

Б. 43



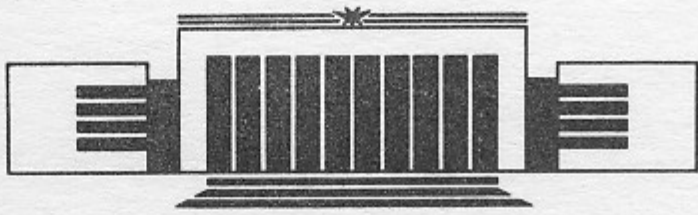
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.С. Белкин, Д.В. Ковалевский

СИСТЕМА ПИТАНИЯ
ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО
ИСТОЧНИКА ИОНОВ

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО РАН
ИНВ. № 1 219

ПРЕПРИНТ 88-151



НОВОСИБИРСК

+

ВВЕДЕНИЕ

Для генерации ионных пучков с высокой яркостью в ИЯФ СО АН СССР разработаны электрогидродинамические (ЭГД) источники ионов [1, 2]. В данной работе описывается система питания, созданная для такого источника. Ее параметры и конфигурация, изображенная на рис. 1, определяются следующими соображениями.

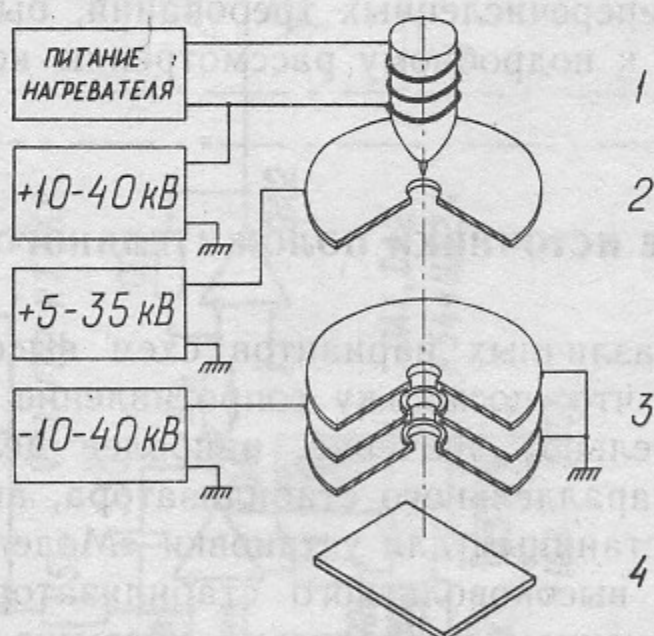


Рис. 1. Схема ионно-оптической колонны ЭГД-источника ионов:

1—ЭГД-эмиттер ионов; 2—вытягивающий электрод; 3—линза; 4—мишень.

Между ЭГД-эмиттером ионов и вытягивающим электродом подается разность потенциалов 5—15 кВ. Для технологических

целей требуются энергии ионов до 40 кэВ, поэтому необходимо доускорение пучка. Фокусировка ионного пучка осуществляется одиночной линзой с потенциалом на среднем электроде до -40 кВ.

Ток ЭГД-источника достигает 500 мкА, причем сопротивление нагрузки источника питания вытягивающего электрода может принимать отрицательное значение из-за попадания на него пучка ионов с эмиттера, который находится под более высоким потенциалом.

Плотность тока в пучке определяется хроматическими aberrациями ионно-оптической системы, поэтому важно минимизировать энергоразброс ионов в пучке. Исходный энергоразброс ионов, эмиттируемых ЭГД-источником, составляет 5—10 эВ, и система питания не должна существенно увеличивать его. Следовательно, стабильность источников питания, пульсации напряжения и величина шага регулирования не должны превышать 5 В.

Для питания нагревателя источника ионов, находящегося под высоким потенциалом, требуется напряжение до 10 В, ток до 10 А и не менее 100 градаций регулирования мощности.

Блоки питания должны быть защищены от пробоев высокого напряжения.

Исходя из вышперечисленных требований, были разработаны источники питания, к подробному рассмотрению которых мы переходим.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрение различных вариантов схем высоковольтных источников показало, что, поскольку сопротивление нагрузки может принимать отрицательное значение, наиболее целесообразно использовать схему параллельного стабилизатора, аналогичную разработанной В.П. Останиным для установки «Модель соленоида».

Первый контур высоковольтного стабилизатора выполнен на триоде ГП-5, включенном параллельно нагрузке. Второй контур стабилизирует суммарный ток нагрузки и регулирующей лампы. Принципиальная схема представлена на рис. 2. Преобразователь напряжения [3] с частотой преобразования 18—20 кГц и амплитудой напряжения около 300 В имеет мощность 500 Вт, что достаточно для питания всего блока. Напряжение с высоковольтного трансформатора, имеющего передаточное отношение 1:20, поступа-

