

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

13-87-781

Э.К.Батманова, Г.Г.Казакова, В.В.Калиниченко

**СТАБИЛИЗАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА  
ДЛЯ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ОБМОТОК  
КОРРЕКЦИИ ЦИКЛОТРОНОВ**

**1987**

Для питания обмоток коррекции циклотронов <sup>/1-4/</sup> требуются стабилизаторы на номинальные токи  $400 \div 2000$  А /в отдельных случаях до 4000 А/ при выходных напряжениях  $10 \div 40$  В. Стабилизаторы должны обеспечивать регулирование токов в диапазоне  $0 \div I_{\text{ном}}$ , допустимая величина нестабильности тока -  $1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$ , в ряде случаев требуется реверсирование тока.

Блок-схема стабилизатора, удовлетворяющего основным из этих требований, приведена на рис. 1. Рассматриваемый стабилизатор создан на основе структуры, предложенной в работе <sup>/5/</sup>.

Стабилизатор тока содержит силовой преобразователь П, измерительное устройство ИУ, источник эталонного тока ИЭТ, цифровой переключатель ЦП, коммутатор К, блок преобразования команд БПК, блок ручной уставки тока БРУ и усилитель постоянного тока УПТ.

В состав измерительного устройства ИУ входят генератор возбуждения ГВ, демодулятор Д, резистор R и магнитомодуляционный узел, содержащий кольцевой магнитопровод М с обмоткой возбуждения  $W_B$  и кольцевой магнитопровод Э, а также измерительную  $W_{\text{и}}$  и компенсационную обмотки, причем последняя выполнена в виде отдельных секций  $W_{\text{к1}}, W_{\text{к2}} \dots W_{\text{кп}}$  с разным числом витков. Измерительная и компенсационная обмотки являются общими для магнитопроводов М и Э. Обычно измерительная обмотка  $W_{\text{и}}$  выполняется в виде одного проходного витка соответствующего сечения. Конструктивная схема магнитомодуляционного узла представлена на рис. 2.

Нагрузка ОК /обмотка коррекции циклотрона/ подключена к выходу силового преобразователя П через измерительную обмотку  $W_{\text{и}}$ . Секции  $W_{\text{к1}}, W_{\text{к2}} \dots W_{\text{кп}}$  компенсационной обмотки подключены к выходам цифрового переключателя ЦП, вход которого подключен к источнику эталонного тока ИЭТ. Управляющие входы ЦП через коммутатор К связаны с БРУ и БПК. Коммутатор К служит для выбора режимов управления: ручного или от ЭВМ.

Силовой преобразователь П содержит средства для преобразования переменного тока в постоянный, средства для фильтрации пульсаций и средства регулирования тока /напряжения/. Здесь могут быть использованы электромашинные преобразователи, статистические управляемые и неуправляемые преобразователи в сочетании с транзисторными регуляторами, с активными и пассивными фильтрами и др. Выбор конкретных решений по реализации

