

8066

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



8066

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛ

P13 - 8066

Н.С.Бычков, В.М.Лачинов, А.А.Попов, В.С.Хабаров

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА
ДО 3200 А
ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНОИДА

1974

ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

P13 - 8066

Н.С.Бычков, В.М.Лачинов, А.А.Попов, В.С.Хабаров

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА
ДО 3200 А
ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНОИДА

Направлено в ПТЭ

Для питания сверхпроводящего соленоида СПС-600 ускорительной секции кольцетрона в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ разработан стабилизированный источник тока до 3200 А /СИТ-3200/. К СИТ-3200 предъявляются следующие требования: обеспечить высокую стабильность тока в нагрузке /лучше 10^{-3} для токов более 1000 А/, малые токовые пульсации, плавность ввода тока в нагрузку и вывода из нее, простоту управления, надежность и безопасность при эксплуатации. Соленоид СПС-600 /диаметр - 600 мм, длина - 2 м/ создает в ускорительной секции фокусирующее магнитное поле до 2 Т, а в качестве нагрузки представляет собой индуктивность $L \sim 0,35$ Гн с последовательно включенной омической составляющей промежуточных кабелей $R_{\text{н}} \sim 2 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Блок-схема СИТ-3200

Система стабилизации тока СИТ-3200 осуществлена по известной схеме авторегулирования с отрицательной обратной связью по току^{1/}. Блок-схема устройства приведена на рис. 1. В качестве источника питания схемы использован 6-фазный выпрямительный агрегат ВАКГ-12/6-3200, который обеспечивает на выходе постоянное напряжение 12-6 В при токе $0 \div 3200$ А с пульсацией $\sim 6\%$ (300 Гц).

Датчиком тока служит измерительный манганиновый шунт типа ШСМ 500 А 75 мВ. Шунт выбран с меньшим номинальным током, чтобы получить на нем повышенное напряжение до $\sim 0,5$ В при рабочих токах. Перегрев шунта снижается до $\Delta t \sim 20^\circ\text{C}$ специальной системой

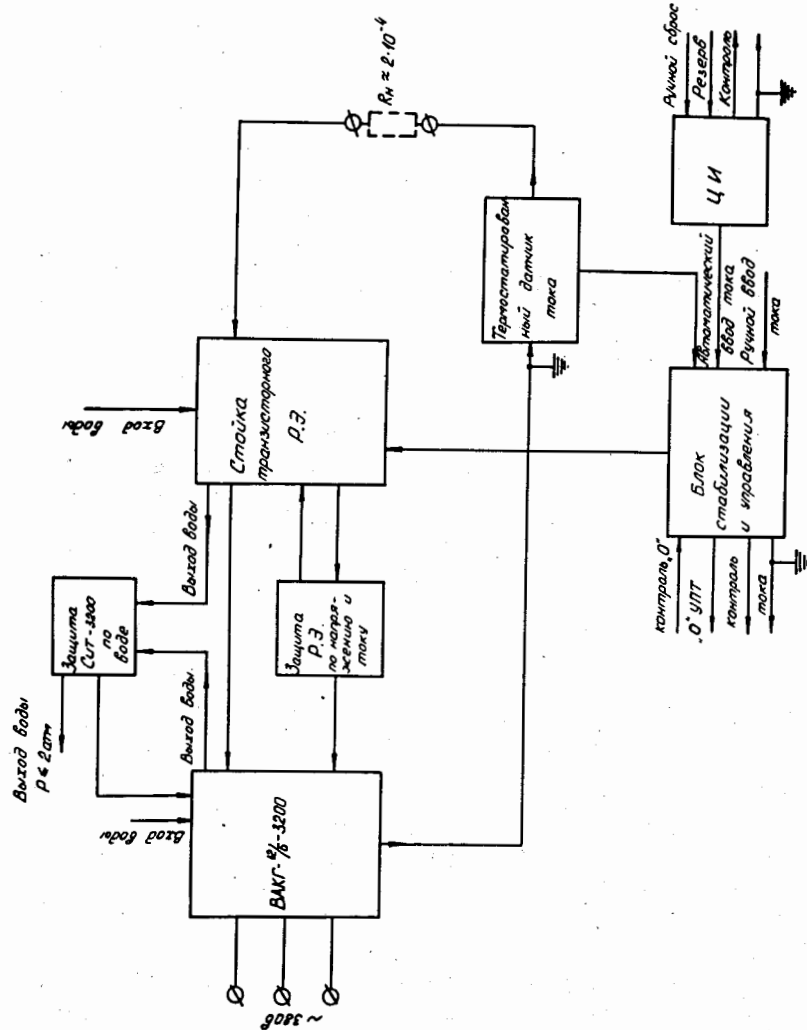


Рис. 1. Блок-схема СИТ-3200.

термостабилизации /контур охлаждения - дистиллированная вода - водопроводная вода/. Шунт прокалиброван и позволяет измерять ток с точностью $\sim 0,01\%$.

