

Г.32

27

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ. АН СССР

173

М.Ю.Гельцель, В.С.Панасюк

**Возбуждение магнитного поля в
синхротроне с одновитковой обмоткой
электромагнита и внешней
однооборотной инжекцией.**

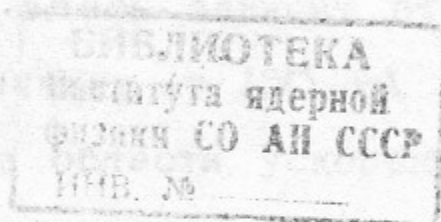
г.Новосибирск 1967

М.Ю.Гельцель, В.С.Панасюк

ВОЗБУЖДЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СИНХРОТРОНЕ С
ОДНОВИТКОВОЙ ОБМОТКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТА И ВНЕШ-
НЕЙ ОДНОБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

А Н Н О Т А Ц И Я

Приводится описание генераторов однополярных импульсов тока для возбуждения квазипостоянного магнитного поля при инжекции и ведущего магнитного поля при ускорении в синхротроне с внешней однооборотной инжекцией. Рассматривается взаимодействие этих генераторов при работе на общую нагрузку. Приведены особенности конструкции импульсного силовоточного вентиля с твердым холодным катодом, принцип действия которого основан на физических процессах, аналогичных происходящим в вакуумных выключателях. Вентили такого типа используются в генераторе ведущего магнитного поля синхротрона.



ВВЕДЕНИЕ

В импульсных синхротронах с внешней однооборотной инжекцией на энергию электронов до 450 Мэв, разработанных в Институте ядерной физики СО АН СССР, используются одновитковые электромагниты типа рейстрек /1,2/. Магнитное поле в них возбуждается встречными токами, проходящими через две шины специальной формы.

Система питания электромагнита должна обеспечивать ток в шинах, необходимый для создания напряженности магнитного поля заданной амплитуды, изменяющейся по строго определенному закону во времени. Форма импульса тока изображена на рис.1 и состоит из трех участков. Участок I имеет амплитуду, необходимую для возбуждения магнитного поля с напряженностью, соответствующей энергии инжектируемых частиц при заданном радиусе ускорителя. Участок II является переходным и должен обеспечивать минимальные потери частиц при переходе из бетатронного режима (участок I) в синхротронный (участок III). На участке III происходит ускорение электронов до конечной энергии и выпуск их из ускорителя. Амплитуда тока здесь зависит от конечной энергии частиц и составляет величину ~ 150 кА при энергии 450 Мэв.

Магнитное поле в области ускорения формируется под воздействием поверхностей медных шин и железного магнитопровода. Это обстоятельство налагает определенные требования на скорость изменения магнитного поля во времени. Время нарастания магнитного поля составляет 500+1000 мксек

и поэтому длительность однополярного импульса тока равна соответственно от 1 до 2 мсек. На рис. 2 изображена блок-схема системы питания электромагнита синхротрона.

Блок 1 представляет зарядное устройство, компенсирующее потери энергии в колебательном контуре с ёмкостью C и нагрузкой L (индуктивность шин электромагнита). Блок 2 - коммутирующее устройство, позволяющее сохранять одну и ту же полярность импульса в нагрузке при перезарядке ёмкости колебательного контура в течение времени ускорения. Блок 1 и блок 2 вместе представляют собой генератор однополярных импульсов основного магнитного поля ускорителя, создающий участок II, III кривой, изображенной на рис. 1. Блок 3 является генератором квазипостоянного импульсного поля инжекции, создающего участок 1 той же кривой. Блок 4 - система синхронизации, обеспечивающая генерацию пусковых импульсов и необходимую последовательность работы всех блоков питания. Ниже описаны генераторы, формирующие импульсы тока для возбуждения магнитного поля инжекции и ведущего поля при ускорении, а также рассматривается взаимодействие этих генераторов при работе на общую нагрузку.

Генератор однополярных импульсов тока квазипостоянного магнитного поля инжекции

При формировании импульса тока квазипостоянного магнитного поля инжекции необходимо выполнить условия, вытекающие из специфики работы синхротрона с однооборотной инжек-

щей: стабильность напряженности магнитного поля порядка $5 \cdot 10^4$ и наличие участка магнитного поля с крутизной изменения, близкой к нулю.

Не останавливаясь на методах получения необходимой стабильности, которая осуществляется параметрической стабилизацией и стабилизацией соответствующих напряжений, рассмотрим наиболее простой способ формирования импульса тока квазипостоянного магнитного поля инжекции.