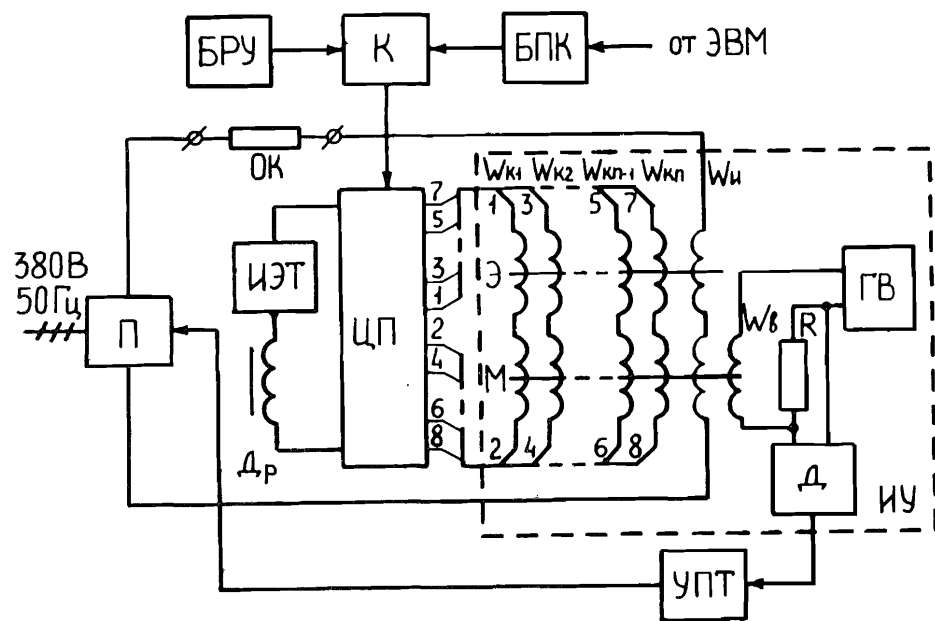


Рис. 1. Блок-схема стабилизатора постоянного тока. П - силовой управляемый преобразователь, ИУ - измерительное устройство, ИЭТ - источник эталонного тока, ЦП - цифровой переключатель, К - коммутатор, БПК - блок преобразования команд, БРУ - блок ручной установки тока, УПТ - усилитель постоянного тока, ГВ - генератор возбуждения, Д - демодулятор.

узлов П, УПТ, ИЭТ, БРУ, К и БПК производится с учетом всех требований к системе питания и условий работы. В работах<sup>6-10/</sup> обсуждаются варианты выполнения перечисленных узлов.

При подаче на обмотку возбуждения  $W_B$  переменного напряжения от ГВ в цепи этой обмотки формируются импульсы тока положительной и отрицательной полярности, обладающие следующими свойствами:

- при отсутствии подмагничивания магнитопровода М /т.е. при  $\Delta IW = 0$ / положительные и отрицательные импульсы тока равны по амплитуде и одинаковы по форме вследствие симметрии кривой намагничивания;
- при подмагничивании магнитопровода М /т.е. при  $\Delta IW \neq 0$ / симметрия нарушается, соответственно изменяются параметры импульсов, причем в разной степени для положительных и отрицательных. Этими же свойствами обладают, естественно, и импуль-

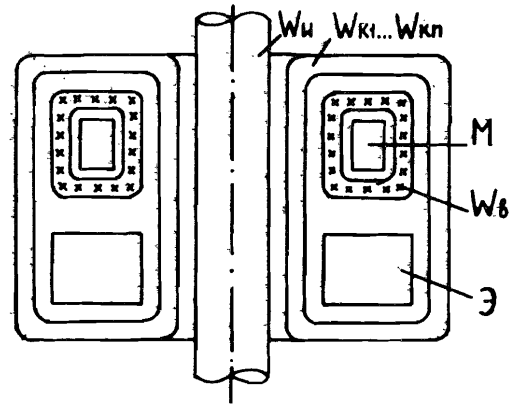


Рис. 2. Конструктивная схема магнитомодуляционного узла.

сы напряжения на резисторе R. Импульсы напряжения с резистора R поступают на вход демодулятора Д. Демодулятор Д осуществляет преобразование этих импульсных сигналов, при котором величина и полярность постоянной составляющей его выходного напряжения соответствуют величине и знаку разбаланса н.с.  $\Delta IW$ .

Код, соответствующий требуемому значению тока  $I_n$  в нагрузке, вводится в ЭВМ или в БРУ. Цифровой переключатель ЦП в соответствии с поступившими при этом управляющими сигналами подключает к ИЭТ соответствующие секции компенсационной обмотки. Суммарное число витков включенных секций составляет  $W_k$ . Ток  $I_0$ , вырабатываемый ИЭТ, протекая по включенным секциям компенсационной обмотки, создает в элементах магнитомодуляционного узла намагничивающую силу /н.с./, равную  $I_0 W_k$ , а ток нагрузки  $I_n$ , протекая по измерительной обмотке с числом витков  $W_n$  - н.с.  $I_n W_n$ . При этом указанные н.с. направлены навстречу друг другу.

