



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Ю.А.Блюмкина, Б.Н.Бунин, Л.А.Камаева, В.Ф.Мамонтов, В.Л.Череватенко

1465

**ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА
УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ
ИМПУЛЬСНОГО БЫСТРОГО РЕАКТОРА**

Дубна 1963.

Ю.А. Блюмкина, Б.Н. Букин, Л.А. Камаева, В.Ф. Мамонтов, В.Л. Череватенко

1485

ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА
УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ
ИМПУЛЬСНОГО БЫСТРОГО РЕАКТОРА

Дубна 1983

В в е д е н и е

Импульсный реактор на быстрых нейтронах (ИБР) рассчитан в основном на работу в режиме периодических импульсов. Номинальная средняя мощность реактора 1 квт. Полуширина импульсов мощности при этом составляет 38 мксек, частота их повторения может изменяться от ~8 до ~80 им/сек^{1/1}.

Электронная аппаратура, описываемая в данной статье, входит в систему управления и защиты реактора ИБР. Эта система обеспечивает изменение реактивности при пуске, работе и остановке (в том числе и аварийной) реактора, контроль уровня мощности во всех режимах работы и автоматическое поддержание мощности реактора при работе его на мощностях выше 5 вт.

Импульсный реактор по мере его пуска проходит несколько режимов работы от квазистационарности (глубокая подкритичность на мгновенных нейтронах) до импульсной критичности^{1/1}. Импульсной критичности соответствует вполне определенное максимальное значение надкритичности реактора ϵ_0 по мгновенным нейтронам, при котором имеет место равновесие с запаздывающими нейтронами. Этому равновесному режиму соответствует постоянная средняя мощность. В случае если максимальная надкритичность системы (ϵ_m) превысит значение ϵ_0 , амплитуда импульсов и соответствующая ей средняя мощность растут, если же $\epsilon_m < \epsilon_0$, средняя мощность падает. Поведение средней мощности во времени при изменении реактивности такое же, как и в случае обычного реактора. Отличительной чертой в поведении импульсного реактора в этом режиме является лишь то, что значение эффективной доли запаздывающих нейтронов очень мало и составляет $\sim 10^{-4}$ (т.е. ~ в 100 раз меньше, чем для обычного реактора с урановым горючим). Это обстоятельство, естественно, вызывает особенно высокие требования к прецизионности органов регулирования, к надежности и быстродействию всей системы защиты реактора.

Основной особенностью реактора ИБР является импульсный характер его работы. Это сразу же определило выбор импульсной электронной аппаратуры для системы управления и защиты реактора, тем более, что импульсные системы, как известно, обладают высокой стабильностью; с их помощью можно осуществить измерение весьма малых нейтронных потоков с высокой точностью и добиться нечувствительности аппаратуры к γ -излучению, что важно при пуске реактора после длительной работы его на больших мощностях.

Блок - схема электронной аппаратуры

Блок-схема электронной аппаратуры системы управления и защиты импульсного реактора приведена на рис. 1. В электронной аппаратуре, в соответствии с назначением, могут быть выделены 4 основные группы: пусковая, аварийной защиты, регулирования мощности и вспомогательная. Необходимо отметить, что управление реактором и контроль за его работой осуществляется с пульта управления, находящегося на расстоянии 250 м от здания, в котором расположен реактор. В зале реактора находятся только датчики электронной аппаратуры и входные каскады к ним.

Как видно из рис. 1, пусковая аппаратура и аппаратура аварийной защиты содержат каждая по два совершенно идентичных канала, дублирующих работу друг друга. Это вызвано требованием надежного контроля за работой реактора как при пуске, так и во время его эксплуатации. Аппаратура аварийной защиты и регулирования мощности - основная рабочая аппаратура - охвачены системой контроля исправности. При возникновении контролируемых неисправностей в схему предупредительной сигнализации подается сигнал. В случае одновременного появления неисправности в 2-х любых каналах аппаратуры происходит срабатывание аварийной защиты.