Блок стабилизации и управления усиливает сигнал с датчика тока, сравнивает его с опорным, вырабатывает сигнал ошибки, который после соответствующего усиления подается на регулирующий элемент и корректирует выходной ток. Блок содержит высокостабильный, $\sim 10^{-4}$, источник опорного регулируемого напряжения, с помощью которого вручную /гелипотом с трехзначным счетчиком/ можно устанавливать необходимый ток с допустимой для СПС-600 скоростью ввода. Кроме того, возможен режим автоматического ввода тока в нагрузку до заранее устанавливаемой величины с различной скоростью. Эту функцию выполняет блок цифрового интегратора, выход которого используется как источник опорного напряжения для стабилизатора.

В стабилизаторе используется транзисторный регулирующий элемент последовательного типа. Он состоит из 600 транзисторов типа П210 и позволяет осуществить быстродействующее и эффективное управление током в нагрузке.

В СИТ-3200 предусмотрены различные системы защиты /по воде, по напряжению, по току, по внешним сигналам/ для обеспечения надежного и безопасного функционирования всего устройства.

Транзисторный регулирующий элемент /РЭ/

Большой ток в нагрузке /до 3200 А/ при малом падении напряжения на ней /до $\sim 0,6$ В/ обусловил выбор схемы последовательного регулятора тока на параллельно включенных транзисторах с 3-ступенчатой структурой. Весь РЭ разделен на 12 одинаковых по схеме /рис. 2/ и конструкции /рис. 3/ модулей. Каждый модуль пропускает ток до 300 А при рассеиваемой мощности P_{\max} до 2,5 кВт. Схема модуля представляет составной 3-ступенчатый транзистор /рис. 2/. Выходным током непосредственно управляют 50 транзисторов П210 первой

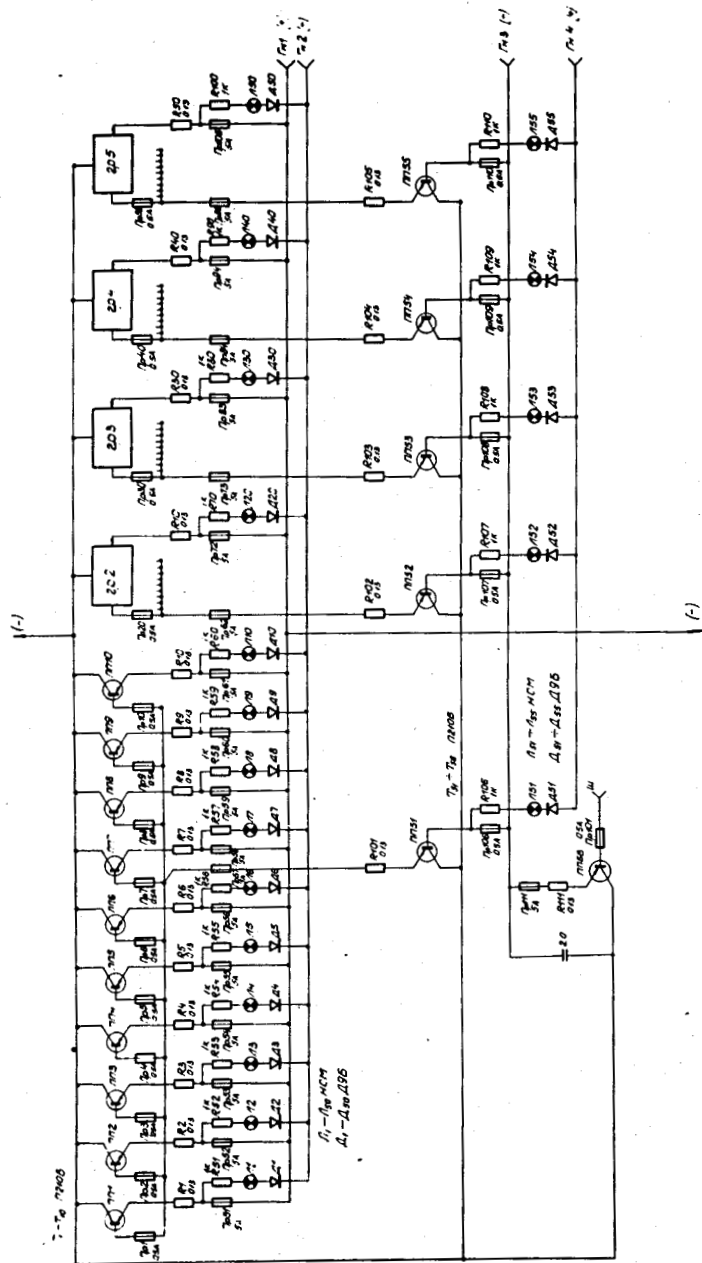


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема транзисторного модуля.

