

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



13/12-76

3617/2-76

13 - 9802

Ц 76
А - 332

Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, А.Г.Комиссаров,
М.Крживанек, В.А.Кузнецов

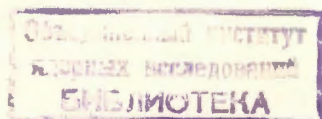
СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК
ДЛЯ ПИТАНИЯ ОСНОВНОЙ ОБМОТКИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЦИКЛОТРОНА У-120 М

1976

13 - 9802

Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, А.Г.Комиссаров,
М.Крживанек, В.А.Кузнецов

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК
ДЛЯ ПИТАНИЯ ОСНОВНОЙ ОБМОТКИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЦИКЛОТРОНА У-120 М



Стабилизированные источники тока на базе электро-машинных преобразователей для питания основной обмотки циклотрона У-120М были разработаны на начальном этапе его реконструкции ^{/1-3/}. В это же время в Лаборатории ядерных проблем были начаты разработки прототипов мощных статических преобразователей, способных заменить электромашинные агрегаты ^{/4,5/}. Эти разработки завершились в 1975 г. вводом в эксплуатацию полупроводникового стабилизированного источника, имеющего следующие параметры:

диапазон автоматического регулирования тока на-грузки / $0 \div 640$ / А,

диапазон регулирования напряжения на нагрузке / $0 \div 300$ / В,

дискретность установки тока - 1 мА,

нестабильность тока за 8 часов - не более $5 \cdot 10^{-5}$.

Блок-схема источника показана на *рис. 1*. В качестве измерительного элемента в стабилизаторе используется магнитный компаратор постоянного тока, основные узлы которого рассматривались в работе ^{/6/}. В состав магнитного компаратора входит /не показанное на блок-схеме/ пороговое устройство /ПУ/, схема которого приведена в работе ^{/7/}. ПУ обслуживает устройство ввода стабилизатора в рабочий режим и исключает "ложные" рабочие точки ^{/8/} компаратора из зоны действия контура стабилизации. В основной контур обратной связи входят также усилитель сигнала ошибки /УСО/ и система управления проводимостью тиристоров /СУ/. СУ состоит из шести одинаковых каналов, вырабатывающих широкие импульсы управления ^{/9/}.

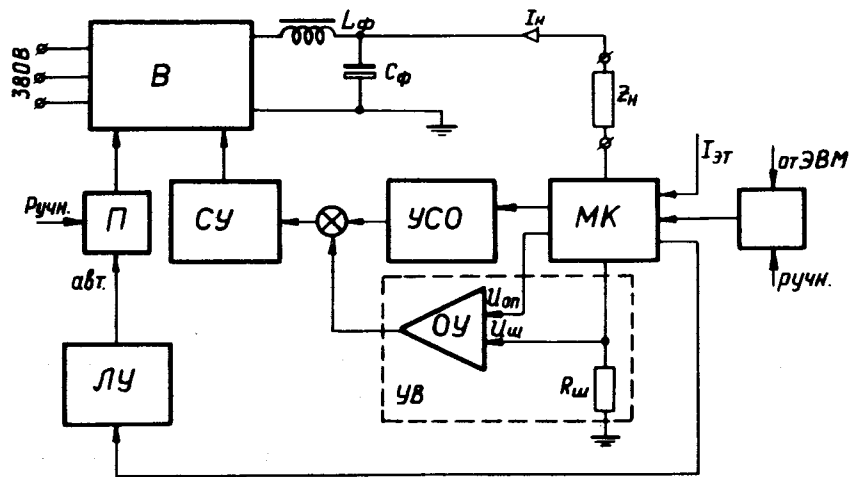


Рис. 1. Блок-схема стабилизированного источника тока для питания основной обмотки электромагнита циклотрона У-120М. В - полупроводниковый выпрямитель с комбинированным регулированием, МК - магнитный компаратор, УСО - усилитель сигнала ошибки, СУ - система управления проводимостью тиристоров, УВ - устройство ввода, ОУ - операционный усилитель, ЛУ - логическое устройство, П - переключатель рода работы.

Ввод магнитного компаратора в рабочую зону осуществляется с помощью автоматического устройства ввода /УВ/, в состав которого входят операционный усилитель /ОУ/, измерительный шунт ($R_{ш}$) и преобразователь код-напряжение /находится в блоке магнитного компаратора/ с суммированием напряжений /принципиальная схема преобразователя и основные параметры обсуждались в работе¹⁶ /.

Выходное напряжение преобразователя $U_{оп}$ поступает на один из входов ОУ, на второй его вход подается напряжение $U_{ш}$, снимаемое с измерительного шунта. Если значение тока нагрузки отклоняется от требуемой величины и выходит из рабочей зоны контура стабилизации, на выходе ОУ появляется управляющее напряжение,

полностью открывающее или запирающее /в зависимости от знака отклонения/ управляемый выпрямитель. При этом ток нагрузки начинает изменяться и происходит ввод контура в рабочую зону. На время действия УВ контур стабилизации выключается /ПУ обеспечивает блокирование УСО/.

Рассмотрим более подробно некоторые узлы обсуждаемого стабилизированного источника тока.