При отклонении тока  $I_n$  от требуемого значения на магнитопроводы М и Э будет действовать н.с.  $\Delta IW = I_0 W_k - I_n W_n$ , что вызывает появление на выходе демодулятора напряжения соответствующей величины и полярности. Выходное напряжение демодулятора после усиления УПТ поступает на управляющий вход силового преобразователя П. Под действием этого сигнала ток  $I_n$  в нагрузке стабилизатора изменяется до тех пор, пока разбаланс н.с. не уменьшится до величины действующего в контуре авторегулирования рассогласования. В стационарном режиме состояние стабилизатора описывается соотношением

$$I_0 W_k - I_n W_n = \Delta IW_d,$$

где  $\Delta IW_d$  - величина действующего рассогласования н.с., откуда получаем

$$I_n = I_0 W_k / W_n - \Delta IW_d / W_n.$$

При большом усилении в контуре авторегулирования статической погрешностью стабилизатора  $\Delta I W_D / W_H$  можно пренебречь ввиду ее малости, тогда

$$I_H \approx I_0 W_K / W_H.$$

На рис. 3 приведена принципиальная схема генератора возбуждения ГВ. ГВ содержит автономный инвертор, выполненный по мостовой схеме на тиристорах VD1÷VD4, накопительный  $C_H$  и формирующий  $C_\Phi$  конденсаторы. Формирование импульсов управления тиристорами осуществляется с помощью пикового трансформатора

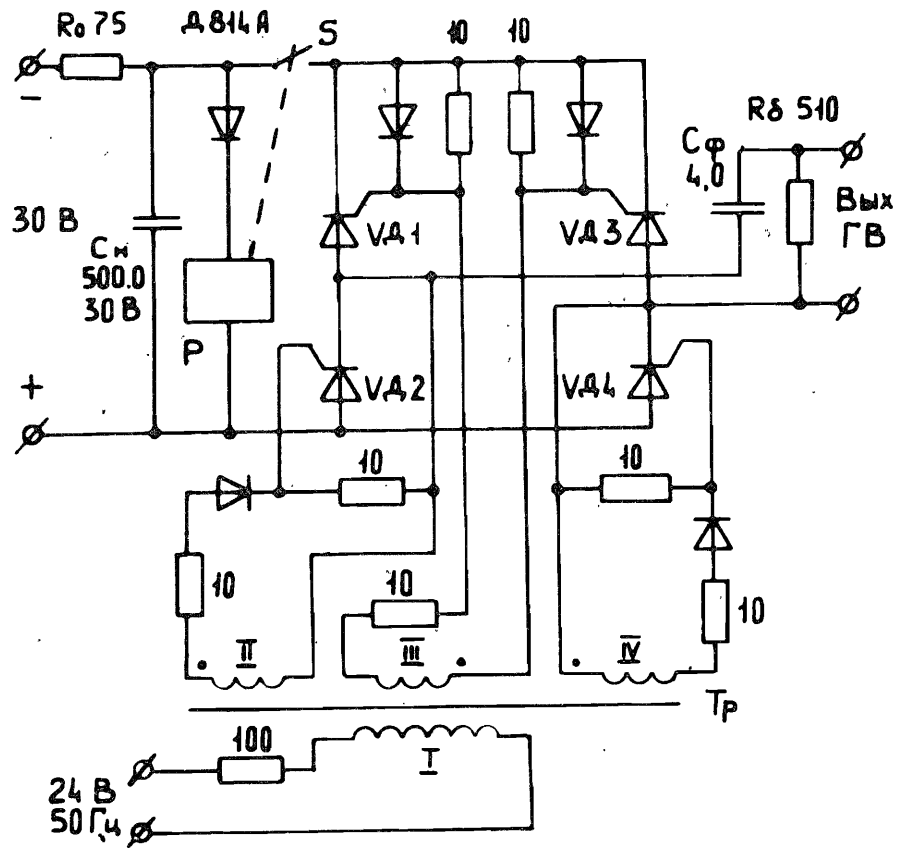


Рис. 3. Принципиальная схема генератора возбуждения (VD1 ÷ VD4 - КУ 235Г, Р - РЭС22, РФ4500131).