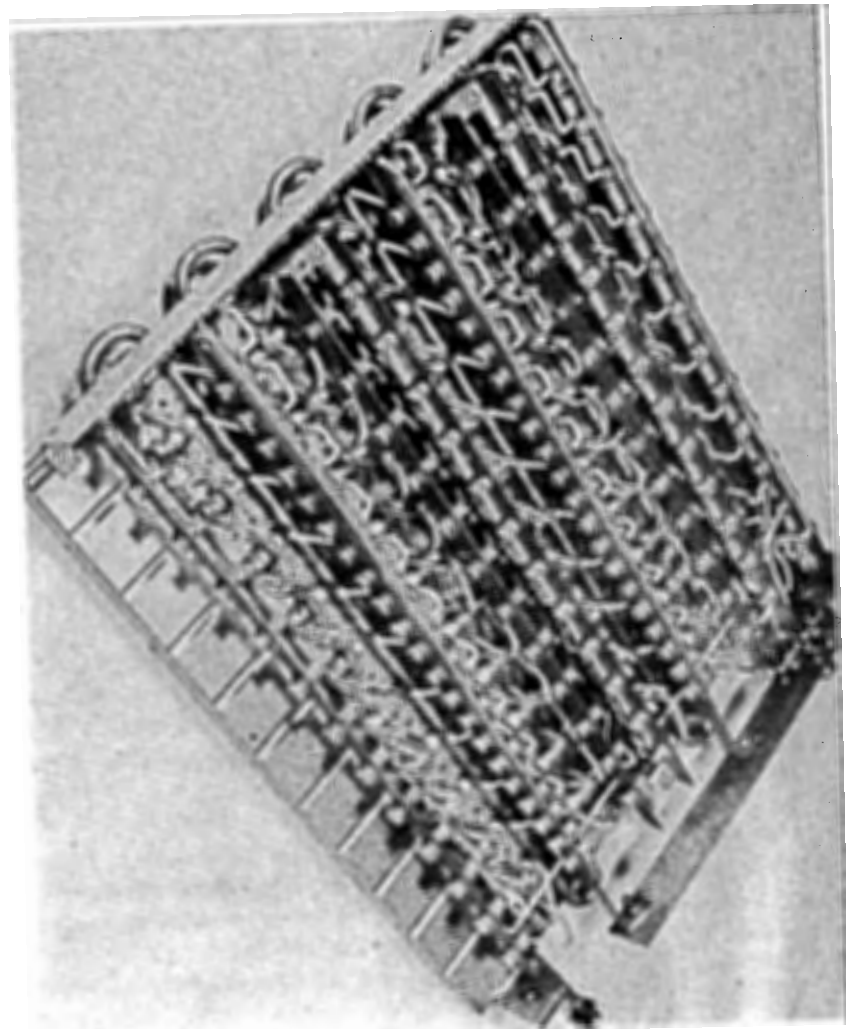


Рис. 3. Конструкция модуля.

ступени, разделенных на 5 групп по 10 штук. Каждая из этих групп управляется одним транзистором П210 второй ступени, входы групп регулируются одним входным транзистором П210 третьей ступени. Поскольку тран-

зисторы П210 А, Б имеют разброс по крутизне ($S = \Delta I_K / \Delta U_{эб}$ при постоянном U_K) в пределах $6 A/B \div 9,5 A/B$ /для 95% транзисторов из 1500 шт./, то необходимо принимать меры для выравнивания распределения токов по отдельным транзисторам. Поэтому указанные транзисторы, во-первых, подбирались грубо по крутизне, а во-вторых, в цепь эмиттера транзисторов включались выравнивающие сопротивления $R_э = 0,13 \text{ Ом}$. В последнем случае крутизна транзисторов уменьшается и выравнивается согласно ^{2/}

$$S_{\text{о.с.}} = S / (1 + R_э \cdot S).$$

Защита отдельных транзисторов осуществляется быстродействующими предохранителями на 5 А в цепи эмиттера и на 0,5 А в цепи базы /рис. 2/. Выход из строя нескольких транзисторов в модуле не сказывается на общей работе стабилизатора, т.к. транзисторы имеют запас по току в рабочем режиме. Состояние предохранителей в эмиттерных цепях транзисторов первой ступени и в базовых цепях второй ступени визуальным контролем осуществляется по табло на передней панели модулей. Лампочка типа НСМ-6,3/20, соответствующая отдельному транзистору, выключается при выходе из строя предохранителя и тем самым сигнализирует о состоянии транзистора. Конструкция и монтажная схема модуля РЭ показаны на рис. 3 и 4. Транзисторы и выравнивающие сопротивления РЭ закреплены с хорошим тепловым контактом на медной плате толщиной 10 мм. Модуль охлаждается водой, которая пропускается через змеевик, припаянный к плате. Остальные элементы модуля крепятся на промежуточных токовых шинах и на специальных платах. Модули устанавливаются в стойке /рис. 5/, где объединяются в параллель токовыми шинами и подсоединяются соответствующими кабелями к отдельным частям стабилизатора.