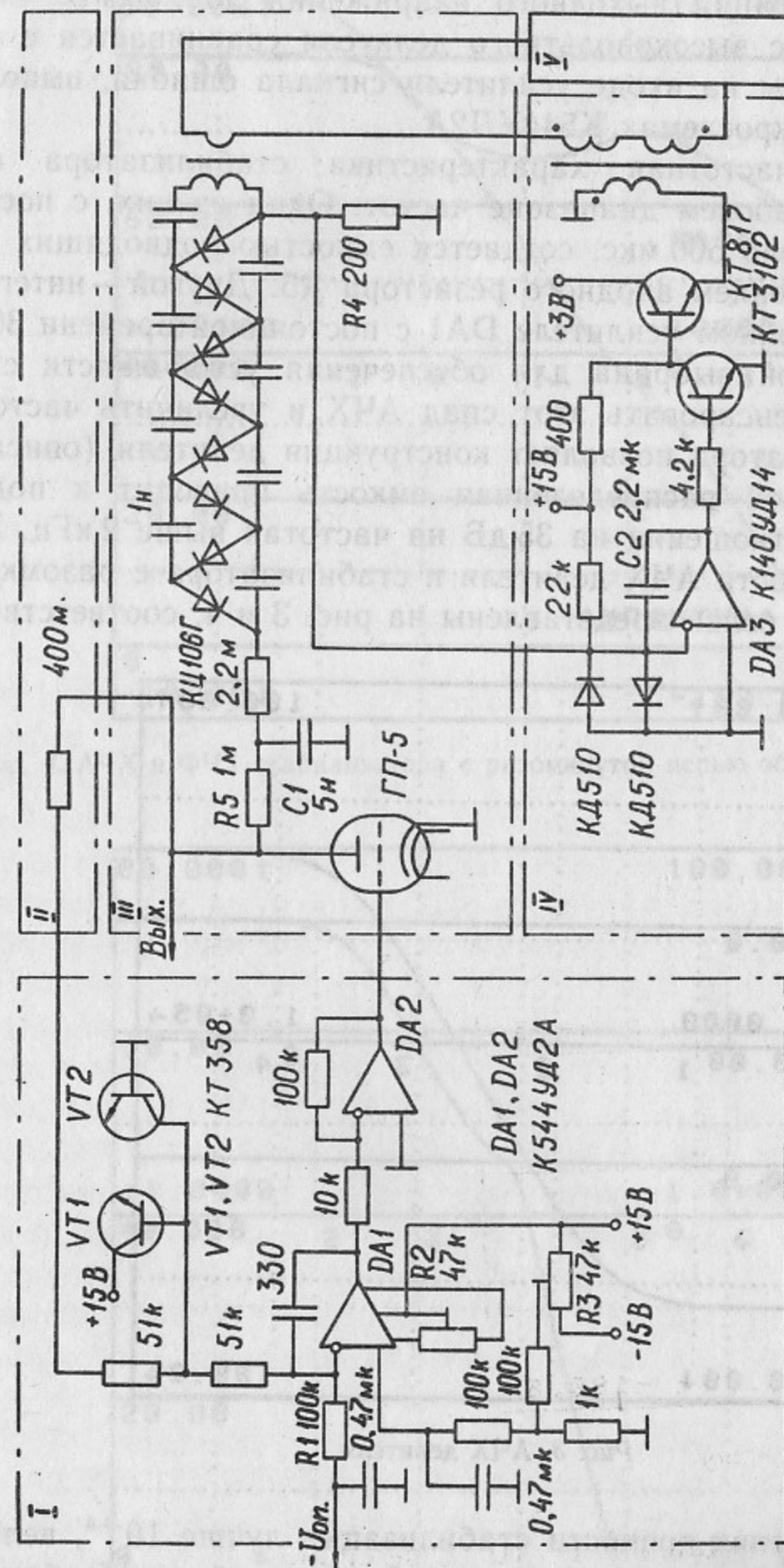


Рис. 2. Принципиальная схема высоковольтного источника положительного напряжения:
I — усилитель сигнала ошибки; II — делитель; III — высоковольтный выпрямитель; IV — стабилизатор тока;
V — инвертор.

ет на уосьмеритель и затем на RC-фильтр, который позволяет уменьшить пульсации выходного напряжения до 200 мВ. Сигнал обратной связи с высоковольтного делителя сравнивается с опорным напряжением на входе усилителя сигнала ошибки, выполненного на двух микросхемах К544УД2А.

Амплитудно-частотная характеристика стабилизатора имеет два полюса в рабочем диапазоне частот. Один из них, с постоянной времени около 500 мкс, создается емкостью подводющих кабелей и сопротивлением анодного резистора R5. Другой — интегратором на операционном усилителе DA1 с постоянной времени 300 мс, величина которой выбрана для обеспечения устойчивости схемы. Частично скомпенсировать этот спад АЧХ и увеличить частотную полосу стабилизатора позволяет конструкция делителя (описанная ниже), в которой распределенная емкость приводит к подъему передаточного отношения на 35 дБ на частотах выше 2 кГц. Изложенные особенности АЧХ делителя и стабилизатора с разомкнутой цепью обратной связи представлены на рис. 3 и 4, соответственно.

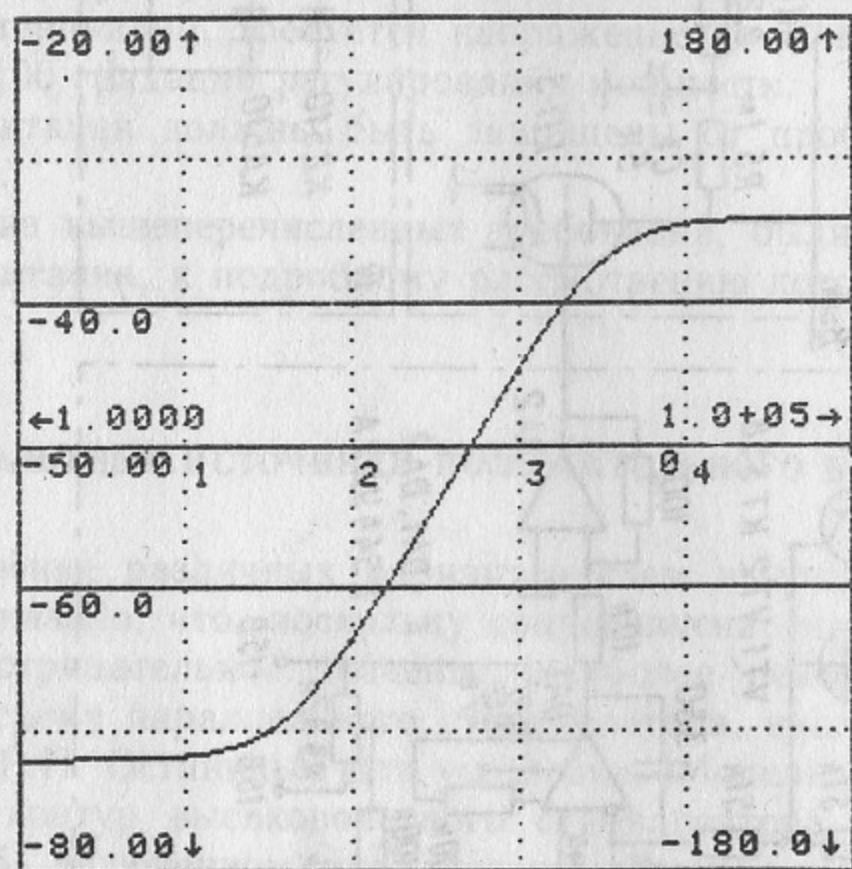


Рис. 3. АЧХ делителя.