Tr, первичная обмотка которого подключена через ограничительный резистор 100 Ом к переменному напряжению 24 В, 50 Гц. В цепях управления тиристоров последовательно или параллельно включены полупроводниковые вентили /типа Д7Ж/, предотвращающие подачу напряжения отрицательной полярности на управляющие электроды тиристоров, кроме того, имеются также ограничительные резисторы и резисторы утечки /порядка 10 Ом/.

Процессы формирования импульсов тока в цепи обмотки возбуждения  $W_B$  происходят при участии конденсатора  $C_\Phi$ : при отпирании пары тиристоров VD1 и VD4 /или VD2 и VD3/ конденсатор  $C_\Phi$  перезаряжается от источника питания /30 В/ через отмотку  $W_B$ . Когда величина тока перезаряда станет меньше значения тока удержания, ток через рабочую в данный полупериод пары тиристоров прекращается и происходит восстановление их вентильной прочности. В следующий полупериод работы ГВ импульсами управления отпирается другая пара тиристоров и процесс повторяется. Резистор  $R_6$  облегчает процесс включения тиристоров.

Реле Р обеспечивает запуск инвертора после опрокидывания. При нормальной работе ГВ конденсатор  $C_H$  заряжен практически до полного напряжения источника питания /30 В/, через обмотку Р протекает ток, контакт S замкнут и обеспечивает подачу напряжения питания на тиристорный мост. При опрокидывании инвертора конденсатор  $C_H$  быстро разряжается, ток через обмотку Р прекращается, контакт S размыкается и снимает напряжение питания с моста. В момент размыкания S  $C_H$  начинает заряжаться через резистор  $R_0$ . Через некоторое время напряжение на  $C_H$  достигнет уровня включения Р и контакт S замкнется. При этом на тиристорный мост будет подано напряжение питания и произойдет нормальный запуск инвертора, так как к моменту подачи напряжения питания тиристоры восстановят свою вентильную прочность. Включение последовательно с обмоткой Р стабилизатора позволяет устанавливать требуемое значение порога срабатывания Р.

Принципиальная схема демодулятора приведена на рис. 4. Демодулятор содержит импульсный трансформатор Tr, обеспечивающий гальваническую развязку соответствующих цепей ИУ, два

однополупериодных пиковых детектора (VD1, C1, R4 и VD2, C2, R5) и резистивный фазорасщепитель R1÷R3.

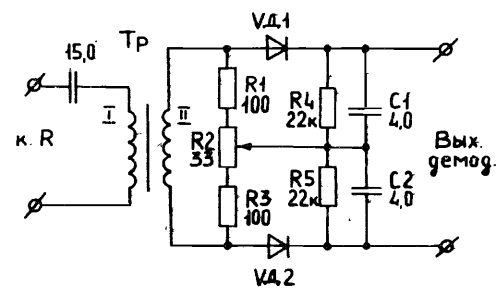


Рис. 4. Принципиальная схема демодулятора (VD1, VD2 - Д7Ж).

Положительные и отрицательные импульсы с резистора  $R$  /см. рис. 1/ поступают на вход демодулятора  $D$  и через трансформатор  $Tr$  подводятся к резистивному фазорасщепителю  $R1 \div R3$ . Сигналы с выходов фазорасщепителя поступают на входы однополупериодных пиковых детекторов, выходы которых соединены последовательно-встречно. В рассматриваемой структуре демодулятора пиковый детектор  $VD1-C1-R4$  осуществляет преобразование сигналов, имеющих на резисторе  $R$ , например, положительную полярность, а детектор  $VD2-C2-R5$  - отрицательную. Как уже отмечалось выше, при  $\Delta I W = 0$  положительные и отрицательные импульсы напряжения на резисторе  $R$  равны по амплитуде и одинаковы по форме, поэтому постоянное напряжение на выходе демодулятора  $D$  отсутствует. При  $\Delta I W \neq 0$  на выходе демодулятора  $D$  появляется постоянное напряжение, причем его величина и полярность зависят от величины и знака  $\Delta I W$ .