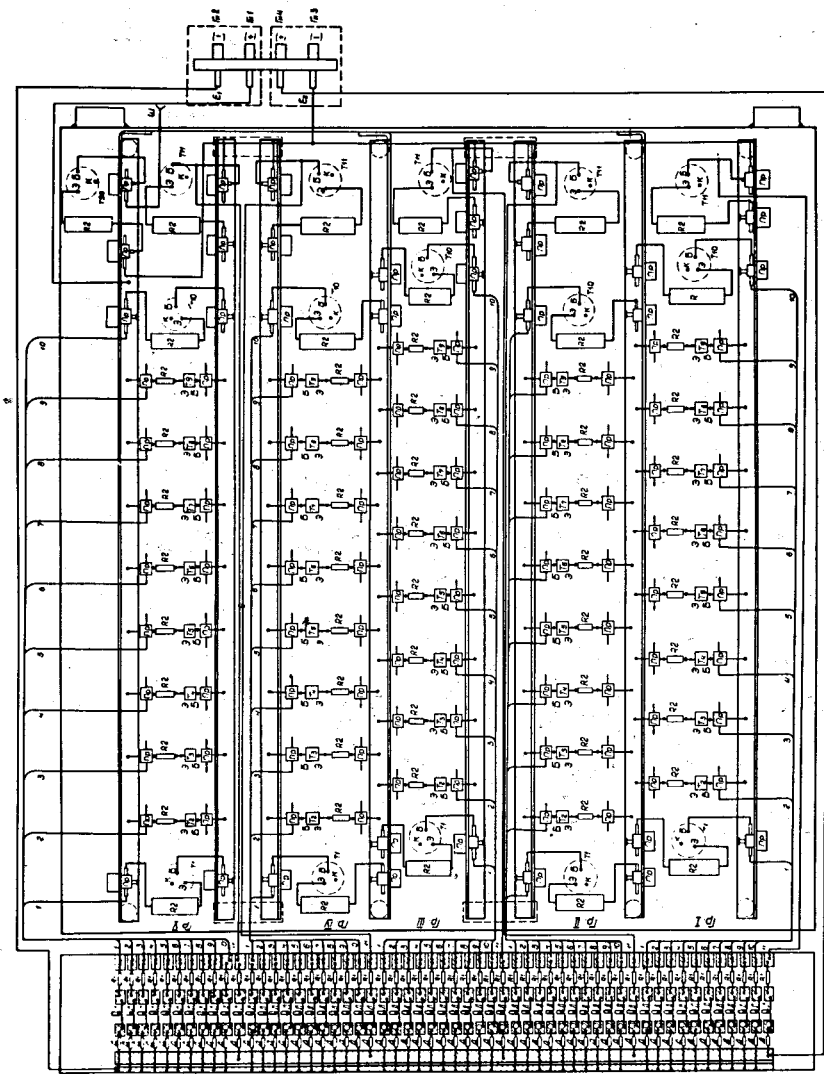


Рис. 4. Монтажная схема модуля.

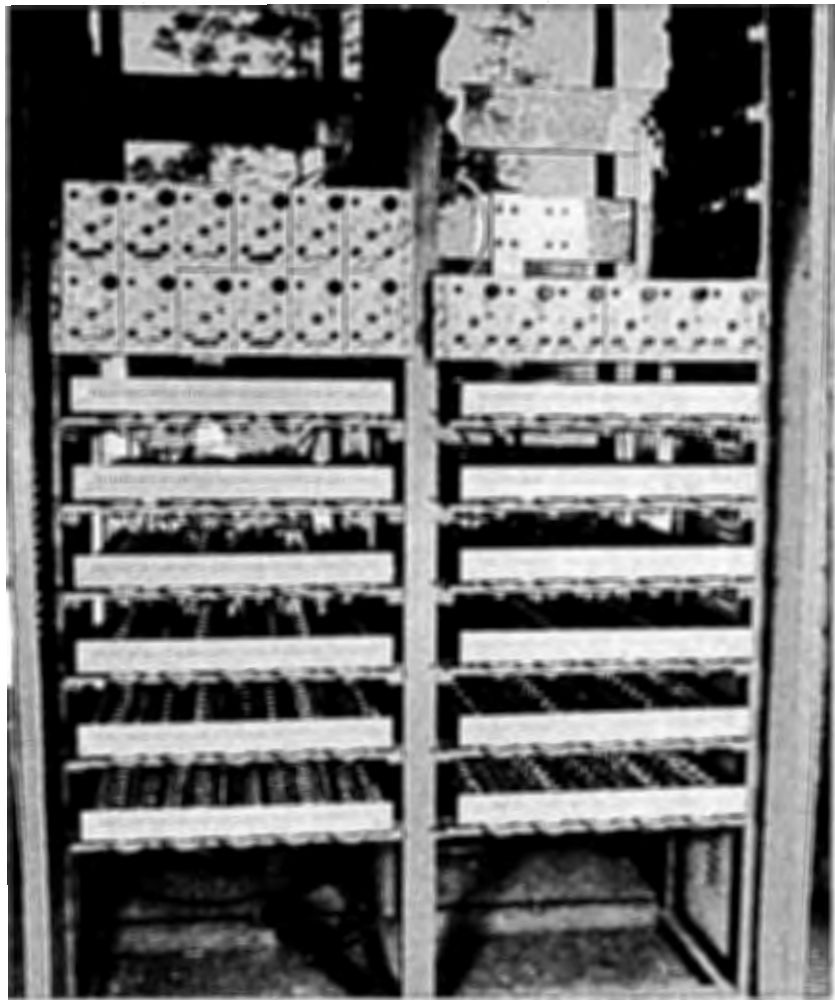


Рис. 5. Стойка транзисторного регулирующего элемента.