Для обеспечения точности стабилизации лучше 10^{-4} , величина усиления стабилизатора с разомкнутой цепью обратной связи составляет 80 дБ. Чтобы минимизировать дрейф напряжения смеще-

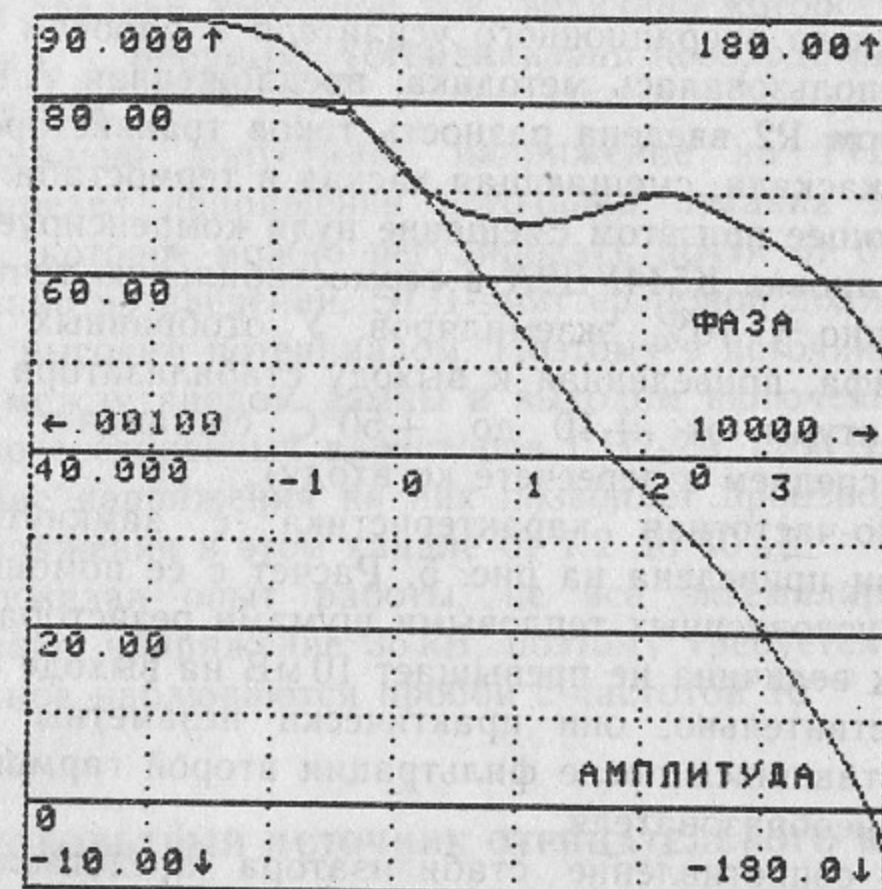


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ стабилизатора с разомкнутой цепью обратной связи.

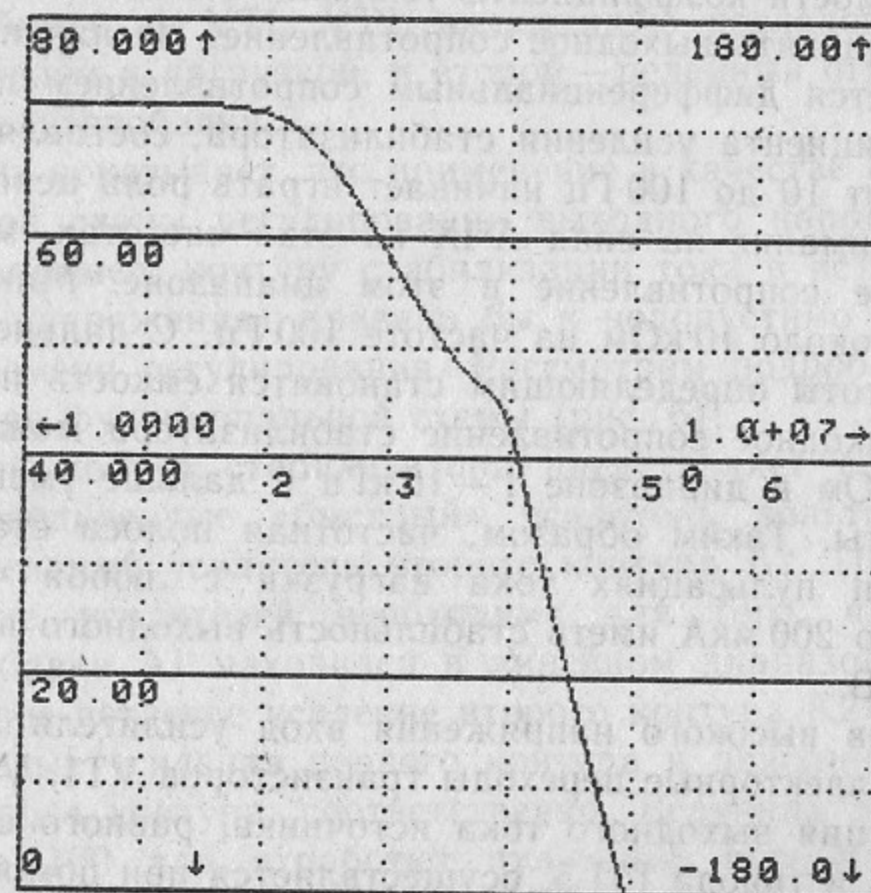


Рис. 5. АЧХ стабилизатора с замкнутой цепью обратной связи.

ния нуля входного операционного усилителя в рабочем диапазоне температур использовалась методика, предложенная А.В. Леденевым. Резистором R2 введена разность токов транзисторов дифференциального каскада, смещающая каскад в термостабильную точку, а возникающее при этом смещение нуля компенсируется резистором R3. Установка K544УД2А в термостабильную точку удается только примерно у 10% экземпляров. У отобранных микросхем величина дрейфа, приведенная к выходу стабилизатора при изменении температуры от +10 до +50°C составляет около 3 В (20 мкВ/°С в среднем в пересчете ко входу).

Амплитудно-частотная характеристика с замкнутой цепью обратной связи приведена на рис. 5. Расчет с ее помощью шумов на выходе, обусловленных тепловыми шумами резистора R1, показывает, что их величина не превышает 10 мВ на выходе стабилизатора, и, действительно, они практически незаметны на уровне пульсаций, оставшихся после фильтрации второй гармоники рабочей частоты преобразователя.

