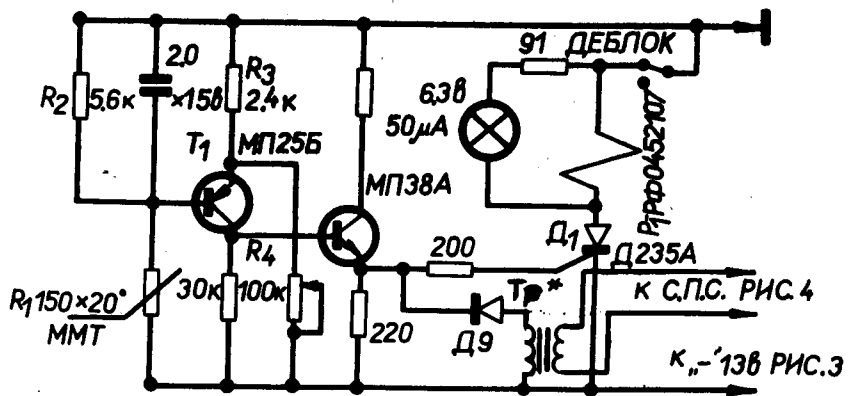


Рис. 6. Принципиальная схема электро-тепловой защиты стабилизатора.

индуктивности  $L$  - СПС ток, кроме постоянной составляющей, содержал некоторую искаженную переменную составляющую, которая в сумме с наводками на проводах, соединяющих шунт и УПТ, составляла примерно 0,5 мв. Прибор измерял нестабильность действующего значения напряжения на шунте. По следующим причинам нестабильность напряжения на шунте мы отождествляли с током через шунт.

1. Сопротивлением шунта служит высокостабильное сопротивление из стандартного шунта ШВ-20 0, впаянное припоем на основе серебра.
2. Применена специальная конструкция шунта (рис. 9), в котором двойная изоляция вода-масло ослабляли воздействие внешней температуры на шунт.

3. Режим охлаждения шунта поддерживался примерно одним и тем же в течение всего времени измерения.

4. Температура шунта выше комнатной за счёт выделения на нем мощности  $\approx 100$  вт, поэтому также влияние внешней (комнатной) температуры) на сопротивление шунта меньше.

Прогрев термостата длится 35 минут. За это время максимальная нестабильность тока  $7 \cdot 10^{-4}$  и практически сразу после включения источника можно начинать ввод тока в СПС. "Высокочастотная составляющая" диаграммы (рис. 7) - наводки ( $\approx 2$  мкв) на делителе  $R_1, R_2, R_3$  (рис. 1) от включения нагревателя термостата.

При работе термостатов подогревного типа наблюдается медленное плавание температуры термостабилизируемых объектов, если последний - сам источник тепла. Действительно, тепловое равновесие в этом случае должно наступать тогда, когда температура объекта несколько выше температуры в термостате и имеется теплоотдача в термостат. При малой мощности, выделяемой в объекте, этот эффект должен сказываться как кажущееся "сползание температуры" в термостате (точке термостабилизации). На рис. 1 такое "сползание" составляет  $7 \cdot 10^{-8}$  час<sup>-1</sup> и зна-