Блок стабилизации и управления

Схема блока показана на рис. 6. В схеме использованы интегральные операционные усилители /ОУ/ с дифференциальным входом типа 1УТ401. В области ком-

натных температур они имеют приведенный ко входу дрейф, достигающий $\sim 10 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$. Этот, а также другие параметры ОУ позволяют достаточно просто получить в системах стабилизации, где используются подобные ОУ, точности лучше чем 10^{-3} .

В качестве источника управляемого опорного напряжения используется устройство, включающее ОУ /М5/, опорный термокомпенсированный стабилитрон ДЗ /Д818Е/, гелипот с 3-значным отсчетным устройством R43 и выходной повторитель на Т7 /КТ 347Б/. Выходное опорное напряжение регулируется гелипотом в пределах от 0 до +3,6 В и имеет нестабильность при напряжениях более 1 В $\sim 10^{-4}$.

Сигнал с датчика тока поступает на вход ОУ /М1/. В этом узле влияние дрейфа ОУ на точность стабилизатора максимально, а поэтому сигнал с датчика тока повышен до $\sim 0,5 \text{ В}$ при 3200 А. Этот сигнал усиливается до $\sim 3 \text{ В}$ и на таком уровне сравнивается с опорным напряжением, которое подается либо от источника с ручным управлением, либо от цифрового интегратора с автоматическим управлением. Сравнение указанных сигналов и получение сигнала-ошибки происходит с помощью ОУ /М2/, на дифференциальные входы которого подаются сигналы. Сопротивление R10 позволяет сбалансировать каскад, чтобы в диапазоне до $\sim 3 \text{ В}$ он не был чувствителен к синфазному сигналу.

Последующий усилитель сигнала-ошибки на М3, М4 и согласующие каскады на Т3-Т6 обеспечивают нужный коэффициент стабилизации устройства / ~ 5000 /, а на суммарный дрейф практически не влияют.

Для улучшения стабильности питания ОУ /М1, М2, М3, М5/ введена параметрическая стабилизация на Д1, Д4 /КС168/. Коррекция нуля усилителей осуществляется потенциометром R27.

Блок выполнен в стандарте "Вишня" с двойной шириной передней панели, на которой расположены /рис. 7/ элементы управления, контроля и коммутации СИТ-3200.

Стрелочный прибор используется для контроля питающих напряжений, проверки и подстройки режима усилителей и индикации величины стабилизированного тока.

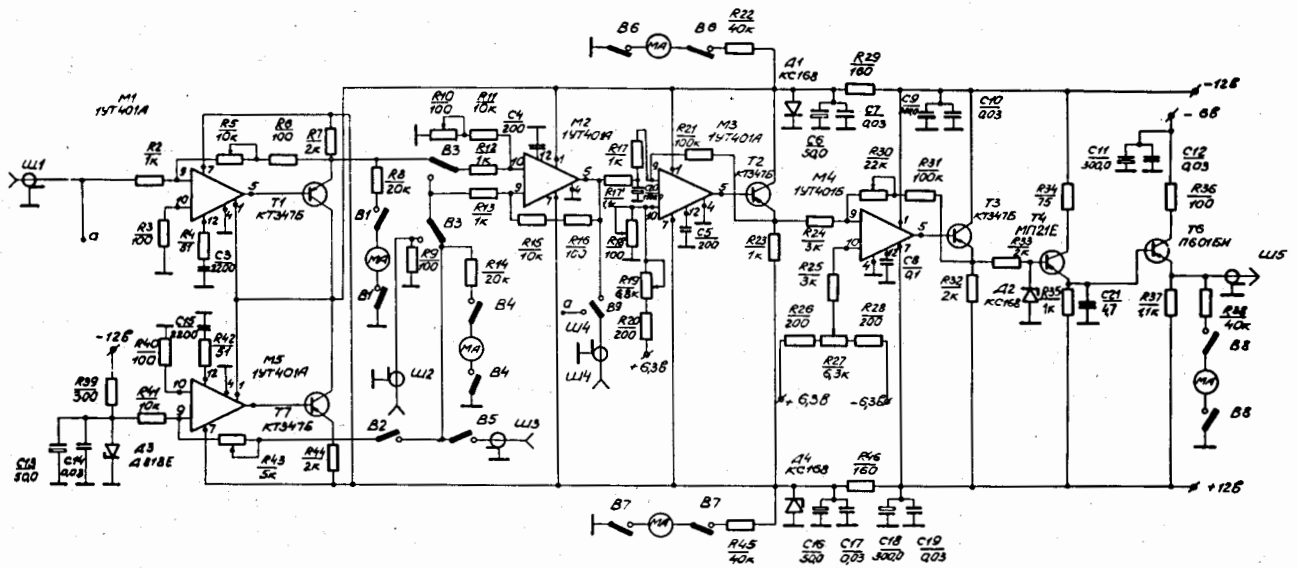


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема блока управления и стабилизации.