На рис. 2 представлена блок-схема выпрямителя с комбинированным регулированием. Выпрямитель содержит 3 секции. Одна из секций представляет собой управ-

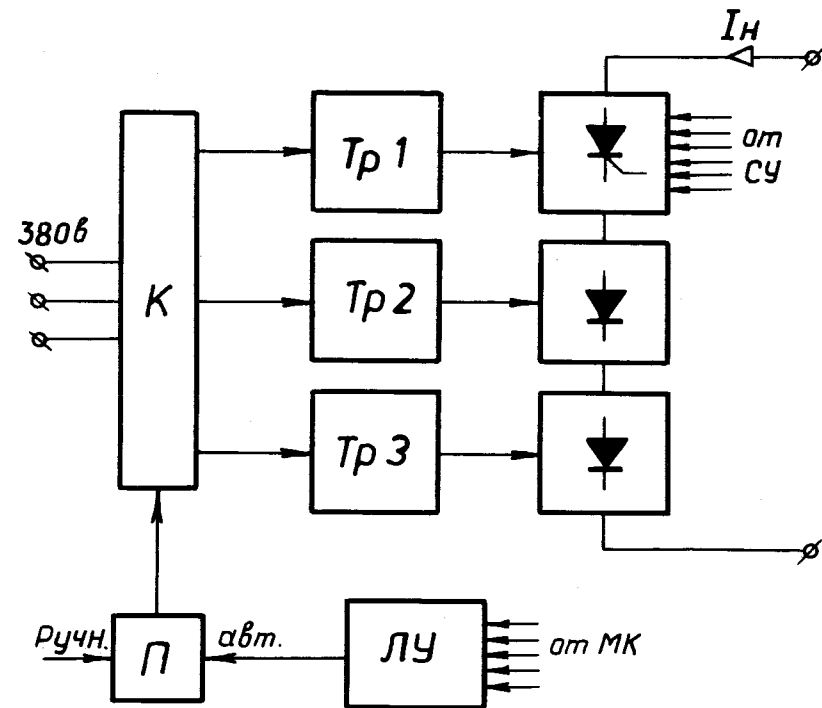


Рис. 2. Блок-схема выпрямителя с комбинированным регулированием. К - контактное устройство; Тр1, Тр2, Тр3 - преобразовательные трансформаторы; ЛУ - логическое устройство; П - переключатель рода работы.

ляемый выпрямитель с фазовым управлением, две другие являются неуправляемыми выпрямителями с отношением выпрямленных напряжений 1:2. Таким образом, устройство в целом обеспечивает дискретное и плавное регулирование выпрямленного напряжения.

Включение и выключение секций осуществляется с помощью контактного устройства на первичной стороне силовых трансформаторов. Имеется два режима переключения: ручной и автоматический. Выбор режима производится переключателем П. В автоматическом режиме сигналы управления контактным устройством вырабатываются логическим устройством /ЛУ/ в соответствии с кодом величины установленного тока, который поступает на входы ЛУ от компаратора.

Принципиальная схема ЛУ представлена на рис. 3. Контакты реле P1, P2, P3 обеспечивают /через промежуточные реле/ включение и выключение контакторов в цепях трансформаторов Тр1, Тр2, Тр3. Переключатель рода работы П имеет шесть положений /см. таблицу/.

Положение переключателя	Положение контактов
1. Автоматический режим	контакт 4 - вниз
2. Отключено	все контакты - вверх
3. Включен Тр1	контакт 2 - вниз
4. Включены Тр1 и Тр2	контакты 1,2 - вниз
5. Включены Тр1 и Тр3	контакты 2,3 - вниз
6. Включены Тр1, Тр2 и Тр3	контакты 1,2,3 - вниз

В автоматическом режиме питание на обмотку реле P1 подается постоянно, а обмотки P2 и P3 подключены к коллекторам транзисторов Т1 и Т2. Сигналы на базах транзисторов Т1 и Т2 являются соответственно логическими функциями