Выходное сопротивление стабилизатора представляет собой параллельно соединенные емкость подводных кабелей, дифференциальное сопротивление триода и цепочку R5, C1. Пользуясь графиком зависимости коэффициента усиления стабилизатора от частоты, можно оценить выходное сопротивление. На низких частотах оно определяется дифференциальным сопротивлением лампы и, с учетом коэффициента усиления стабилизатора, составляет 500 Ом. На частотах от 10 до 100 Гц начинает играть роль цепочка R5, C1 и, обратив внимание на спад АЧХ на этих частотах, можно оценить выходное сопротивление в этом диапазоне. Максимальная величина его около 10 кОм на частоте 100 Гц. С дальнейшим увеличением частоты определяющим становится емкость подводных кабелей, и выходное сопротивление стабилизатора может достигнуть значения 20 кОм в диапазоне 1—10 кГц и дальше уменьшается с ростом частоты. Таким образом, частотная полоса стабилизации позволяет при пульсациях тока нагрузки с любой частотой и амплитудой до 200 мкА иметь стабильность выходного напряжения лучше, чем 4 В.

От пробоев высокого напряжения вход усилителя DA1 защищают база-коллекторные переходы транзисторов VT1, VT2.

Стабилизация выходного тока источника, равного суммарному току нагрузки и триода ГП-5, осуществляется при помощи магнитного усилителя, включенного последовательно с первичной обмоткой высоковольтного трансформатора. Интегратор DA3, C2, R4,

сравнивая средний выходной ток, величина которого имеет значение 700 мкА, с опорным, устанавливает необходимый ток магнитного усилителя.

Максимально допустимое напряжение на ГП-5 определяет верхний предел напряжения источника питания вытягивающего электрода, которое можно регулировать почти от 0 до 35 кВ. Но, как показано во введении, ЭГД-эмиттер ионов должен находиться под более высоким потенциалом. Поэтому в источнике напряжения эмиттера между анодом лампы и выходом включены шесть последовательно соединенных варисторов СН2-2А 1200 В. Дополнительное падение напряжения на них позволяет производить регулирование напряжения в этом канале от 7.2 до 40 кВ.

Как показал опыт работы, не все экземпляры ламп ГП-5 выдерживают напряжение 35 кВ, поэтому требуется отбор. У плохих образцов наблюдаются пробои с частотой 10^{-2} — 10^{-3} Гц.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНОГО НАПЯЖЕНИЯ

В источнике отрицательного напряжения (рис. 7) используются также два контура регулирования: первый, представляющий собой вольтодобавку на VT1, VT2, включенную последовательно между выпрямителем и нагрузкой, и второй — релейный ограничитель диапазона вольтодобавки.

Анализ показывает, что применение в качестве второго контура аналоговой схемы регулирования выходного напряжения (аналогично, например, контуру стабилизации тока в источнике положительного напряжения) привело бы к недопустимо большой постоянной времени регулирования. Рассмотрим подробнее этот вопрос на примере функциональной схемы (рис. 6).

Второй контур стабилизатора представляет собой последовательно соединенные «быстрый» усилитель вольтодобавки A1 и дополнительный усилитель второго контура A2. Последовательное соединение усилителей необходимо для того, чтобы усилитель вольтодобавки A1 находился в линейном диапазоне. Таким образом, полное петлевое усиление второго контура $K_2 = K_1 \cdot K$, где K_1 , K — петлевые усиления первого контура и дополнительного усилителя второго контура, соответственно. Величина K_1 должна быть не менее 100 для отработки пульсаций сетевого выпрямителя. Величина K определяется отношением выходного напряжения ста-

билизатора ($U_{\text{вых}}$) к номинальному напряжению вольтодобавки ($U_{\text{вд}}$). Последнее для транзисторных каскадов не превышает 500 В, а $U_{\text{вых}} < 40 \text{ кВ}$, отсюда $K \sim 100$ и $K2 \sim 10^4$. Разнос полюсов АЧХ стабилизатора должен быть, для обеспечения устойчивости,

также 10^4 . Полюсы умножителя, RC-фильтра имеют $\tau \sim 5 \div 10 \text{ мс}$. Такого же порядка τ усилителей при использовании стандартных ОУ. Отсюда следует, что τ второго контура должно быть 50—100 с. Большое значение постоянной времени приведет к долгому выходу на режим при включении источника, переключении пределов, пробоях и т. п.

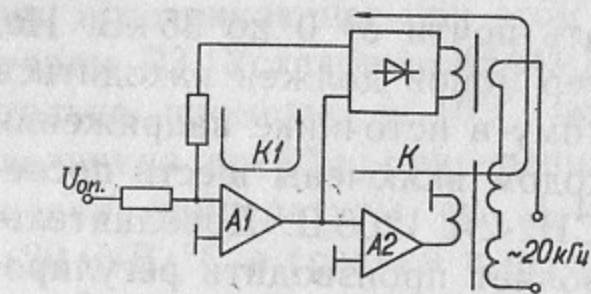


Рис. 6. Функциональная схема стабилизатора с аналоговым вторым контуром.

Указанные недостатки аналогового регулирования привели к выбору релейной схемы второго контура (рис. 7). Компаратор с гистерезисом DA3 при уменьшении напряжения на выходе вольтодобавки до 50 В подает в управляющую обмотку магнитного усилителя T1, включенного последовательно с высоковольтным трансформатором T2, максимальный ток, определенный резистором R3, а при увеличении напряжения до 100 В, снимает ток с обмотки. Таким образом осуществляется почти 100% коммутация мощности на первичной обмотке трансформатора. Частота переключений не превышает 500 Гц. Максимальный ток магнитного усилителя ($I_{\text{му}}$) выбран из следующих соображений. Когда напряжение на выходе вольтодобавки снизится до 50 В, компаратор подает ток в магнитный усилитель, что приводит к возрастанию напряжения на умножителе (U_y), и, чем больше $I_{\text{му}}$, тем быстрее возрастает U_y . С отставанием, определяемым $\tau = R2 \cdot C4$, увеличивается напряжение на C4. Во время паузы релейного стабилизатора (она наступит, когда напряжение на эмиттере транзистора VT2 достигнет 100 В) емкости умножителя дозаряжают C4, пока их потенциалы не выравняются. При низком $U_{\text{вых}}$ ток дозаряда через резистор R2 почти не компенсируется током делителя, и всегда найдется нижний предел $U_{\text{вых}}$ при заданном $I_{\text{му}}$, когда увеличение напряжения на C4 превысит диапазон вольтодобавки. Таким образом, при увеличении $I_{\text{му}}$ повышается минимальное стабилизируемое напряжение, однако при этом возрастает предельный выходной ток стабилизатора. Максимальный ток управляющей обмотки магнитного усилителя задан так, что предельный выходной ток стабилизатора