Рис. 7. Конструкция цифрового интегратора и блока управления и стабилизации.

Выбор измерения соответствующего параметра осуществляется кнопчным переключателем.

Блок автоматического цифрового интегратора /ЦИ/

Блок предназначен для автоматического линейного управления опорным напряжением СИТ-3200, а следовательно, и током в нагрузке. При этом управление может осуществляться с различными скоростями.

Устройство обеспечивает работу стабилизатора в диапазоне рабочих токов /10-3200 А/ с необходимой точностью и стабильностью. Принципиальная схема ЦИ представлена на рис. 8. Основой ЦИ является 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь /ЦАП/. Он представляет собой линейный преобразователь, в котором стабильное напряжение делится с помощью цифро-управляемых сопротивлений. Источник стабильного напряжения, выполненный по схеме компенсационного стабилизатора /1/ со 100%-ной отрицательной обратной связью, включает ОУ /М1/ и Т2, Т3, а также параметрический опорный стабилизатор на ДЗ /Д818Е/, питаемый от генератора тока на Т1. Стабильность выходного напряжения источника лучше 0,001%/°С в диапазоне комнатных температур и лучше 0,001% при изменении питающего напряжения на ±1%. Указанное выходное напряжение подается через точные ключи на дискретный делитель напряжения /3/. Он создан на матрице, имеющей структуру R-2R /5-10кОм/, в которой использованы проволочные сопротивления. Точные ключи выполнены на транзисторах типа МП29 и МП37 /Т6, Т7/.

Транзистор Т5 согласует ключи с логической частью схемы, а также задает режим работы ключа. Таким образом, "взвешенное" в двоичном коде выходное напряжение делителя подается на ОУ /М2/, который формирует необходимый диапазон выходного напряжения ЦИ - 0÷5 В. Управление точными ключами осуществляется реверсивным счетчиком /РС/. РС и генератор счетных импульсов с частотой 0,6 ÷ 25 Гц определяют диапазон выходных скоростей нарастания /спада/ выходного на-

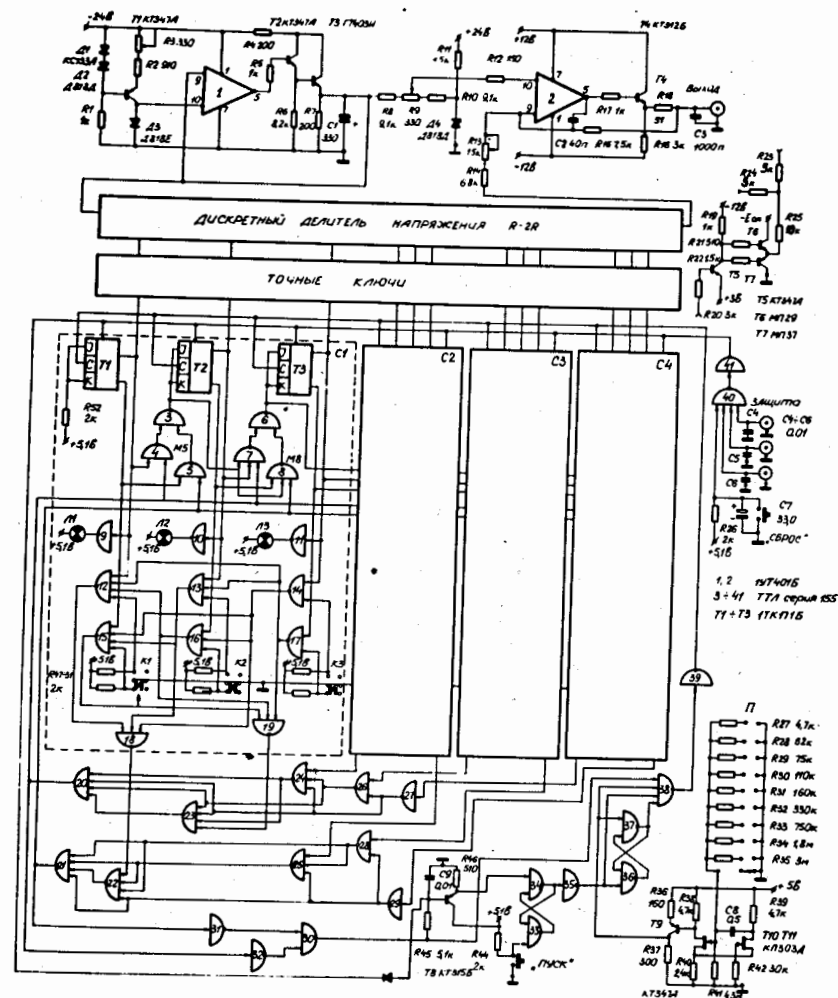


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема цифрового интегратора.