Пусковая аппаратура

Принципиальная схема одного из каналов пусковой аппаратуры представлена на рис. 2. Детекторами нейтронов здесь служат пропорциональные ВР, -счетчики (типа СММ-5), окруженные парафином. Входной каскад - двойной катодный повторитель - работает на согласованный кабель и имеет коэффициент передачи - 0,4 с учетом потерь на кабеле и сопротивлении на передающем конце (ВКП, рис. 1, лампа Л₁, рис. 2). Дальнейшие преобразования импульсов от датчика происходят в блоке основного усилителя (ПОУ, рис. 1). Частотные характеристики и соответствующие коэффициенты усиления усилителя этого блока могут быть изменены, т.е. фактически в одном блоке смонтированы два усилителя, имеющие общие узлы. Необходимость создания в пусковых каналах двух разных усилителей объясняется следующим.

В начальный период пуска реактора (до мощностей ~ 10 мв) частота появления нейтронов в импульсе мощности относительно невелика, так что датчик может еще разрешить импульсы от отдельных нейтронов. Для того, чтобы обеспечить их регистрацию, и служит первый, широкополосный усилитель. Он имеет максимальный коэффициент усиления ~ $2 \cdot 10^5$, время нарастания выходных импульсов ~ 0,15 мксек, а время спада ~ 0,4 мксек (рис. 2, лампы Л₂-Л₁₂). Основным звеном усилителя является трехламповая секция, охваченная отрицательной обратной связью^{2,3/}. Всего

в усилителе три таких секции. Коэффициент усиления его можно изменить в 32 раза (перепайкой) ступенями в два раза с помощью делителя D_1 . Усиленные импульсы длительностью $\sim 0,5$ мксек, имеющие амплитуду до 100 в, после дискриминации (лампы $L_{13}-L_{15}$) и формирования (лампа L_{17}) подаются на стандартную пересчетную схему и измеритель скорости счета (выходы Φ_1 и Φ_2). Мертвое время дискриминатора и формирователя в отдельности не превышает $\sim 0,7$ мксек. Необходимо отметить, что на формирователь пропускаются только те импульсы, которые совпадают во времени с импульсами, подаваемыми на третью сетку L_{15} . Эти импульсы, открывающие временные ворота, в свою очередь, синхронизованы с вращением основного подвижного диска реактора (см. вспомогательную аппаратуру). Такая схема обеспечивает регистрацию нейтронов лишь во время прохождения основного вкладыша через неподвижную зону реактора, что приводит к большой чувствительности регистрирующей аппаратуры к умножению нейтронов в импульсе. В процессе пуска реактора до мощностей \sim десяти мвт Θ - полуширина импульса мощности изменяется от ~ 500 до ~ 50 мксек, эффективная же полуширина импульса с учетом времени жизни в парафиновом замедлителе счетчиков BF_3 - от ~ 500 до ~ 100 мксек. Длительность отпирывающего сигнала близка к 300 мксек.

Измеритель скорости счета выполнен в отдельном блоке, снабжен стрелочным прибором и выходом на самопишущий потенциометр ЭПП-09. В этом же блоке имеется устройство, сигнализирующее превышение заданной скорости счета (аварийный триггер). В случае использования пусковых каналов для контроля сборки активной зоны реактора контактная система аварийных триггеров вводится в схему аварийной защиты.

При больших мощностях реактора (10 мвт - 1 вт), когда последний переходит из области импульсной подкритичности в область импульсной критичности, число нейтронов в импульсе мощности резко возрастает. При этом разрешающее время датчика импульсов, да и всего широкополосного тракта пусковой аппаратуры, уже не позволяет регистрировать импульсы от отдельных нейтронов. В этот, второй, период пуска реактора используется узкополосный режим усилителя пускового канала, позволяющий проинтегрировать импульсы от отдельных нейтронов и получить на выходе усилителя импульс, амплитуда которого пропорциональна энергии в импульсе мощности реактора. В этот период пуска реактора полуширина импульса на входе усилителя изменяется незначительно^{1/1}. Поэтому при выбранной величине постоянной времени, определяющей верхнюю границу частотной характеристики ($\tau_s = 100$ мксек), пропорциональность амплитуды импульса на выходе усилителя и энергии в импульсе мощности реактора выполняется с точностью $\sim 5\%$.