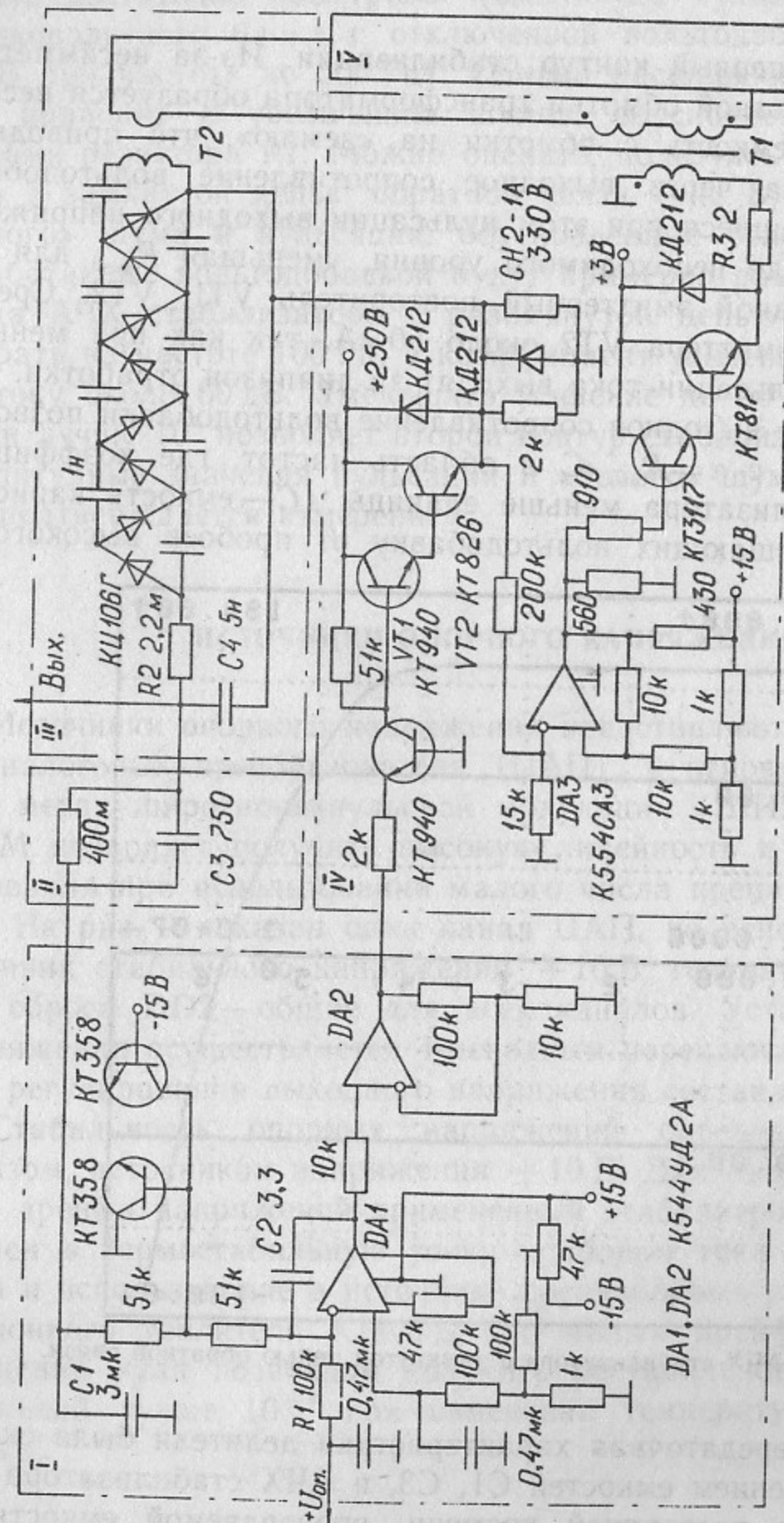


Рис. 7. Принципиальная схема высоковольтного источника отрицательного напряжения:

I — усилитель сигнала ошибки; II — делитель; III — высоковольтный выпрямитель; IV — вольтодобавка и релейный стабилизатор; V — инвертор.

достигает 600 мкА, а выходное напряжение можно регулировать от 2 до 40 кВ.

Рассмотрим первый контур стабилизации. Из-за несимметричности высоковольтной обмотки трансформатора образуется некомпенсированная емкость с обмотки на «землю», что приводит к пульсациям тока через выходное сопротивление вольтодобавки ($R_{\text{вых}}$). Появляющиеся при этом пульсации выходного напряжения можно снизить до необходимого уровня, уменьшая $R_{\text{вых}}$, для чего применен составной эмиттерный повторитель VT1, VT2. Среднее значение тока эмиттера VT2 около 50 мА, так как при меньшем его значении пульсации тока выходят за диапазон отработки. Кроме этого, низкое выходное сопротивление вольтодобавки позволяет сместить полюс с $\tau = R_{\text{вых}} \cdot C$ в область частот, где коэффициент усиления стабилизатора меньше единицы (C — емкость варистора и диодов, защищающих вольтодобавку от пробоев высокого на-