пряжения ЦИ. В качестве генератора используется схема на полевых транзисторах типа КП 303 Д /Т9, Т10/ с одной времязадающей емкостью С8. Изменение частоты производится с помощью переключения сопротивлений R27 - R35 галетным переключателем П.

В РС применены триггеры типа 1Т171Б /Т_Г 1, Т_Г 2 и т.д./. Схемы логических связей между триггерами, а также цифровая схема сравнения осуществлены на интегральных модулях серии 155. На цифровую схему сравнения /М12 ÷ М29/ с клавишного переключателя К1-К2 поступает двоичный код N1, который необходимо записать в РС. Это число сравнивается с содержащимся в РС числом N2. При N1 ≠ N2 на одном из выходов схемы сравнения /М20, М21/ появляется сигнал, определяющий направление счета РС, снимается запрет на пусковой триггер на М33, М34. Этот же сигнал поступает также на схему пропускания /М36-М39/ счетных импульсов в РС. Счет импульсов начинается после нажатия на кнопку "Пуск", сигнал с которой опрокидывает пусковой триггер. При N1 = N2 сигнал со схемы сравнения запрещает счет РС и опрокидывает в исходное состояние пусковой триггер.

Счетчик, при необходимости, устанавливается в нулевое состояние по команде с кнопки "Сброс" или по одному из входов "Защита". Для визуального контроля за работой ЦИ /счетчика/ на передней панели /рис. 7/ имеется 12 лампочек типа НСМ-6, 3/20, индицирующих состояние РС.

Объединение ЦАП с РС, охваченного общей обратной связью, позволило реализовать надежное и простое в работе устройство. Оно имеет следующие характеристики.

- | | |
|------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. Диапазон выходных напряжений | 0 ÷ +5 В |
| 2. Интегральная нелинейность | 0,03% |
| 3. Температурная нестабильность выходного напряжения | 0,002%/°С |
| 4. Дискретность управления током | 2,7985 А/канал |
| 5. Скорость нарастания выходного напряжения | 0,78 _n МВ/сек |

/где n=1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20/.

Блок ЦИ выполнен в стандарте "Вишня" с двойной шириной передней панели /рис. 7/.

Защита СИТ-3200

Стабилизатор тока оснащен специальными устройствами защиты для предотвращения выхода из строя элементов СИТ-3200 при различных аварийных ситуациях. Поскольку ряд элементов стабилизатора имеет водяное охлаждение /рис. 1/, то в сливной магистрали системы установлены струйные реле, которые при снижении протока воды отключают электрическое питание СИТ-3200.

На рис. 9 приведена схема защиты транзисторного РЭ как от токовых перегрузок в его отдельных цепях, так и от перенапряжений со стороны выпрямителя и СПС-600.

При токовых перегрузках отдельных транзисторов РЭ перегорают плавкие вставки предохранителей /Пр 1 ÷ Пр 50, Пр 106 ÷ Пр 110/, рис. 2, а соответствующие сигнальные лампы индикации отказов /Л 1 ÷ Л55/, рис. 2, гаснут, указывая срабатывание защиты.

При напряжениях на силовых шинах стабилизатора выше пороговых срабатывают устройства защиты на Д1-Д3, Т1-Т3, рис. 9, закорачивая РЭ, а по сигналу К3 отключается выпрямитель. Цепочка Д4- R10, рис. 9, защищает транзисторный РЭ со стороны нагрузки /СПС-600/. Кроме того, возможен быстрый сброс тока стабилизатора при подаче на вход "Защита" ЦИ сигнала перехода СПС-600 в резистивное состояние.

Проверка работы СИТ-3200, заключение

Благодаря использованию в стабилизаторе быстродействующих элементов с постоянной времени менее 10^{-3} сек, устойчивость этой системы авторегулирования с коэффициентом стабилизации более 5000 достигается без особых сложностей, особенно когда в качестве нагрузки используется СПС-600 с постоянной времени этой цепи порядка нескольких секунд. При настройке схемы СИТ-3200 в качестве нагрузки применялись короткозамкнутые соединительные кабели с R_n ~ $2 \cdot 10^{-4}$ Ом.