Узкополосный усилитель состоит из двух секций, которые одновременно являются второй и третьей секциями широкополосного усилителя (рис. 2). Все операции по

включению осуществляются с помощью переключателя Π_1 . Во избежание ложных срабатываний аварийной защиты при его работе на время переключения предусмотрена блокировка выхода усилителя и отключение аварийного триггера. Коэффициент усиления этого усилителя составляет 18000 и может изменяться в 3000 раз ступенями в 3,16 раза с помощью переключателя Π_2 . Амплитуда выходных импульсов усилителя в этом режиме измеряется с помощью интегрирующей схемы (другой режим работы измерителя скорости счета). Кроме того, эти импульсы могут наблюдаться на экране осциллографа (см. блок осциллографов).

Схема аварийной защиты реактора (схема АЗ) управляется аварийным триггером (L_{19} , L_{20} , рис. 2), срабатывающим при подаче на него импульсов с выхода усилителя, амплитуда которых превосходит заранее заданную величину. Порог срабатывания триггера может регулироваться в диапазоне от 15 до 100 в (потенциометр 22 ком). При срабатывании триггера контакты реле РСМ в анодах ламп L_{19} и L_{20} размыкаются, удерживающие электромагниты в схеме АЗ, непосредственно питающиеся через эти контакты, обесточиваются, аварийные стержни под действием пружины с большим ускорением ($\sim 20 g$) выбрасываются из реактора. Выбор реле РСМ продиктован требованием минимально возможного времени срабатывания аварийной защиты (время отлипания контактов реле РСМ - 1,5-2 мсек).

Аппаратура аварийной защиты

Аварийная защита ИБР в рабочем диапазоне мощностей реактора (1 вт-1 квт) обеспечивается группой аппаратуры аварийной защиты (каналы АЗ, рис. 1). Импульсный реактор при этом находится в состоянии импульсной критичности, полуширина импульсов мощности не зависит от мощности и равна $\theta = 36 \text{ мксек}^{1/2}$. Поэтому работа этой группы аппаратуры основана на полной пропорциональности амплитуды импульсов мощности реактора его средней мощности. Принципиальная схема одного из каналов аварийной защиты представлена на рис. 3.

Датчиками нейтронов в аварийных каналах служат импульсно-токовые ионизационные камеры, наполненные метаном. Амплитуда импульсов на выходе этих камер пропорциональна амплитуде импульсов мощности реактора. Входной каскад - двойной катодный повторитель (ВК, рис. 1, L_1 , рис. 3) работает на согласованный кабель и имеет коэффициент передачи с учетом потерь на кабеле $\sim 0,7$. При этом он обеспечивает линейную передачу необходимого динамического диапазона амплитуд импульсов (до ~ 10 в) с точностью не хуже 1%.

Усиление этих импульсов происходит в блоке основного усилителя (ОУ, рис. 1).

Усилитель этого блока (L_2-L_8) обеспечивает неискаженную передачу импульсов мощности реактора. Максимальный коэффициент усиления - 28000. В схеме предусмотрено изменение этого коэффициента в 3000 раз ступенями в $\sim 2,16$ раза и плавно в пределах ступенчатой регулировки. Основное звено усилителя - также трехламповая секция. Во избежание ложных срабатываний аварийной защиты при переключениях в усилителе предусмотрена блокировка выхода. Схема аварийной защиты управляется триггером (L_9, L_{10}), аналогичным таковому в пусковых каналах.

Аварийные каналы электронной аппаратуры охвачены системой контроля исправности, отдельной для каждого канала. В эту систему, кроме реле питающих напряжений и токов, входит схема контроля исправности по нижнему уровню. Задача этой схемы - подать предупредительный сигнал, если амплитуда импульсов на выходе усилителя упадет ниже заданного уровня. Эта схема состоит из интегрирующего звена ($R, C=6$ сек) и триггера постоянного тока с двумя устойчивыми состояниями "нижнего" триггера (L_{14}). До выхода реактора на заданную мощность рабочее состояние этого триггера поддерживается нажатием кнопки K_2 . При работе реактора на мощностях, больших порога срабатывания "нижнего" триггера, эта блокировка снимается. Использование подобной схемы позволяет исключить неконтролируемый выход из строя электронной аппаратуры.