$$F_1 = \bar{b}cde + b\bar{c} + a(d+e),$$

$$F_2 = \bar{a}bc + a\bar{b}\bar{c},$$

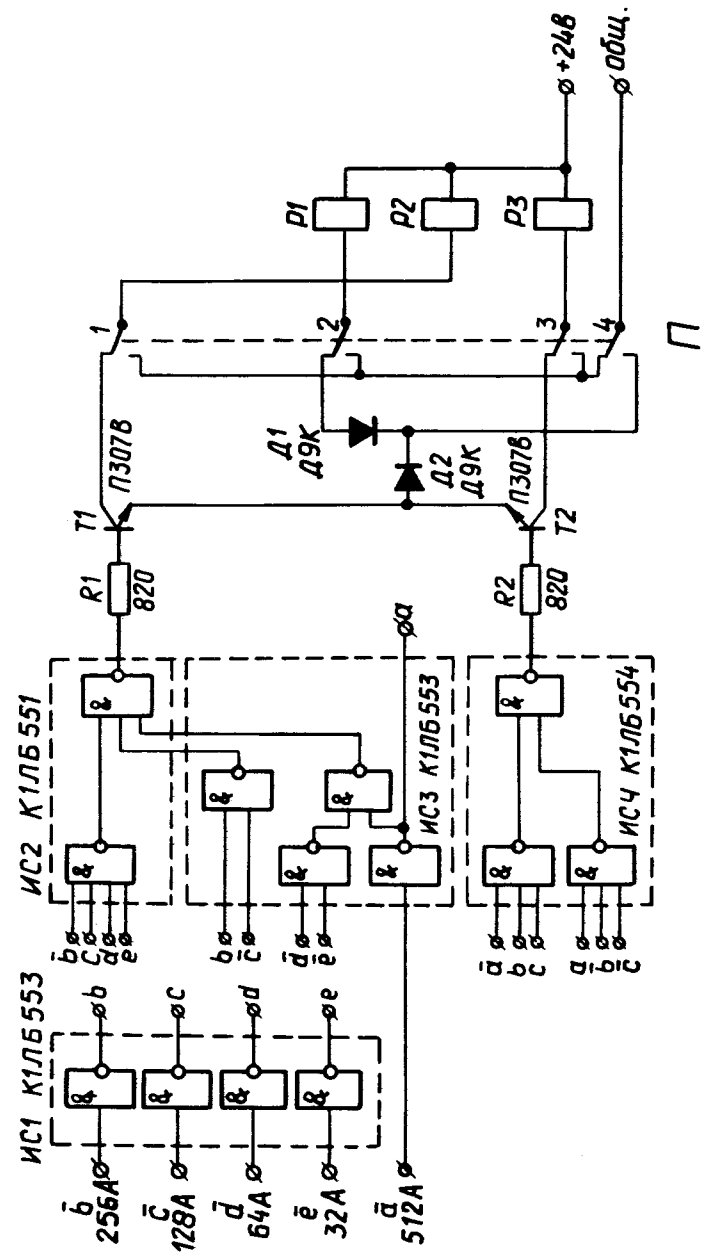


Рис. 3. Принципиальная схема логического устройства.

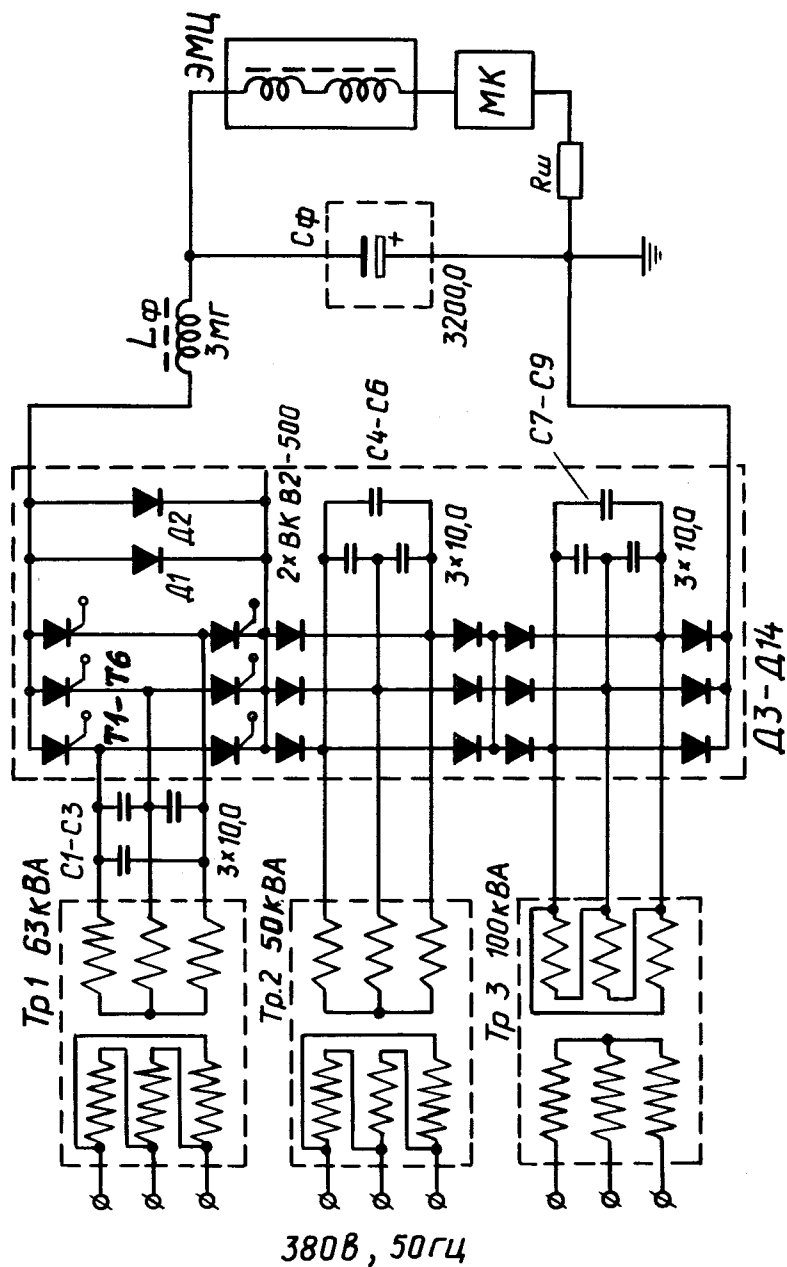


Рис. 4. Принципиальная схема силовой части выпрямителя с комбинированным регулированием.

где a, b, c, d, e - информационные сигналы, поступающие со старших разрядов цифроаналогового преобразователя код-ток /роль этого ЦАП выполняет магнитный компаратор/. Совместная работа второй и третьей секций выпрямителя /Tr2 и Tr3/ возможна только при $F_1 \cdot F_2 = abc(d+e)$.