Однополярный косинусоидальный импульс стабильной амплитуды, у которого для инжекции используется вершина импульса в момент минимальной крутизны удовлетворяет всем условиям для поля инжекции. Однако использование квазипрямоугольной формы импульса вместо косинусоидальной дает ряд преимуществ, обеспечивая лучшие условия для получения максимального коэффициента синхротронного захвата. Наиболее простым способом уплощения вершины импульса является наложение на косинусоидальный импульс одной из высших его гармонических составляющих. Очевидно, длительность плоской части импульса, магнитного поля инжекции желательно иметь как можно больше. Но конструкция электромагнита в рассматриваемом типе ускорителя налагает определенные требования на величину скин-слоя для тока, проходящего через шины, и, следовательно, на скорость изменения магнитного поля

во времени. Поэтому увеличение длительности плоской части импульса всегда требует дополнительных исследований. Для проверки расчетов допустимых искажений магнитного поля при формировании импульса квазипостоянного магнитного поля ин-жекции были сделаны соответствующие измерения коэф. спада поля на модели сектора ускорителя в натуральную величину. Коэффициент спада измерялся при синусоидальной и квазипрямоугольной форме импульса. В обоих случаях отклонение его не превышало $\pm 0,4\%$ от номинала ($n = 0,6$).

Система питания электромагнита в период инжекции представляет собой генератор однополярных импульсов, блок-схема которого показана на рис.3. Основная частота импульса определяется контуром, состоящим из ёмкости C_1 и двух индуктивностей, из которых L_2 индуктивность шин магнита, а L_1 - дополнительная индуктивность, величина которой много больше L_2 . Индуктивности L_3 и L_2 , ёмкость C_2 образуют контур высшей гармонической составляющей. Напряжение на ёмкости поддерживается с заданной точностью с помощью системы быстрой обратной связи. Подзарядка ёмкости между импульсами осуществляется управляемым выпрямителем. Разряд ёмкости происходит с момента поступления управляющего импульса на вентиль 1, вентиль 2 служит для перезаряда конденсатора, а вентиль 3 для перехвата тока. Назначение последнего будет рассмотрено ниже.

Общие потери генератора импульсов тока магнитного поля инжекции складываются из потерь в индуктивностях L_1 , L_2 , в коммутирующих вентилях V_1 , V_2 и подводящих ши-

нах, а также из потерь, связанных с совместной работой с контуром генератора ведущего поля при ускорении. Как показывают расчеты и экспериментальные данные, последние составляют основную часть общих потерь. Поэтому рассмотрим взаимодействие контура генератора импульсов тока магнитного поля инжекции с контуром генератора импульсов тока ведущего поля. Для упрощения схемы воспользуемся случаем формирования магнитного поля инжекции только с помощью косинусоидального импульса основной частоты без высшей гармонической составляющей. Такое упрощение практически не сказывается на физических процессах взаимодействия двух генераторов. На рис. 4 изображена эквивалентная схема двух генераторов, работающих на общую нагрузку. Емкость C_1 (300 мкф) индуктивность L_1 (~ 800 мкГн) и вентиль V_1 относятся к генератору, квазипостоянного поля инжекции, L_2 - нагрузка (~ 10 мкГн) - индуктивность обмотки электромагнита. Большая разница в величинах индуктивностей L_1 и L_2 позволяет хорошо развязать два генератора друг от друга и улучшить параметрическую стабилизацию тока инжекции. Генератор ведущего поля состоит из большой конденсаторной батареи C_2 (~ 20000 мкф) и вентиля V_2 ¹⁾. Каждый генератор имеет разрядную цепь, представляющую собой колебательный резонансный контур с собственной частотой ~ 300 Гц. Связь между контурами осуществляется через нагрузку L_2 .

1) В действительности схема генератора ведущего магнитного поля более сложна и содержит большее число вентиля. Описание её дано в следующем разделе.

общую для обоих генераторов.

Инжекция частиц производится в момент времени, когда напряженность магнитного поля на орбите пучка и ускоряющее напряжение импульсного линейного ускорителя достигают такой величины, что равновесная орбита вводимых частиц находится посередине ускорительной камеры. Для магнитного поля инжекции этот момент, как уже указывалось ранее, находится вблизи максимума тока. При этом практически вся энергия контура инжекции запасена в индуктивности L_1 , а напряжение на конденсаторной батарее C_1 , близко к нулю. Генератор ведущего магнитного поля включается почти одновременно (t задер.