На рис. 5 приведена принципиальная схема цифрового переключателя ЦП. ЦП обеспечивает включение в цепь эталонного тока  $n$  секций компенсационной обмотки в разных комбинациях и содержит  $n$  каналов. К выходу первого канала подключена секция  $W_{K1}$ , к выходу  $n$ -го - секция  $W_{Kn}$ .

Состояние транзисторных ключей  $VT3-1, VT4-1, \dots, VT3-n, VT4-n$ , обеспечивающих включение и отключение секций  $W_{K1}, \dots, W_{Kn}$ , определяется состоянием входных транзисторных ключей  $VT1-1, VT2-1, \dots, VT1-n, VT2-n$ . Подача отпирающих сигналов одновременно на оба входных ключа канала не допускается. В рабочем режиме подача отпирающего сигнала на вход, например, ключа  $VT1-1$  должна одновременно сопровождаться снятием отпирающего сигнала со входа ключа  $VT2-1$  и наоборот. Непременным условием является подача отпирающих сигналов на все каналы ЦП.

При подаче отпирающих сигналов на входы  $VT2-1, \dots, VT2-n$  к первичным обмоткам трансформаторов  $Tr 2-1, \dots, Tr 2-n$  через эти ключи поступает переменное напряжение со вторичной обмотки трансформатора  $Tr /12 В, 2 кГц/$ . Соответственно на выходах выпрямителей  $B2-1, \dots, B2-n$  появляются постоянные напряжения, поступающие на входы ключей  $VT4-1, \dots, VT4-n$ . Указанные ключи отпираются и эталонный ток  $I_0$  протекает по цепи, образованной этими ключами. Запертые ключи  $VT3-1, \dots, VT3-n$  изолируют секции компенсационной обмотки от цепи тока  $I_0$ . Такое состояние ЦП соответствует уставке "0", когда ток в нагрузке стабилизатора отсутствует.

Для включения в цепь эталонного тока  $I_0$  какой-либо секции компенсационной обмотки, например  $W_{Kn}$ , необходимо снять отпирающий сигнал со входа  $VT2-n$  и подать его на вход  $VT1-n$ . При этом переменное напряжение с первичной обмотки  $Tr 2-n$  будет отключено и подано на первичную обмотку трансформатора  $Tr 1-n$ ,