Таким образом, логическое устройство обеспечивает включение нужной комбинации секций для получения требуемого диапазона регулирования тока.

Принципиальная схема силовой части выпрямителя с комбинированным регулированием приведена на рис. 4.

Емкостные цепочки C1 ÷ C9 защищают вентили от перенапряжений. Фильтр $L_\phi C_\phi$ имеет коэффициент фильтрации порядка 10. Дроссель выполнен на Ш-образном сердечнике сечением 150 см^2 , обмотка содержит 60 витков медной трубки $\phi 8 \text{ мм}$, немагнитный зазор в сердечнике - $2 \times 10 \text{ мм}$. Весь диапазон автоматического регулирования тока, обеспечиваемый выпрямителем, разбит на четыре поддиапазона:

№	Пределы регулирования А	Работают секции
1	0 - 224	секция 1
2	224 - 384	секции 1 и 2
3	384 - 544	секции 1 и 3
4	544 - 640	секции 1,2 и 3

Используя методику, изложенную в работе ^{/10/}, определим энергетические показатели и коэффициент пульсаций напряжения для этого выпрямителя /при идеализирующих допущения/. Введем обозначения: I_c - действующее значение несинусоидального тока, I_1 - действующее значение первой гармоники этого тока, I_{1a} - активная составляющая потребляемого тока, I_d - постоянная составляющая выпрямленного тока, U_d - по-

стоянная составляющая выпрямленного напряжения, U_{M6} - амплитуда шестой гармоники выпрямленного напряжения, n_1, n_2, n_3 - коэффициенты трансформации силовых трансформаторов Тр1, Тр2, Тр3 соответственно, определяемые как отношение числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной, α - угол регулирования управляемой секции выпрямителя, ν - коэффициент искажений, $\cos \phi$ - коэффициент сдвига, χ - коэффициент мощности, q - коэффициент пульсаций ($\nu = I_1 / I_c$, $\cos \phi = I_{1a} / I_1$, $\chi = \nu \cos \phi$, $q = U_{M6} / U_d$). Эпюры входных токов одной фазы установки для двух характерных режимов регулирования ($0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$) показаны на рис. 5.

1. $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$I_c = I_d \frac{\sqrt{2}}{3} [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 - 9 \frac{\alpha}{\pi} n_1 (n_3 + 3n_2)]^{1/2} \quad /1/$$

$$I_1 = I_d \frac{\sqrt{2}}{\pi} [(n_3 + 3n_2)^2 + 9n_1^2 + 6n_1(n_3 + 3n_2)\cos \alpha]^{1/2} \quad /2/$$

$$I_{1a} = I_d \frac{\sqrt{2}}{\pi} (n_3 + 3n_2 + 3n_1 \cos \alpha) \quad /3/$$

$$\nu = \frac{3}{\pi} [(n_3 + 3n_2)^2 + 9n_1^2 + 6n_1(n_3 + 3n_2)\cos \alpha]^{1/2} / [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 - 9 \frac{\alpha}{\pi} n_1 (n_3 + 3n_2)]^{1/2} \quad /4/$$

$$\cos \phi = (n_3 + 3n_2 + 3n_1 \cos \alpha) / [(n_3 + 3n_2)^2 + 9n_1^2 + 6n_1(n_3 + 3n_2)\cos \alpha]^{1/2} \quad /5/$$

$$\chi = \frac{3}{\pi} (n_3 + 3n_2 + 3n_1 \cos \alpha) / [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 - 9 \frac{\alpha}{\pi} n_1 (n_3 + 3n_2)]^{1/2} \quad /6/$$

$$q = \frac{2}{35} [(n_3 + 3n_2)^2 + 3n_1(n_3 + 3n_2)(7 \cos 5\alpha - 5 \cos 7\alpha) + 9n_1^2(1 + 35 \sin^2 \alpha)]^{1/2} / (n_3 + 3n_2 + 3n_1 \cos \alpha) \quad /7/$$

2. $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$

$$I_c = I_d \frac{\sqrt{2}}{3} [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 + 9n_1^2 - 9 \frac{\alpha}{\pi} n_1 (n_3 + 3n_2 + 3n_1)]^{1/2} \quad /8/$$

$$I_1 = I_d \frac{\sqrt{2}}{\pi} [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 + 9n_1^2 + 6n_1(n_3 + 3n_2 + 3n_1) \times \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})]^{1/2} \quad /9/$$

$$I_{1a} = I_d \frac{\sqrt{2}}{\pi} [n_3 + 3n_2 + 3n_1(1 + \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}))] \quad /10/$$

$$\nu = \frac{3}{\pi} [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 + 9n_1^2 + 6n_1(n_3 + 3n_2 + 3n_1)\cos(\alpha + \frac{\pi}{3})]^{1/2} / [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 + 9n_1^2 - 9 \frac{\alpha}{\pi} n_1 (n_3 + 3n_2 + 3n_1)]^{1/2} \quad /11/$$

$$\cos \phi = [n_3 + 3n_2 + 3n_1(1 + \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}))] / [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 + 9n_1^2 + 6n_1(n_3 + 3n_2 + 3n_1)\cos(\alpha + \frac{\pi}{3})]^{1/2} \quad /12/$$

$$\chi = \frac{3}{\pi} [n_3 + 3n_2 + 3n_1(1 + \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}))] / [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 + 9n_1^2 - 9\frac{\alpha}{\pi}n_1(n_3 + 3n_2 + 3n_1)]^{1/2}. \quad /13/$$

$$q = \frac{2}{35} [(n_3 + 3n_2 + 3n_1)^2 - 3n_1(n_3 + 3n_2 + 3n_1)(7\sin 5(\alpha - \frac{\pi}{6}) - 5\sin 7(\alpha - \frac{\pi}{6})) + 9n_1^2(1 + 35\cos^2(\alpha - \frac{\pi}{6}))]^{1/2} / [n_3 + 3n_2 + 3n_1(1 - \sin(\alpha - \frac{\pi}{6}))]. \quad /14/$$