~ 20 мксек) с вводом частиц в камеру. При появлении напряжения на нагрузке начинается переход энергии из контура генератора тока инжекции в контур генератора тока ведущего поля. В отличие от свободного разряда конденсатора в системе связанных контуров, где осуществляется обмен энергией между обоими контурами, в описываемой системе с вентилями поступление энергии происходит только в одну сторону, а именно, от контура инжекции в контур ведущего поля. Вентиль V_1 при проходе током нулевого значения гаснет и энергия, переданная в контур ведущего поля не имеет возможности возвратиться в контур инжекции. Кривые тока в контуре инжекции и напряжения на конденсаторе C_1 , рассчитанные для различных случаев напряжения на конденсаторной батарее C_2 показаны на рис. 5а. Осциллограмма тока для одного из случаев дана на рис. 5б. Компенсация потерь в кон-

туре инжекции может быть осуществлена путем рекуперации энергии в соответствующий момент времени из контура ведущего поля (схема рис. 6а и 6б). Практическое выполнение этих схем затрудняется тем обстоятельством, что ток ведущего поля изменяется в зависимости от величины конечной энергии ускоренных частиц, а ток в контуре и, следовательно, напряжение на ёмкости C_1 , остается неизменным. Отсюда величина рекуперированной энергии должна изменяться при всяком изменении тока в контуре ведущего поля. Лучшим решением является полная развязка контуров путем перехвата тока в контуре инжекции вентилем B_3 , который поджигается одновременно с вентилем B_2 (рис. 4).

В случае использования этой схемы перезаряд ёмкости в контуре инжекции происходит с потерями, в основном обусловленными только потерями внутри самого контура.

Перейдем к краткому рассмотрению вопроса о стабилизации тока инжекции. Требуемая стабильность тока в шинах электромагнита ($\sim 5 \cdot 10^{-4}$) может быть обеспечена при условии стабилизации напряжения на ёмкости контура C_1 лучше $5 \cdot 10^{-4}$ и стабильности параметров дополнительной индуктивности L_1 , $\sim 7 \cdot 10^{-4}$ (стабильность параметров нагрузки определена экспериментально и составляет $\sim 5 \cdot 10^{-3}$). Допустимая температура нагрева индуктивности L_1 , при которой изменение её параметров не выходит за пределы допустимого коэффициента стабильности $7 \cdot 10^{-4}$ составляет по расчетам не более 4° . Поэтому важную роль играет правильное конструирование L_1 и охлаждение её в процессе эксплуата-

ции. Температурная нестабильность конденсаторной батареи C_1 , набранной из конденсаторов типа ИМ 5/150 может быть уменьшена последовательно — параллельным соединением конденсаторов. Кроме индуктивностей и ёмкости контура на стабильность тока оказывает также влияние нестабильность импульсного напряжения на вентиле. В генераторах импульсного тока питающего магнит синхротрона, могут быть использованы в качестве коммутирующих приборов газоразрядные вентили с накаливаемым и холодным катодом. В генераторе поля инжекции в качестве коммутирующего элемента применяется игнитрон ИВС 500/5М, позволяющий получать в импульсном режиме ток до 5 кА. Более перспективными вентилями с точки зрения уменьшения импульсного падения напряжения при токах в несколько тысяч ампер в импульсе 1-2 мсек являются полупроводниковые управляемые вентили-тиристоры. При амплитуде тока 2 кА U_B составляет всего ~ 4 в, что много меньше падения напряжения в остальных вентилях.

При правильно выбранных параметрах и элементах контура, обеспечивается заданная величина тока в нем в течение длительного времени. Тогда стабильность тока от импульса к импульсу будет определяться стабильностью напряжения, до которого заряжается ёмкость контура. Как было сказано выше, стабильность тока в шинах электромагнита к моменту инжекции должна быть не хуже $5 \cdot 10^{-4}$. Следовательно стабильность напряжения на ёмкости должна быть лучше $5 \cdot 10^{-4}$. Блок-схема цепи обратной связи, стабилизирующей напряжение на ёмкости, дана на рис. 7.

При поступлении импульса запуска на тиратронный триггер последний отпирает управляемый выпрямитель и происходит подзарядка ёмкости контура C_1 до тех пор, пока напряжение на ней не достигнет заданной величины. При достижении напряжения, необходимого для обеспечения величины тока, соответствующей напряженности поля инжекции на выходе усилителя постоянного тока (УПТ) появляется напряжение, отпирающее схему ждущего блокинг-генератора (БГ). Первый импульс с БГ, поступающий на тиратронный триггер опрокидывает его и выпрямитель запирается. Одновременно начинает работать схема откачного генератора. Излишек напряжения на ёмкости снимается с помощью сбрасывающей ёмкости C_2 . Утечка тока с ёмкости C_1 компенсируется выпрямителем подпитки (выпрям. подп.).