Аппаратура регулирования мощности

Автоматическое поддержание мощности ИБР и контроль за ее уровнем в диапазоне мощностей 5 вт - 1 квт обеспечивается аппаратурой регулирования мощности (канал АР, рис. 1). Детектор нейтронов, входной каскад и основной усилитель этого канала совершенно аналогичны таковым в канале АЗ и выполняют те же самые функции. Усиленный импульс ионизационного тока подается на вход преобразователя импульсов (ПИ, рис. 1), который служит для получения напряжения, величина которого пропорциональна амплитуде импульса мощности реактора. Принцип работы преобразователя импульсов заключается в следующем. Импульс, поступающий на вход преобразователя, заряжает емкость до напряжения, пропорционального его амплитуде. При поступлении следующего импульса сначала происходит быстрый разряд этой емкости, а затем заряд ее до напряжения, пропорционального амплитуде вновь пришедшего импульса. Таким образом происходит запоминание на емкости напряжения, соответствующего каждой амплитуде импульса. Преимущество подобного принципа преобразования импульсного напряжения перед обычно используемым заключается в его практической безынерционности. Это обстоятельство имеет большое значение, поскольку основная рабочая частота импульсного реактора - 8 гц, и использование обычного интегрирования

привело бы к недопустимому увеличению постоянной времени тракта регулирования. Принципиальная схема преобразователя импульсов и схема сравнения приведены на рис. 4.

Заданная точность регулирования среднего уровня мощности реактора ~ 1% и основная рабочая частота ИБР ~ 8 гц определили точность поддержания напряжения на выходе преобразователя импульсов в промежутке между импульсами ~ 0,1%, а, следовательно, и постоянную времени цепочки памяти ($R_1 C_1 = 100$ сек). Для того, чтобы избежать применения мощных ламп в преобразователе для заряда емкости $C_1 = 0,05$ мкф входными импульсами с амплитудой до ~ 100 в, используется промежуточный удлинитель на лампах L_1 и L_2 $^{1/4, 5'}$. Интегрирующая цепочка $R_2 C_2 = 1$ мсек практически устраняет кратковременные отрицательные импульсы, возникшие в результате разряда C_1 .

Импульсный характер работы реактора создает определенную специфику в работе тракта автоматического регулирования ИБР. Дело в том, что статистический характер размножения нейтронов сильнее сказывается на работе импульсного реактора, чем на работе обычных реакторов. Это приводит к появлению значительных флюктуаций амплитуды импульсов мощности $^{1/}$. Для равновесного режима $^{1/}$:

$$\frac{\sigma(\bar{I})}{\bar{I}} = \frac{1}{\sqrt{2W\beta\tau}} \quad (1)$$

где $\sigma(\bar{I})$ - среднеквадратичный разброс амплитуд импульсов, \bar{I} - амплитуда импульсов мощности, W - средняя мощность, β - эффективная доля запаздывающих нейтронов, τ - среднее время жизни нейтронов в реакторе. При небольших мощностях флюктуации амплитуды импульсов мощности значительны, что препятствует нормальной работе автоматического регулятора. В силу этого диапазон рабочих мощностей реактора, при котором осуществляется автоматическое регулирование, ограничен снизу мощностью 5-10 вт. Изменение уровня мощности реактора осуществляется путем изменения коэффициента усиления усилителя канала автоматического регулирования мощности.

В режиме автоматического поддержания уровня мощности напряжение с выхода преобразователя подается через K_1 (рис. 4) на схему автоматического регулятора обычного типа: схема сравнения (рис. 4) - усилитель мощности (рис. 5) - амплитудно-сервопривод.

Визуальный контроль за уровнем мощности как при автоматическом, так и при ручном регулировании производится с помощью прибора М-24, присоединенного к выходу преобразователя импульсов. Предусмотрена также запись уровня мощности на левую ЭПП-09. Оба прибора градуированы в единицах средней мощности. Способы градуи-

ровки описаны в работе ^{11/}. Кроме того, усиленный импульс от датчика канала АР наблюдается на осциллографе этого канала.