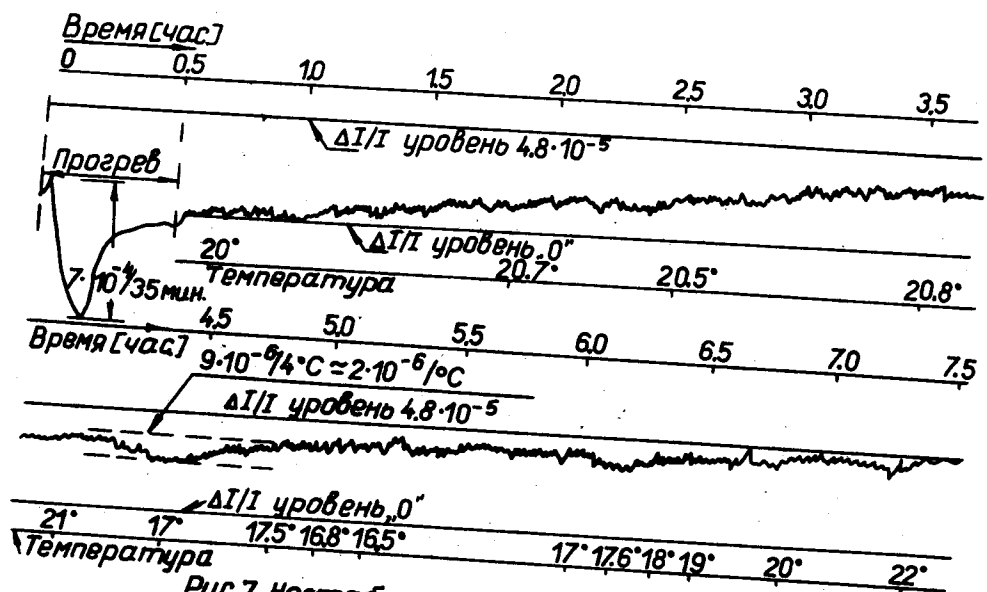


Рис. 7. Нестабильность тока при работе стабилизатора на медную перемычку  $\phi 5$  мм. Термостат включен.

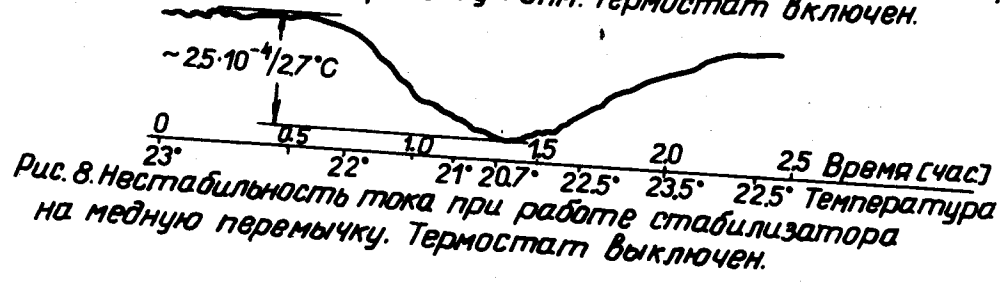


Рис. 8. Нестабильность тока при работе стабилизатора на медную перемычку. Термостат выключен.