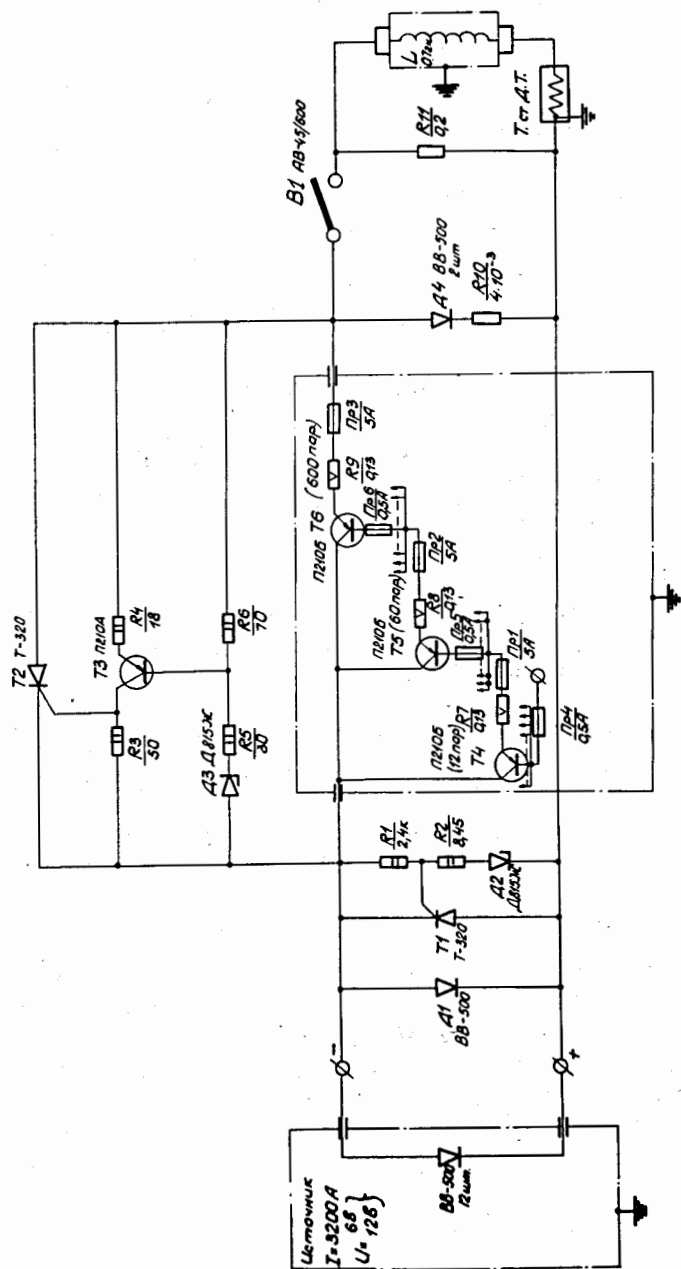


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема защиты СИТ-3200.

В этом случае для обеспечения стабильности системы и оптимальной переходной характеристики в блоке управления после дифференциального каскада устанавливался RC-фильтр /R17, C20, рис. 6/. Динамический диапазон регулирования тока от 10 А до 3200 А обеспечивается как при ручном управлении, так и при автоматическом управлении от ЦИ со скоростью ввода и вывода тока 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 16; 20 А/сек. При этом можно заранее задать конечное значение тока с точностью $\sim 10^{-3}$. Точный контроль значения тока стабилизатора производится по цифровому вольтметру по соотношению

$$I_{CT} = U_{Ц.В.} / 1,5220 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Стабилизатор эффективно подавляет пульсации источника питания /300 Гц/ благодаря включению РЭ подобно эмиттерному повторителю и достаточно широкополосному тракту усиления. Однако на выход СИТ-3200 проходят очень высокочастотные пульсации от выпрямителя $\sim 1\%$, длительность 1 мксек/через коллекторные емкости транзисторов РЭ. При включении в качестве нагрузки СПС-600 с $L \sim 0,35$ Гц указанные пульсации выходного напряжения СИТ-3200 практически не влияют на ток в соленоиде.

Длительная проверка стабильности тока СИТ-3200 при омической нагрузке показала, что стабилизатор обеспечивает постоянство тока лучше 10^{-3} в течение более 8 часов в диапазоне токов от 1000 до 3200 А. Кроме того, была осуществлена запитка СПС-600 в различных режимах. Так, при токе питания 2500 А, что соответствовало магнитному полю в соленоиде $\sim 1,8$ Т, в течение более часа проверялась стабильность тока /поля/, которая была лучше $2 \cdot 10^{-4}$. При проверке СИТ-3200 выяснилось, что он нормально функционирует, выполняет предъявляемые к нему требования, удобен и надежен в эксплуатации. Анализ схемы стабилизатора и опыт его настройки показывает, что введение достаточно простых схем термостабилизации ряда узлов и небольшие коррекции схемы устройства позволят по

крайней мере на порядок повысить точность его работы. Кроме того, для получения источника с еще большим током возможно включение в параллель дополнительных модулей без изменений в схеме.

В заключение авторы благодарят И.А.Голутвина, Л.Н.Беляева, Д.А.Смолина за полезные обсуждения и Н.Н.Корнилова, В.Д.Коровякова, Н.Н.Щербакова за высокое качество выполненных монтажных работ.

Литература

1. С.Д.Додик. Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока. "Советское радио", М., 1962.
2. Ю.И.Конев. Транзисторные схемы автоматического управления. Проектирование и расчет. "Советское радио", М., 1967.
3. Б.Б.Смолов. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи. "Энергия", М., 1967.

*Рукопись поступила в издательский отдел
28 августа 1974 года.*