Аппаратура регулирования мощности предусматривает возможность управления бустером реактивности при работе реактора в режиме одиночных импульсов. Для получения мощного одиночного импульса в реактор, работающий в режиме периодических импульсов (при низкой средней мощности), за время, меньше промежутка времени между двумя импульсами, нужно ввести дополнительную положительную реактивность 10^{-4} . Естественно поэтому, что в режиме одиночных импульсов удобно использовать малые рабочие частоты реактора (8 гц). Управление срабатыванием бустера реактивности осуществляется схемой триггера в блоке основного усилителя канала АР (L_9 , L_{10} , рис. 3). Контакты реле P_4 и P_5 этого триггера заведены в схему управления бустером. Режим одиночных импульсов осуществляется следующим образом. Порог срабатывания триггера устанавливается соответствующим некоторой средней мощности реактора W_0 при работе его в режиме периодических импульсов. Порог срабатывания триггеров в каналах аварийной защиты при этом устанавливается несколько выше, таким образом, чтобы флуктуации амплитуды импульсов мощности не могли привести к случайному сбросу аварийной защиты. После этого реактор выводится на мощность W_0 , бустер реактивности сбрасывается в реактор одним из импульсов мощности, следующий импульс мощности, амплитуда которого на несколько порядков выше амплитуды предыдущего импульса, опрокидывает аварийный триггер, и аварийные стержни выбрасываются из реактора. Следующий импульс уже не появляется.

Вспомогательная аппаратура

Наряду с основной аппаратурой система содержит ряд вспомогательных блоков. Сюда относятся канал контрольных импульсов и блок осциллографов (рис. 1),

В канале контрольных импульсов генерируются импульсы различной длительности, сфазированные определенным образом с вращением основного подвижного диска реактора. Фазировка осуществляется с помощью магнитных датчиков. Импульсы с выходов блока контрольных импульсов используются для открывания временных ворот в пусковой аппаратуре, в качестве стартовых для временных анализаторов и для запуска ждущей развертки в блоке осциллографов.

Блок осциллографов предназначен для наблюдения импульсов на выходе усилителей электронной аппаратуры. Этот блок обеспечивает работу 3-х осциллографических трубок, на экране одной из которых наблюдаются импульсы от любого из пусковых каналов, а двух других - от каналов АР и любого из каналов АЗ. Длительность развертки может быть установлена в 80 и 600 мксек, соответственно длительности наблюдаемых импульсов.

Электронная аппаратура системы управления и защиты импульсного реактора проходила перед установкой на рабочее место комплексные испытания при непрерывной круглосуточной работе в течение недели с генераторами импульсов, имитирующими соответствующие датчики (точность поддержания амплитуды импульсов этих генераторов 1%). В процессе испытаний контролировалась стабильность работы всех узлов аппаратуры (в том числе и при колебаниях температуры от 10 до 30°C). Результаты испытаний показали, что достигнутая стабильность основных групп аппаратуры лежит в пределах точности поддержания амплитуды импульсов задающих генераторов.

Скорость срабатывания аварийной защиты реактора проверялась на первом этапе исследований его - на стендовой сборке с неподвижным основным вкладышем. В остальном эта сборка полностью имитировала активную зону реактора. Испытания показали, что промежуток времени от появления сигнала на сброс аварийного триггера до полного отлппания стержней аварийной защиты от удерживающих их электромагнитов ("холостой ход" системы аварийного сброса) составляет ~12 мсек, а весь процесс вывода из реактора стержней аварийной защиты при появлении соответствующего сигнала от детектора нейтронов занимает ~50 мсек.