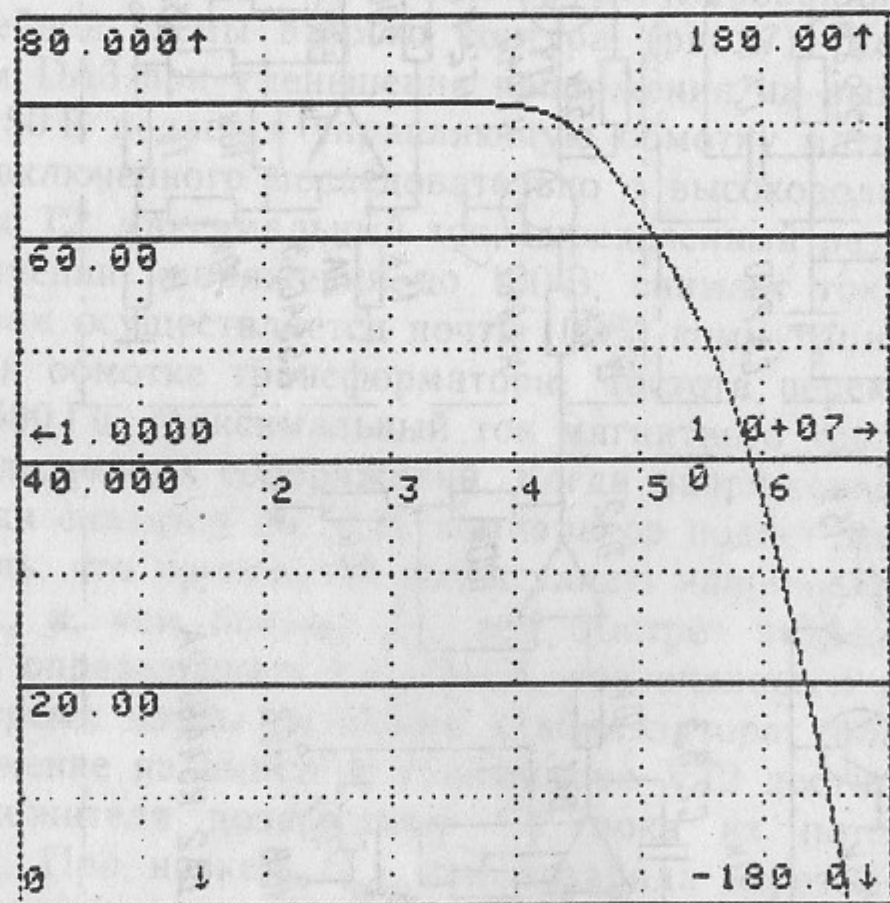


Рис. 8. АЧХ стабилизатора с замкнутой цепью обратной связи.

пряжения). Передаточная характеристика делителя была скорректирована введением емкостей $C1$, $C3$, и АЧХ стабилизатора имеет один полюс с постоянной времени, определяемой емкостью $C2$ интегратора DA1. Для отработки пульсаций выходного напряжения, создаваемых релейной схемой, канал необходимо

делать достаточно «быстрым» (амплитуда пульсаций на выходе высоковольтного блока с отключенной вольтодобавкой достигает 200 В при частоте до 500 Гц). Однако расширение полосы усиления приводит к увеличению шумов, обусловленных тепловыми шумами резистора R1. Можно оценить, пользуясь АЧХ стабилизатора с замкнутой цепью обратной связи (рис. 8), что амплитуда «белого» шума и пульсации, обусловленные релейной схемой, и отработанные вольтодобавкой будут примерно равны, если начало спада АЧХ стабилизатора с разомкнутой цепью обратной связи выбрать на частоте 100 Гц, а коэффициент усиления по постоянному току около 60 дБ. Уменьшить усиление до 60 дБ при стабильности лучше 10^4 позволяет второй контур стабилизации. Расчетные амплитудные значения пульсаций и «белого» шума около 400 мВ, что подтверждается измерением.

ИСТОЧНИКИ ОПОРНОГО НАПЯЖЕНИЯ

Источники опорного напряжения представляют собой три цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП), в основу которых положен метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Применение ШИМ позволяет получить высокую линейность и точность преобразования при использовании малого числа прецизионных элементов. На рис. 9 показан один канал ЦАП, но используемые в нем источник стабильного напряжения +10 В, генератор DD1 и счетчик сброса DD2 — общие для всех каналов. Установка опорного напряжения осуществляется 4-декадным переключателем, при этом шаг регулирования выходного напряжения составляет 4 В.

Стабильность опорных напряжений определяется, главным образом, источником напряжения +10 В. Для минимизации теплового дрейфа напряжений примененный стабилитрон КС191Ф установлен в термостабильную точку подбором тока через него. Эта мера и использование в источнике прецизионных резисторов и операционного усилителя К140УД14 с малым дрейфом напряжения смещения нуля позволили получить нестабильность опорных напряжений лучше 10^{-4} при изменении температуры от +10 до +50°C.