На рис. 6 приведены графики зависимостей χ , q /в функции U_d /, вычисленные по формулам /6/, /7/, /13/, /14/ для конкретных параметров установки, а именно:

$$n_1 = 0,1392; \quad n_2 = 0,096; \quad n_3 = 0,574;$$

$$E_{d10} = 124 \text{ В}; \quad E_{d2} = 85 \text{ В}; \quad E_{d3} = 170 \text{ В};$$

где E_{d10} , E_{d2} , E_{d3} - выпрямленное напряжение секций 1, 2 и 3 в режиме холостого хода и $\alpha = 0$ /для секции 1/. На этом же рисунке крестиками обозначены экспериментальные значения χ и q . Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями обусловлено приближенным характером расчетных соотношений.

На рис. 7 приведена принципиальная схема усилителя сигнала ошибки /на интегральной схеме ИС1/ и усилителя устройства ввода /ИС2/. Вход ИС1 защищен от больших сигналов рассогласования ограничительной цепью /R1, Д1, Д2/. Элементы C1, C2, C3, R1, R2, R4, R8 обеспечивают необходимую коррекцию амплитудно- и фазово-частотной характеристик основного контура авторегулирования. Выходной усилитель выполнен по схеме двухкаскадного эмиттерного повторителя. Диод

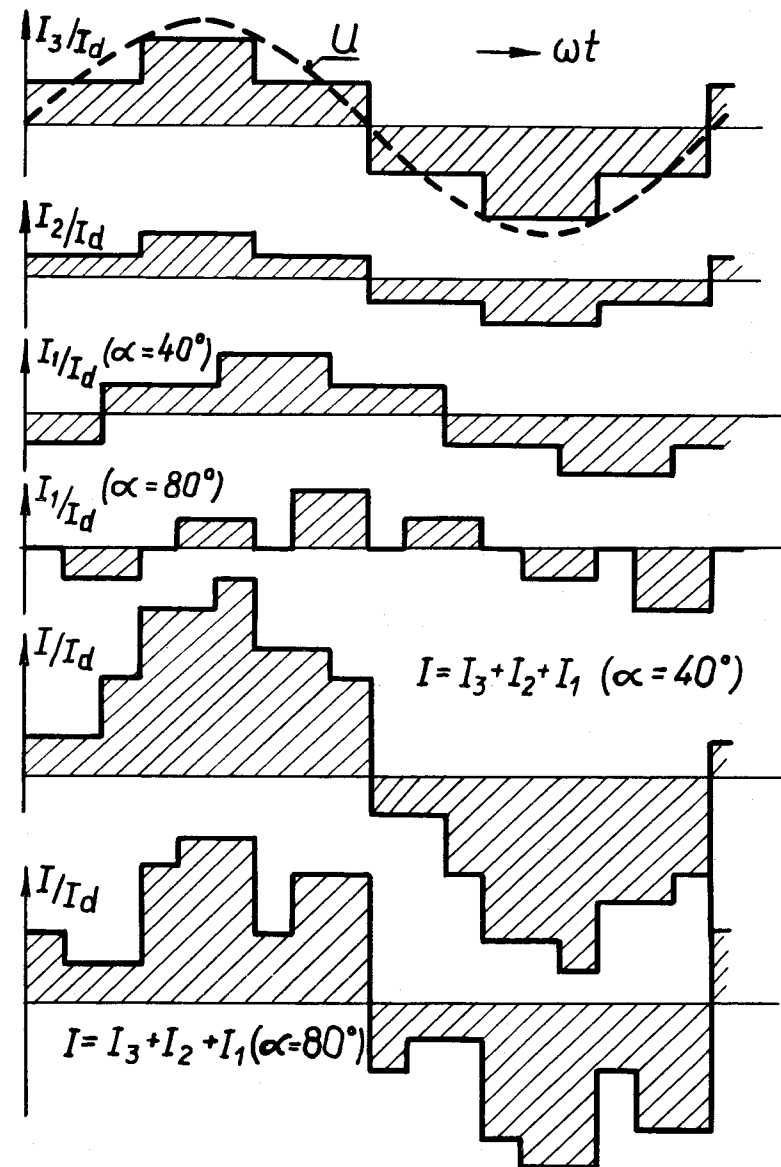


Рис. 5. Эпюры тока фазы, потребляемого выпрямителем с комбинированным регулированием из сети.