Система автоматического поддержания уровня мощности предварительно наладилась и испытывалась на электронной модели кинетики ИБР. Результаты испытаний показали, что: а) зона нечувствительности регулятора ~0,5%, б) время установления заданного уровня мощности при отклонении мощности от него на 5% и при частоте следования импульсов ~30 гц составляет ~0,4 сек, в) дрейф усилителей мощности, отнесенный ко входу, ~30 мв/сутки. На действующем реакторе система автоматического поддержания была сначала опробована при малых мощностях, а затем вплоть до мощностей 1,2 квт. Система полностью соответствует приведенным характеристикам и обеспечивает качественное регулирование - поддержание среднего уровня мощности не хуже 1%.

Импульсный реактор пущен в эксплуатацию в режиме периодических импульсов в июне 1980 г. С тех пор и по настоящее время электронная аппаратура работает в системе его управления и защиты без каких-либо изменений и полностью соответствует приведенным выше характеристикам. Опыта эксплуатации аппаратуры при работе импульсного реактора в режиме одиночных импульсов нет, так как реактор в этом режиме не использовался.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Д.И.Блохинцеву, А.И.Лейпунскому, О.Д.Казачковскому, И.М.Франку, Ф.Л.Шапиро за внимание и постоянный интерес к работе, Ю.Я.Ставицкому - за ряд ценных советов и участие в обсуждении работы.

Авторы благодарны В.В.Ермакову за участие в конструировании и изготовлении аппаратуры.

Л и т е р а т у р а

1. Г.Е.Блохин и др. "Атомная энергия", 10, вып. 5, 437 (1961).
2. W.H.Jordan, P.R.Bell. Rev. Sci. Instr., 18, 706 (1947).
3. А.А.Санин, Электронные приборы ядерной физики, Физматгиз, 1961, стр. 116-128.
4. А.А.Санин, Там же, стр. 488-502.
5. E.Gatti, Il Nuovo Cimento, 11, 153 (1954).

Рукопись поступила в издательский отдел
20 ноября 1963 г.