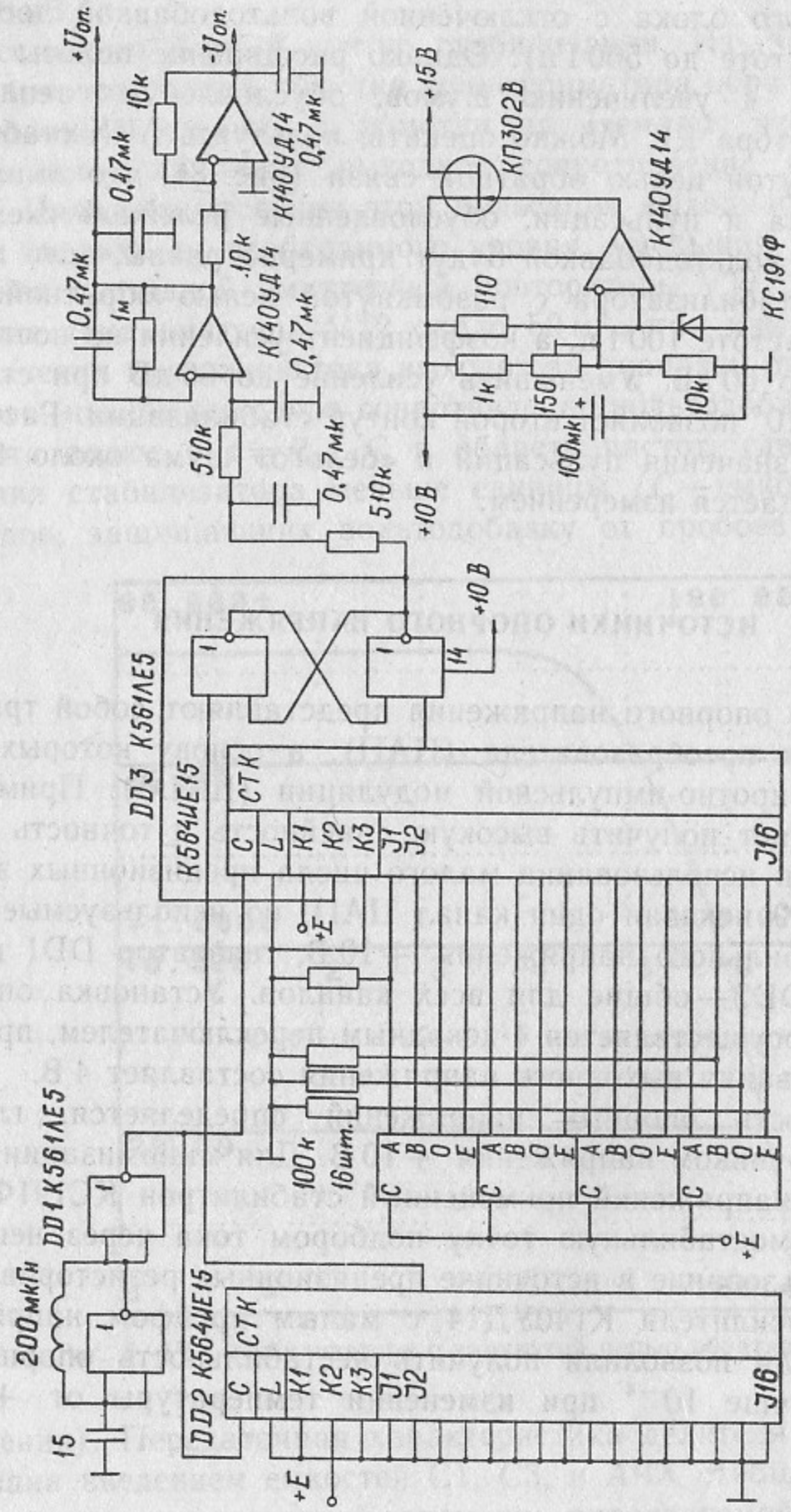


Рис. 9. Принципиальная схема источника опорного напряжения.

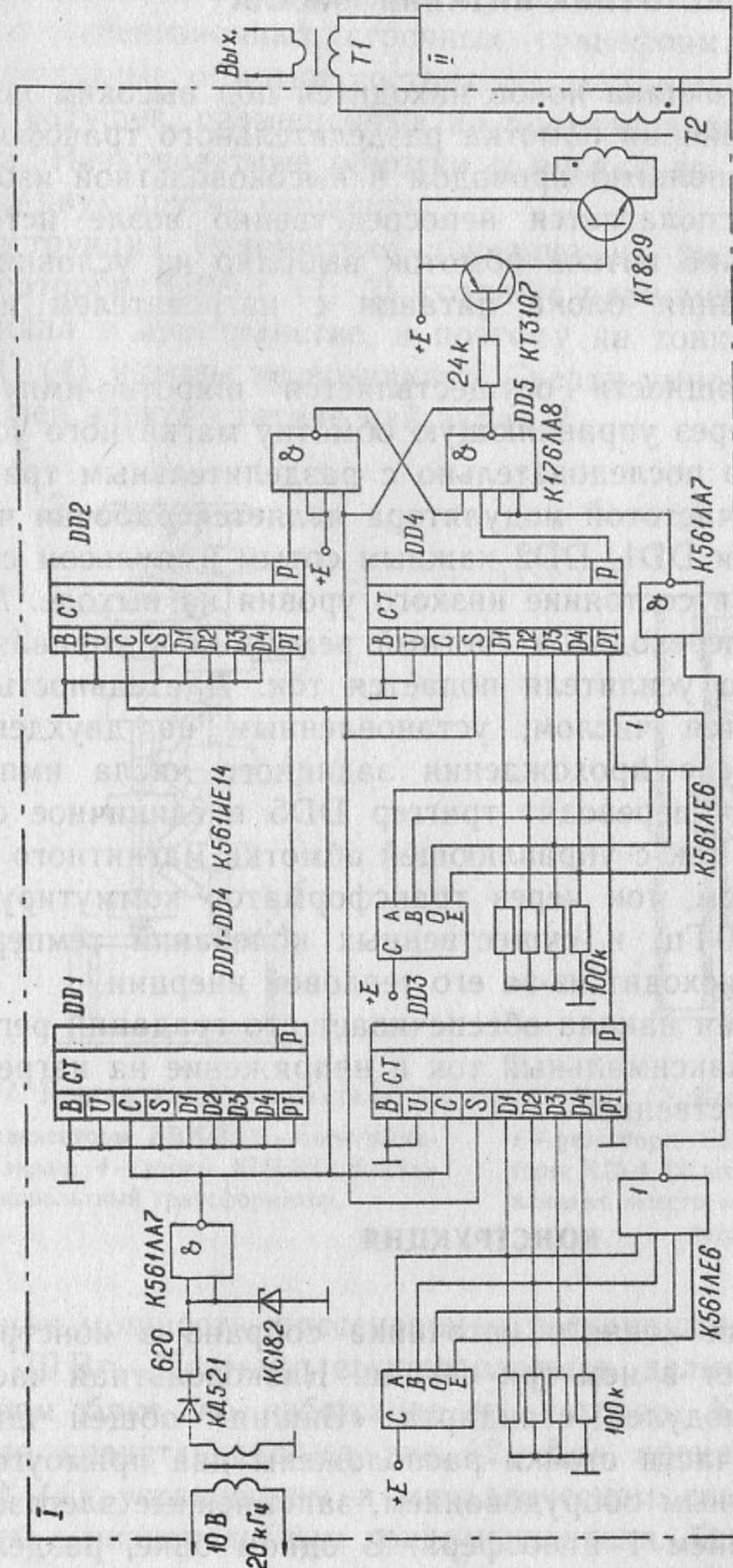


Рис. 10. Принципиальная схема источника питания накала.

I — источник питания; // — инвертор.

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ НАКАЛА

Нагреватель источника ионов находится под высоким потенциалом. Поэтому вторичная обмотка разделительного трансформатора Т1 (рис. 10) выполнена проводом в высоковольтной изоляции. Трансформатор располагается непосредственно возле источника ионов, а соотношение витков обмоток выбрано из условия оптимального согласования блока питания с нагревателем ионного источника.

Регулировка мощности осуществляется широтно-импульсной модуляцией тока через управляющую обмотку магнитного усилителя Т2, включенного последовательно с разделительным трансформатором. Опорной частотой модулятора является рабочая частота инвертора. Счетчики DD1, DD2 каждым сотым импульсом сбрасывают триггер DD5 в состояние низкого уровня на выходе. Микросхемы DD3, DD4 переходят в счетный режим, а в управляющую обмотку магнитного усилителя подается ток. Длительность этого режима определяется числом, установленным на двухдекадном переключателе. После прохождения заданного числа импульсов счетчики DD3, DD4 переводят триггер DD5 в единичное состояние, чем снимается ток с управляющей обмотки магнитного усилителя. Таким образом, ток через трансформатор коммутируется с частотой около 200 Гц, и существенных колебаний температуры нагревателя не происходит из-за его тепловой инерции.