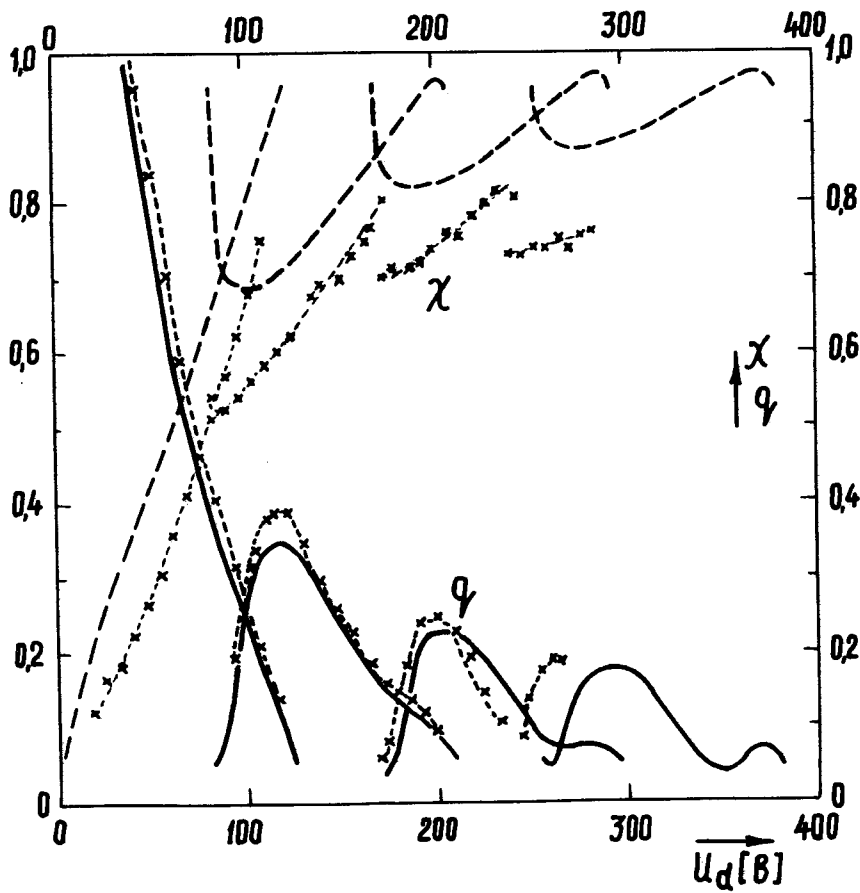


Рис. 6. Графики χ и φ в функции U_d .

Д3 предотвращает подачу на вход схемы управления положительного напряжения.

При нормальной работе контура авторегулирования на вход СУ поступает сигнал рассогласования с выхода УСО. Устройство ввода в этом случае практически не оказывает влияния на работу, так как через замкнутые контакты ЗР и резистор R17 усилитель охвачен глубокой отрицательной обратной связью и его выходное напряжение меньше, чем пороговое напряжение диода Д5.

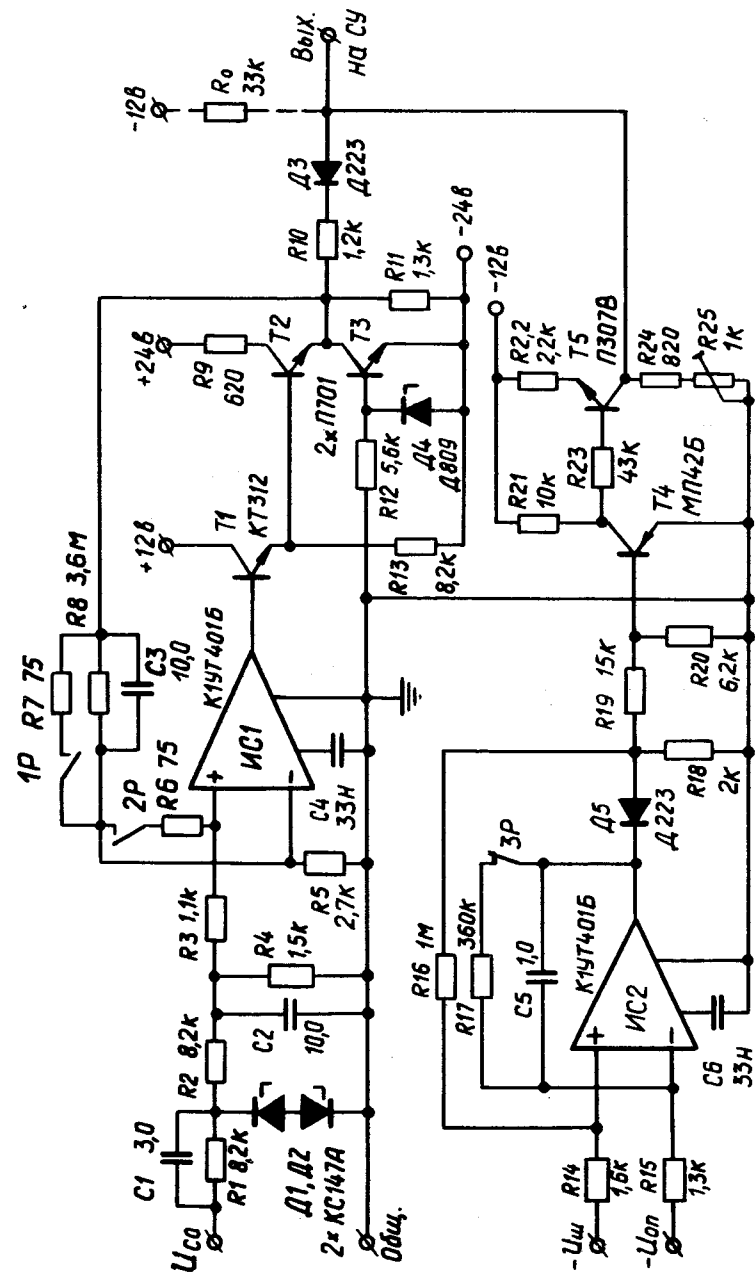


Рис. 7. Принципиальная схема усилителя сигнала ошибки и усилителя устройства ввода.