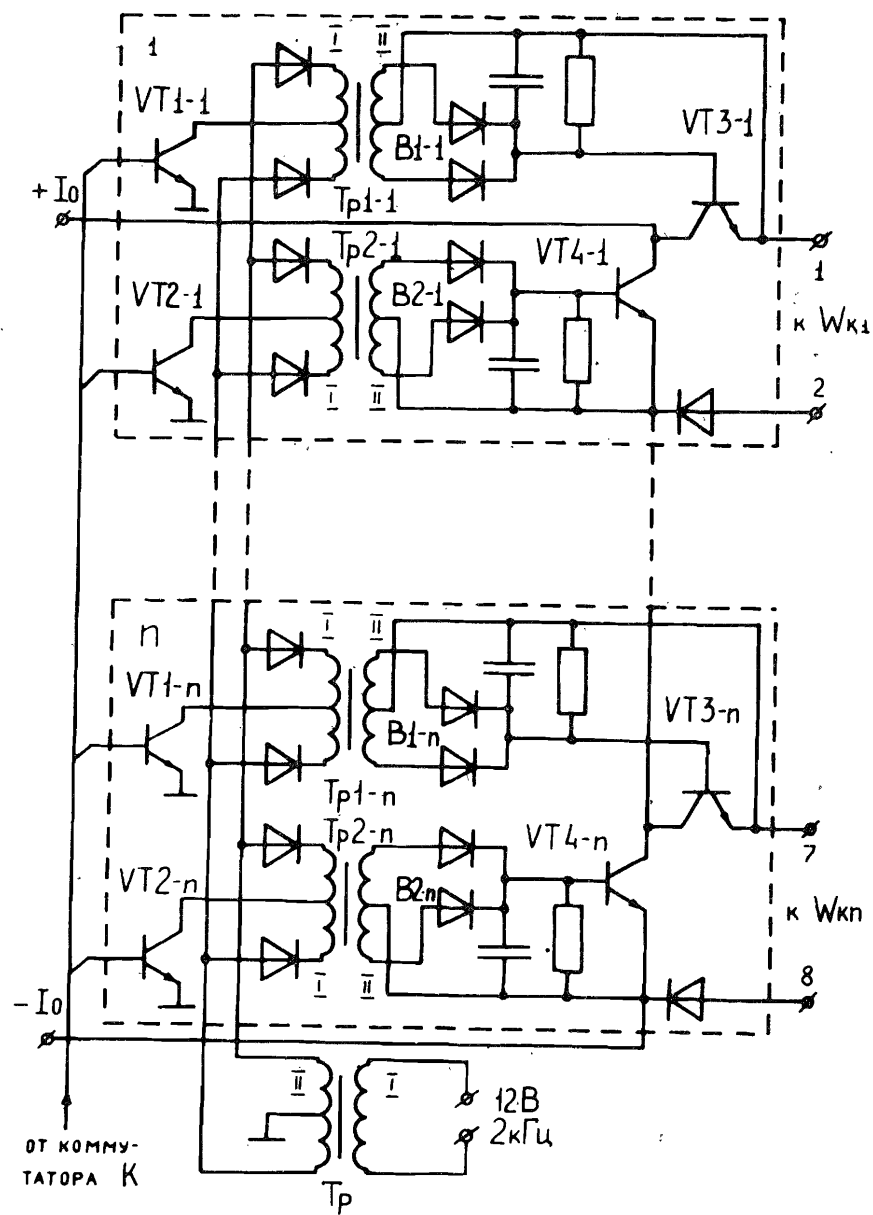


Рис. 5. Принципиальная схема цифрового переключателя ( $VT1-1, VT2-1, \dots, VT1-n, VT2-n$ -КТ315Г,  $VT3-1, VT4-1, \dots, VT3-n, VT4-n$ -КТ803А).

вследствие чего на выходе выпрямителя В1-п появится постоянное напряжение, а напряжение на выходе В2-п станет равным нулю. Соответственно ключ VT4-п запирается, а VT3-п отпирается, обеспечивая протекание тока  $I_0$  в секции  $W_{кп}$ .

При подаче отпирающих сигналов на входы ключей VT1-1,.... VT1-п в цепь эталонного тока  $I_0$  будут включены все секции компенсационной обмотки. Такое состояние ЦП соответствует уставке максимального тока в нагрузке стабилизатора

Транзисторные ключи имеют относительно невысокое сопротивление в запертом состоянии и относительно большое сопротивление в открытом, что может привести к ухудшению таких параметров стабилизатора, как точность и стабильность.

Относительная погрешность устройства, обусловленная токами утечки транзисторных ключей, при одновитковой измерительной обмотке  $W_{и}$  может быть ориентировочно определена из соотношения

$$\Delta I_H / I_H \approx (W_{кном} W_k^{-1} - 2) I_{y\text{ ср}} / I_0,$$

где  $I_{y\text{ ср}}$  - среднее значение тока утечки применяемых транзисторов,  $W_{кном}$  - полное число витков компенсационной обмотки,  $W_k$  - суммарное число витков секций компенсационной обмотки, включенных в цепь эталонного тока. Это выражение получено из более общих соотношений, приведенных в работе [1].

В стабилизаторах на максимальные токи  $400 \div 2000$  А обычно используются источники эталонного тока с  $I_0 = 1$  А. Для цифровых переключателей стабилизаторов могут быть отобраны транзисторы с токами  $I_{y\text{ ср}} \leq 1$  мкА. Составляющая погрешности стабилизаторов, обусловленная токами утечки ключей ЦП, в этом случае будет иметь порядок  $10^{-4}$  при регулировании тока нагрузки в диапазоне  $0,01 I_{H\text{ max}} \div I_{H\text{ max}}$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Конструктивные данные некоторых узлов

Рисунок 2.