Источник питания накала обеспечивает сто градаций регулирования мощности. Максимальный ток и напряжение на нагревателе 15 А и 15 В, соответственно.

КОНСТРУКЦИЯ

Система питания ионного источника собрана в конструктиве «Вишня» и занимает в нем три секции. Низковольтная часть состоит из шести модулей стандарта «Вишня» общей шириной 320 мм. В нижней части стойки расположены два прямоугольных бака с высоковольтным оборудованием, заполненные элегазом под избыточным давлением 1 атмосфера. В одном баке, разделенном экранами на три отсека, собраны высоковольтные трансформаторы, умножители, RC-фильтры и регулирующие лампы всех каналов.

Используются высоковольтные катушки и ферритовые сердечники от телевизионных строчных трансформаторов ТВС-110Л6. Высоковольтные обмотки состоят из двух последовательно соединенных катушек, размещенных на противоположных сторонах сердечника. Низковольтные обмотки содержат по 100 витков и намотаны на двух других сторонах.

Конструкция умножителя показана на рис. 11. Две колонны конденсаторов КВИ-3 (1, 3) создают равномерное распределение потенциала в пространстве, и поэтому на тонких выводах диодов КЦ106Г (4) короны не возникает. Сверху умножительной колонны установлен электростатический экран 2.

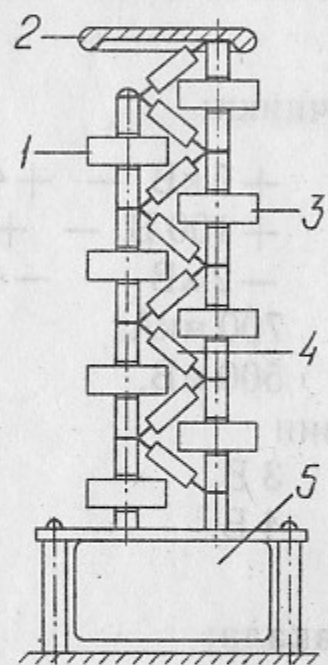


Рис. 11. Конструкция умножителя:

1, 3 — конденсаторы КВИ-3; 2 — электростатический экран; 4 — диоды КЦ106Г; 5 — высоковольтный трансформатор.

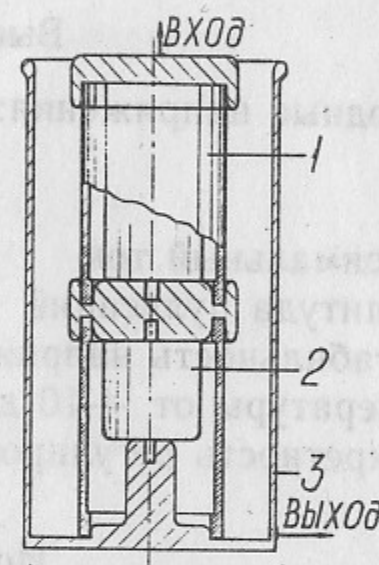


Рис. 12. Конструкция делителя:

1 — резисторы С5-23 (2 шт.); 2 — конденсаторы К15-4 (2 шт.); 3 — стакан. В ламповых каналах вместо конденсаторов (3) установлены изоляторы.

Общая мощность, рассеиваемая регулируемыми лампами, достигает 70 Вт. Поэтому высоковольтные делители размещены в отдельном баке, во избежание их нагрева. Конструкция одного делителя представлена на рис. 12. Два прецизионных резистора С5-23 (1) установлены в металлическом стакане (3), который соединен с низковольтным концом делителя. Таким образом, образующаяся распределенная емкость между резисторами и стаканом оказывается присоединенной к выходу делителя, а не к «земле», и АЧХ делителя имеет подъем на частотах выше 50 Гц (рис. 3). В транзисторном канале параллельно резисторам внутри них уста-

новлены два последовательно соединенных конденсатора К15-4 (2), которые компенсируют АЧХ делителя.

Высоковольтные соединения выпрямительного блока с делителями и ионным источником выполнены кабелем ЗКВР-75. Для вводов кабеля были разработаны герметичные разъемы, рассчитанные на избыточное давление несколько атмосфер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная система питания ЭГД-источника ионов имеет следующие технические параметры:

Высоковольтные источники:

Выходные напряжения: 1 канал	+7 кВ — +40 кВ,
2 канал	+100 В — +35 кВ,
3 канал	-2 кВ — -40 кВ,
Максимальный ток	700 мкА,
Амплитуда пульсаций	500 мВ,
Нестабильность напряжений при изменении температуры от +10 до +50°C	3 В,
Дискретность регулирования	4 В.

Источник питания накала:

Максимальное выходное напряжение	15 В,
Максимальный выходной ток	15 А,
Число градаций регулирования мощности	100.

Система питания эксплуатируется совместно с ЭГД-источником в течение пяти месяцев. При этом были получены ионные пучки с плотностью тока 1 А/см^2 при диаметре пучка 0.1 мкм . Система питания продемонстрировала хорошую защищенность от пробоев высокого напряжения.

Устройство управления позволяет включать источники питания отдельно. Имеется индикация отклонения выходных напряжений от установленных на переключателях.

При моделировании источников питания, расчете АЧХ и ФЧХ стабилизаторов использовалась программа «NELI» на ЭВМ «Од-ренок». Ее создателю А.В. Смирнову авторы выражают признательность за помощь, оказанную при работе с программой.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.Г. Дудникову и А.Л. Шабалину за постановку задачи и полезные обсуждения в ходе работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудников В.Г., Шабалин А.Л. Электрогидродинамические источники ионных пучков. Препринт ИЯФ СО АН СССР 87-63. Новосибирск, 1987.
2. Дудников В.Г., Шабалин А.Л. Электрогидродинамический источник ионов. ПТЭ, 1986, № 5, С.149—152.
3. Боровиков В.М. А.с.1220090. СССР.

В.С. Белкин, Д.В. Ковалевский

**Система питания
электрогидродинамического источника ионов**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 19 октября 1988 г.
Подписано в печать 15.11.1988 г. МН 08583
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,4 печ.л., 1,1 уч.-изд.л.
Тираж 220 экз. Бесплатно. Заказ № 151