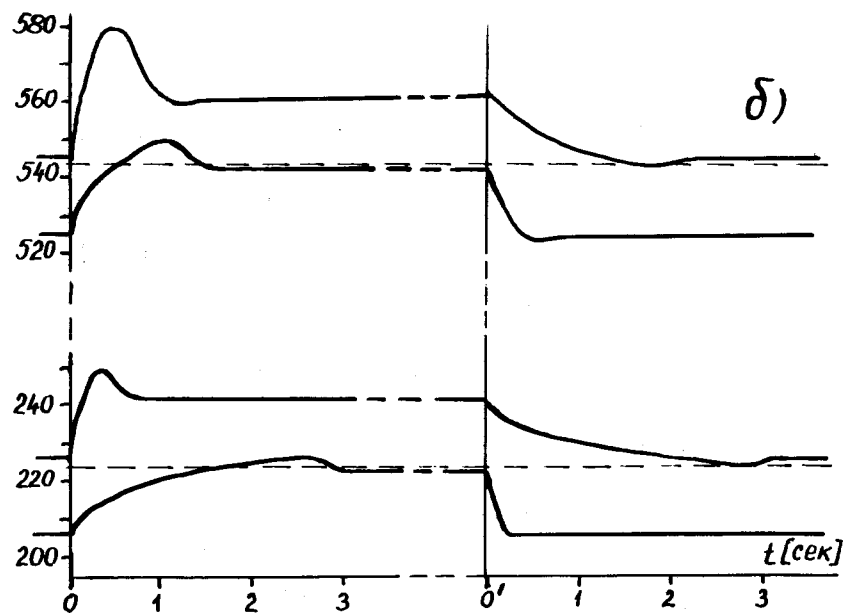
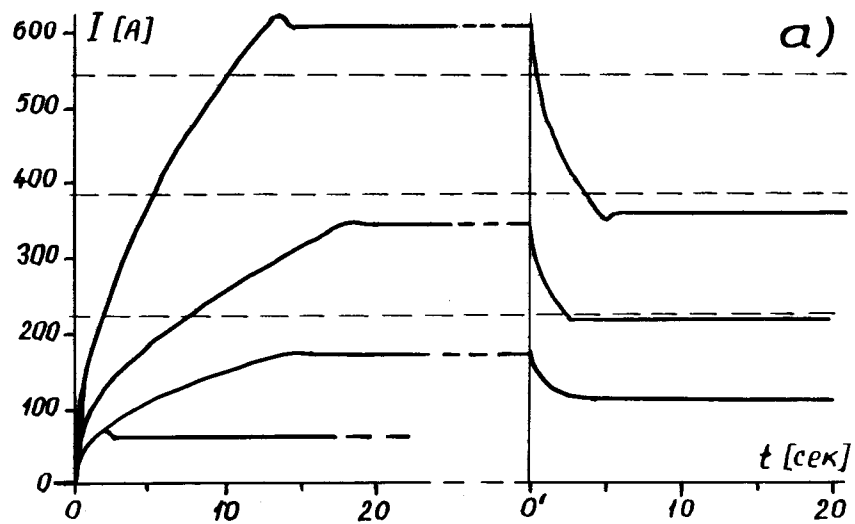


Рис. 8. Кривые переходного процесса при больших /а/ и малых /б/ изменениях тока. Пунктиром обозначены уровни переключения секций выпрямителя. В момент времени O подавалась команда на увеличение тока, в момент времени O' - на его уменьшение.

При разбалансах, превышающих ширину рабочей зоны МК, исполнительное реле порогового устройства своими замыкающимися контактами 1Р и 2Р обеспечивает блокирование УСО и на вход СУ поступает только напряжение устройства ввода.

В режиме ввода контакт 3Р размыкается и усилитель устройства ввода охватывается положительной обратной связью. В зависимости от полярности сигнала разбаланса на выходе усилителя устройства ввода транзистор Т5 будет открыт или закрыт, при этом на вход СУ подается напряжение для полного отпирания или запирающего управляемого выпрямителя $-0,3 В$ или $-3 В$ соответственно. Напряжение $-0,3 В$ образуется на делителе R_0, R_{24}, R_{25} /резистор R_0 находится в блоке СУ/. Ток магнита изменяется до тех пор, пока основной контур стабилизации не войдет в рабочий режим. Кривые переходных процессов в контуре регулирования при ступенчатом изменении величины уставки тока представлены на рис. 8.

Принципиальная схема контакторного устройства и цепей защиты показана на рис. 9.

В цепи катушек магнитных пускателей $/K_1, K_2, K_3/$ включены контакты реле защиты, блокирующие систему при отсутствии охлаждающей воды в обмотке магнита /РГКв/ и стойке выпрямителей /РГКв/, а также при увеличении тока в цепи нагрузки сверх допустимого значения /РМ/.