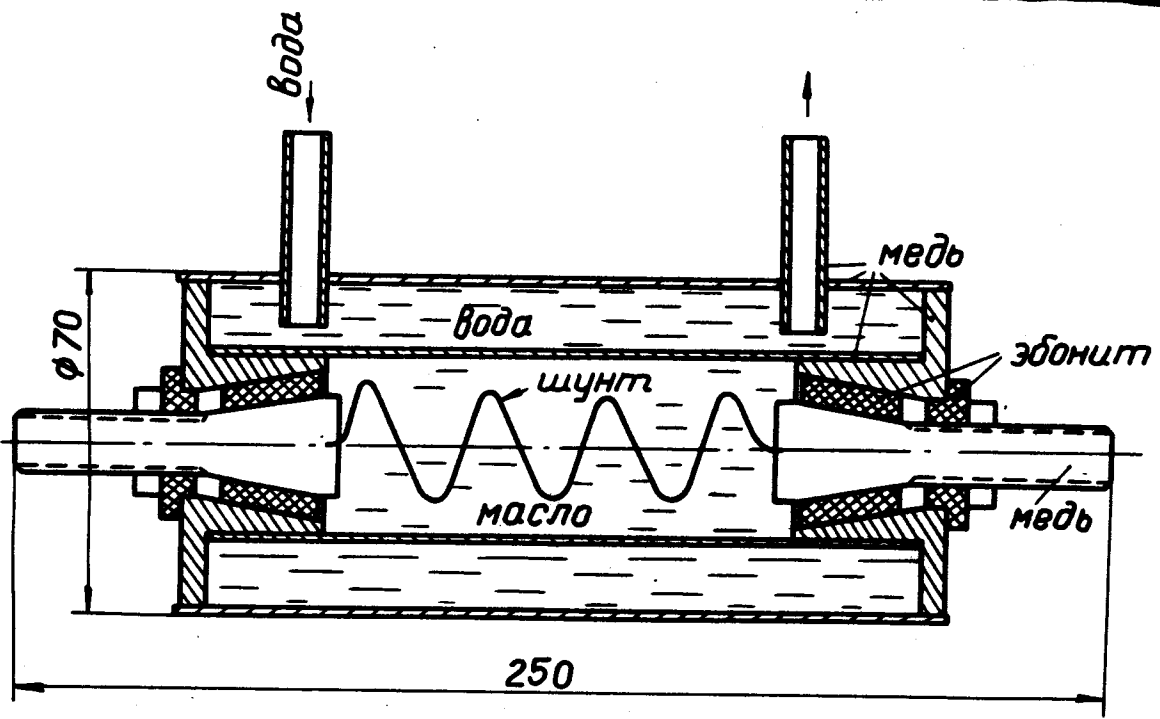


Рис. 9. Конструкция шунта стабилизатора

чительно уменьшается при понижении комнатной температуры до  $20^{\circ}\text{C}$ . Изменением конструкции термостата или применением элементов Пелтье можно устранить "сползание" и получить нестабильность тока лучшее  $7 \cdot 10^{-6}$  за 8 часов непрерывной работы при стабильном шунте. Это "сползание" в данной работе уменьшалось созданием микроклимата в районе термостата при температуре  $< 20^{\circ}\text{C}$  путем применения теплового экрана, охлаждаемого водой. Этот экран располагался между схемами рис. 1, 2, 3, 5, 6 и рис. 4, 9, поэтому указанная величина  $7 \cdot 10^{-6} \text{ час}^{-1}$  - верхний предел для данного стабилизатора, если схемы рис. 1, 2, 3, 5, 6 находятся не при комнатной температуре, а в блоке на тепловом экране. Уменьшение сползания температуры позволило выделить температурную нестабильность тока за счёт УПТ  $\approx (1,2) \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$  (см. также гл. II). На диаграмме рис. 7 при изменении температуры в комнате от  $21$  до  $16,5^{\circ}\text{C}$  ток мог изменяться лишь за счёт усилителя постоянного тока. Если отключить терморегулятор термостата, то диаграмма тока, измеренная при изменении температуры в комнате от  $23,3$  до  $20,7^{\circ}\text{C}$ , приведена на рис. 8. Нестабильность тока  $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  и полностью определялась нестабильностью сопротивлений делителя опорного напряжения, расположенных в термостате рис. 1. В таком режиме прибор можно использовать как компактный источник ввода тока в СПС и работать с СПП.

В заключение автор благодарит М.М. Семенова, В.Г. Гребенника за полезные обсуждения и Г.Л. Дорофеева, А.К. Ляпунова и И.З. Крахтинова за высокое качество выполненных работ.

#### Литература

1. М.М. Карлинер, Б.В. Левичев, А.С. Медведко, Н.В. Шустов. ПТЭ, №5, 1969, 122-124.
2. Ю.Н. Денисов, В.В. Калинин, В.А. Пережогин. Препринт ОИЯИ, 13-5194, Дубна, 1970.

3. В.Е. Ляпунов, Г.В. Осташов, О.П. Ревокатов. ПТЭ, №5, 1969, 124-126.
4. The Oxford Instrument Co. Ltd. Circuit Diagram "120A Power Supply".
5. Г. Корн, Т. Корн. "Электронные аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины", Мир, Т1.
6. Тиристоры "Технический справочник", Энергия, 1971, 255-257.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 января 1972 года.