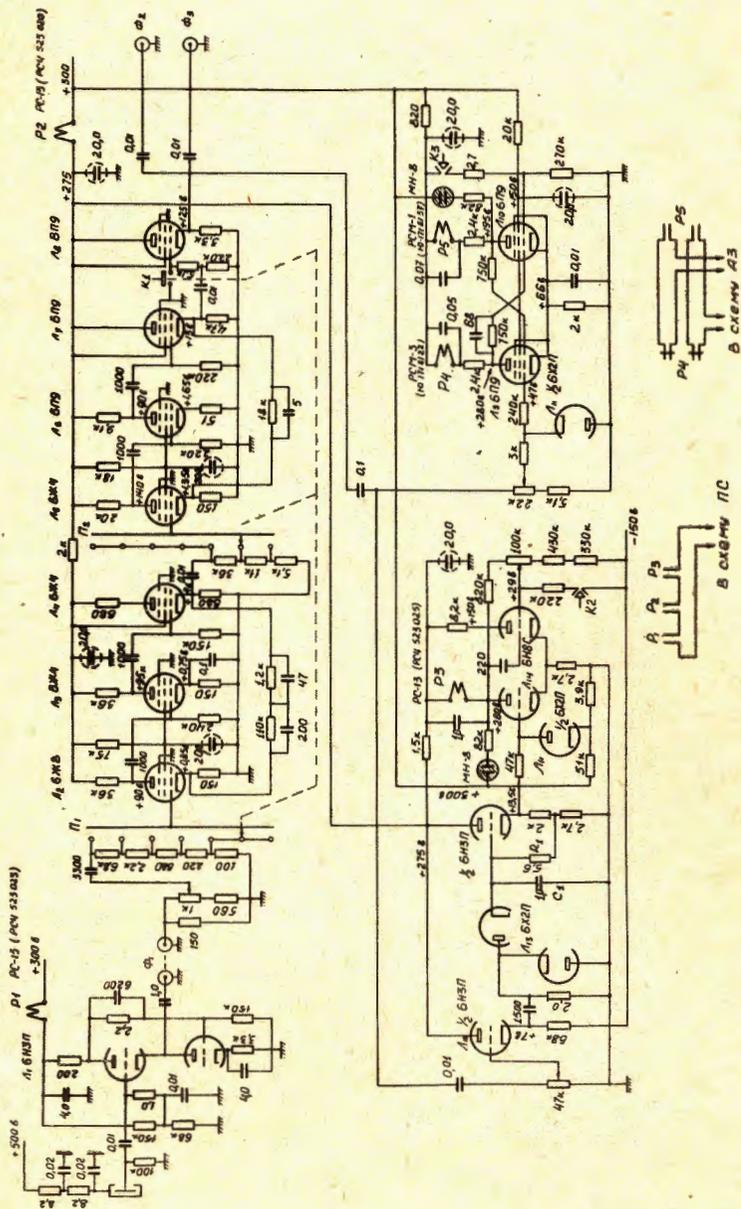


Рис. 3. Принципиальная схема входного каскада и блока основного усилителя каналов АР и АЗ.

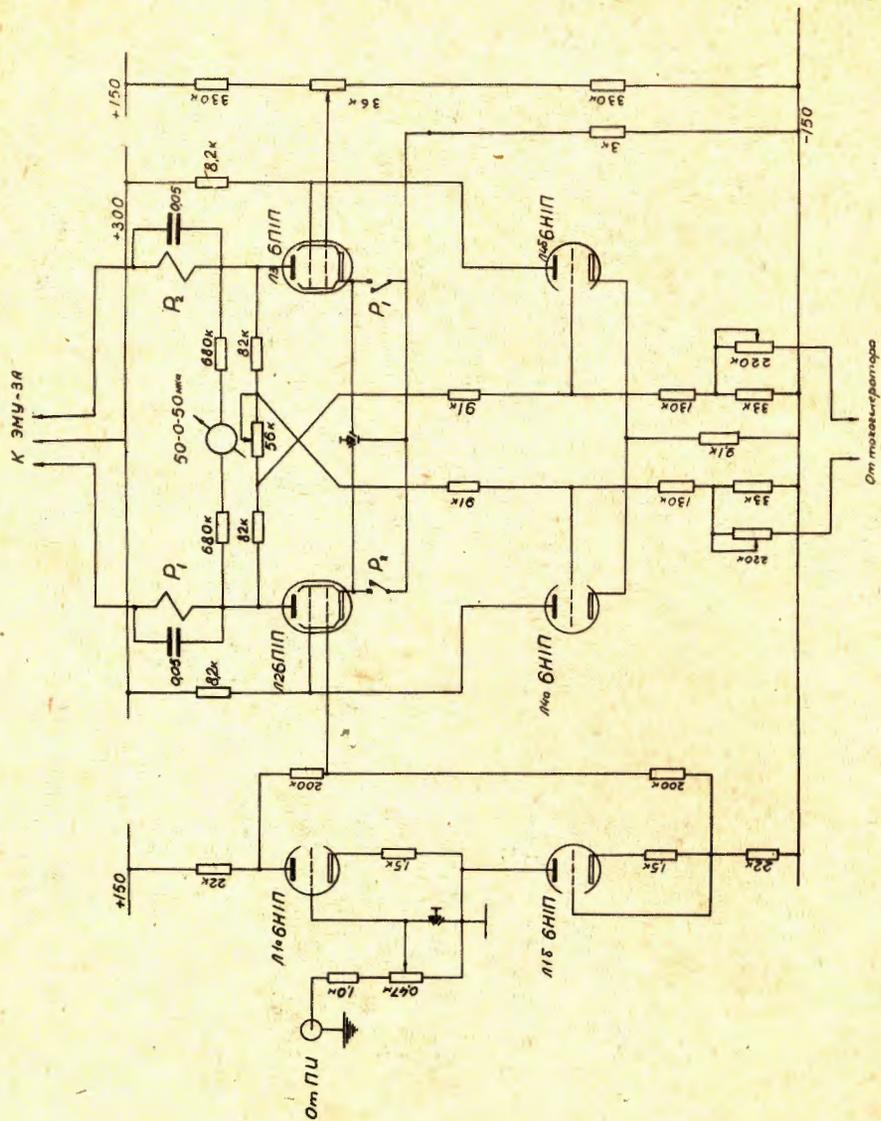


Рис. 5. Принципиальная схема усилителя мощности.