Реле РП введено в цепь катушек включения пускателей с целью исключить возможность самопроизвольного включения трансформаторов при восстановлении рабочего состояния цепей защиты после устранения причин, вызвавших ее срабатывание. Включение трансформаторов после срабатывания защиты осуществляется путем предварительного включения реле РП кнопкой деблокировки. Включение каждой секции выпрямителя индицируется сигнальными лампами ЛК₁, ЛК₂, ЛК₃ на панели блока управления источником.

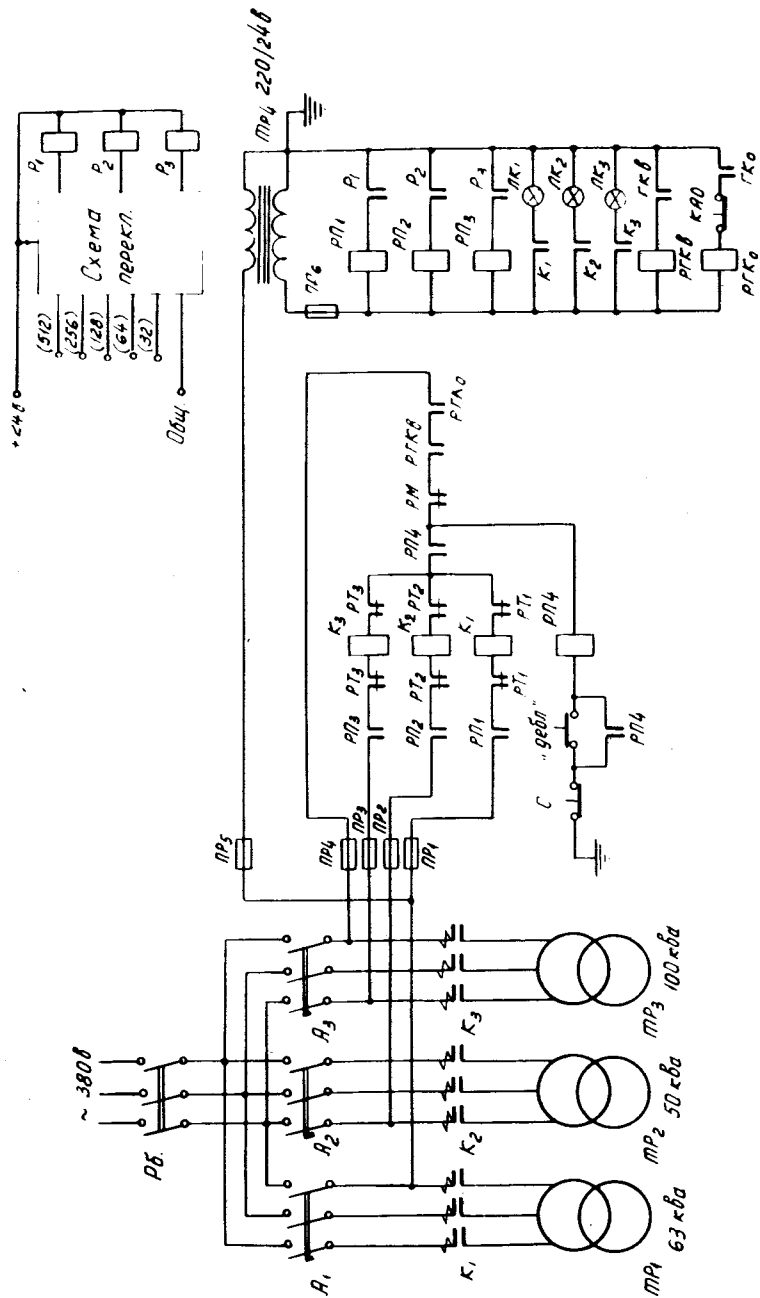


Рис. 9. Принципиальная схема контактного устройства и цепей защиты.

Литература

1. В.В.Ахманов, Ф.Е.Гугнин, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, Е.Схвабе. Препринт ОИЯИ, Р9-5498, стр. 43, Дубна, 1971.
2. В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, А.Н.Любенко, В.А.Пережогин. Препринт ОИЯИ, Р9-5498, Дубна, 1971.
3. Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, В.А.Пережогин. Препринт ОИЯИ, Р9-6241, стр. 79, Дубна, 1972.
4. В.В.Калиниченко. Сообщение ОИЯИ, 13-6271, Дубна, 1972.
5. В.В.Калиниченко. Сообщение ОИЯИ, 13-6363, Дубна, 1972.
6. Л.К.Богомолова, Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, В.А.Пережогин. Препринт ОИЯИ, Р9-7339, стр. 62, Дубна, 1973.
7. И.Б.Енчевич, А.Б.Йорданов, В.В.Калиниченко, А.П.Минкова. Сообщение ОИЯИ, 13-9419, Дубна, 1975.
8. Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко. Сообщение ОИЯИ, 13-6531, Дубна, 1972.
9. Ю.Н.Денисов, В.В.Калиниченко, А.Г.Комиссаров. Сообщение ОИЯИ, 13-8420, Дубна, 1974.
10. В.В.Калиниченко. Сообщение ОИЯИ, 13-9578, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 мая 1976 года.