Магнитопровод М: кольцо из ленточного пермаллоя 70x50x10 мм, обмотка  $W_B = 500$  витков, ПЭВ-2  $\phi$  0,35 мм, магнитопровод Э: 2 кольца из ленточного пермаллоя 70x50x10 мм, компенсационная обмотка содержит 10 секций с числом витков 1,2,4,8,16,32,64,128,256 и 512, ПЭВ-2  $\phi$  0,81 мм /диапазон  $0 \div 1000$  А/.

Рисунок 3.

Тр. Сердечник: 2 кольца М 2000, 31x18,5x7 мм.  
Обмотки: I, III - по 400 витков ПЭВ-2  $\phi$  0,28,  
II, IV - по 400 витков ПЭВ-2  $\phi$  0,21.

Рисунок 4.

Тр. Сердечник: 1 кольцо М 2000, 40x25x7,5 мм.  
Обмотки: I - 1000 витков, ПЭТВ  $\phi$  0,28,  
II - 2000 витков, ПЭТВ  $\phi$  0,28.

Рисунок 5.

Тр1-1, Тр2-1, ... Тр1-п, Тр2-п. Сердечники: М 2000, 20x12x6 мм,  
Обмотки: I - 2x300 витков ПЭВ - 2  $\phi$  0,15 мм,  
II - 2x130 витков, ПЭВ - 2  $\phi$  0,25 мм.  
Тр. Сердечник: 2 тороидальных кольца из ленточного пермаллоя  
 $D_H = 70$  мм,  $D_{вн} = 50$  мм,  $b = 10$  мм.  
Обмотки: I - 200 витков ПЭВ-2  $\phi$  0,83 мм,  
II - 2x200 витков ПЭВ-2  $\phi$  0,83 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Линева А.Ф. и др. Препринт ИФ-70-10, Киев, 1970.
2. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-5086, Дубна, 1970.
3. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-5047, Дубна, 1970.
4. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972, с.15.
5. Калинин В.В., Крживанек М. А.с. 1288665 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1987, №5, с.191.
6. Аносов В.Н. и др. ОИЯИ, Р9-5498, Дубна, 1971, с.66.
7. Денисов Ю.Н. и др. ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972, с.79.
8. Богомолова Л.К. и др. ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, с.62.
9. Денисов Ю.Н. и др. ОИЯИ, 13-7488, Дубна, 1973.
10. Калинин В.В. ОИЯИ, 13-9577, Дубна, 1976.
11. Калинин В.В. ОИЯИ, 13-8157, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 октября 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
D3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
D1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
D9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
D7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
D2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Батманова Э.К., Казакова Г.Г., Калининченко В.В. 13-87-781  
Стабилизатор постоянного тока для систем питания обмоток коррекции циклотронов

Обсуждается структурная схема широкодиапазонного компенсационного стабилизатора постоянного тока, управляемого от ЭВМ. Измерительное устройство стабилизатора основано на магнитном сравнении постоянных токов, погрешность сравнения составляет  $10^{-4}$ - $10^{-3}$ . Основой измерительного устройства является магнитомодуляционный узел, приведена его конструктивная схема, а также данные магнитопроводов и обмоток образца, работающего в диапазоне  $0 \div 1000$  А. Подробно описаны электронные узлы измерительного устройства.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод М.И.Потапова

Batmanova E.K., Kazakova G.G., Kalinichenko V.V. 13-87-781  
DC Stabilizer for Power Supply Systems of Cyclotron Correction Coils

A block diagram of the computer-controlled wide-range degenerative DC stabilizer is discussed. The stabilizer measuring device is based on magnetic comparison of direct currents, the comparison error is  $10^{-4}$ - $10^{-3}$ . The main part of the measuring device is a magnetic modulation unit; its diagram and characteristics of cores and coils of the sample operating in the range  $0 \div 1000$  A are given. Electronics of the measuring device is described in detail.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987