Напряжение с ёмкости основного контура подается на вход УПТ через высокостабильный делитель типа КМС. Момент сравнения должен иметь нестабильность меньше заданной

, т.е. $5 \cdot 10^{-4}$ и

$$\frac{\Delta U_{\text{срав.}}}{U_{\text{опор.}}} \leq 5 \cdot 10^{-4}.$$

Анодное напряжение питания тиратронного триггера выбрано из условия надежного запирающего выпрямителя, собранного по схеме Ларионова на вентилях ТР 6/15. Так как момент запирающего выпрямителя после опрокидывания триггера и поступление отрицательного смещения на сетки тиратронов выпрямителя определяется только опорным напряжением на вентилях, то происходит зарядка ёмкости основного контура на величину $U + \Delta U$, где ΔU избыток напряжения, который в дальнейшем должен

быть доведен до необходимого уровня схемой "откачки". Отрезок времени, в течение которого создается избыток напряжения ΔU , колеблется от 0 до 10 мсек (при частоте промышленного тока 50 гц). Поэтому ΔU также колеблется от 7 до 8% U_c . Заряд, который нужно "откачать",

$\Delta q = (0,07 + 0,08) C, U$, а общее число импульсов откачки при заданной точности $5 \cdot 10^{-4}$ составит $\sim (140 \div 160)$. При максимально допустимой частоте работы водородных тиратронов ТГИ - 1325/16 равной 10^3 гц получим время, необходимое для стабилизации напряжения от 140 до 160 мсек. Учитывая еще постоянную времени зарядной цепи это время будет составлять ≥ 200 мсек и, следовательно, частота повторения разряда в контуре инжекции не должна превышать 5 гц. Для увеличения частоты повторения генератор "откачки" должен работать с частотой $> 10^3$ гц и, следовательно, вместо тиратрона должна использоваться лампа (например ГУ-80).

Генератор однополярных импульсов тока ведущего магнитного поля при ускорении

Генератор (рис.8) построен на основе колебательного контура, ёмкость и индуктивность которого соединены по схеме однофазного двухполупериодного выпрямления. / 3 /.
Использование этой схемы позволяет увеличить эффективность работы системы, так как все импульсы являются рабочими, не требуется перезарядных дросселей, лучше используются конден-

саторные батареи. В данной схеме все нечетные импульсы тока в нагрузку проходят через вентили В1-8 все четные - через вентили В9-16. Таким образом, на рабочей частоте 5 гц вентили фактически будут работать на частоте 2,5 гц. Эффективный ток через них будет меньше и, следовательно, срок службы больше. В промежутке времени между четными и нечетными импульсами происходит дозарядка конденсаторной батареи до требуемой величины напряжения от выпрямителя, полярность которого коммутируется вентилями ЗВ₁₋₄ синхронно с соответствующими импульсами разрядных цепей. В качестве таких вентилях могут быть использованы тиратроны ТР85/15 или управляемые вентили с твердым холодным катодом. При добротности разрядного контура $Q = 5$ частота повторения, при которой может быть обеспечена компенсация потерь, составляет 5 гц. При фиксированной длительности зарядки наибольший КПД имеет место при зарядке постоянным током. В этом случае напряжение конденсаторной батареи растет линейно. Постоянный ток обеспечивается неизменным перепадом напряжений между напряжением источника и накопителя. Скорость нарастания напряжения регулируется схемой управления путем изменения фазового угла отпирания управляемых вентилях (тиратронов). Плавное нарастание скорости изменения магнитного поля при переходе от инжекции к режиму ускорения (участок П кривой (рис.1) осуществляется с помощью насыщающихся дросселей ДН₁₋₈ включенных последовательно с э/магнитом. В описываемой схеме эти же дроссели обеспечивают параллельное включение 4 вентилях в каждой ветви.

Поскольку ток через дроссели каждый цикл меняет направление, использование железа дросселей улучшается, что уменьшает их габариты.

Для предотвращения колебательного разряда после окончания рабочего цикла и сохранения запасенной энергии в качестве коммутатора тока выгодно использовать газоразрядные вентили на большие токи, в которых разряд гаснет после первого полупериода синусоиды колебательного тока. Чтобы получить необходимую амплитуду тока, рабочее напряжение батареи конденсаторов должно составлять ~ 5 кв. Таким образом в схеме необходимы вентили, сочетающие высокую электрическую прочность со способностью коммутировать большие токи за относительно короткое время. Вентили с такими параметрами в лабораториях и промышленности отсутствуют. Поэтому большой интерес представляет использование в импульсных системах питания электромагнитов управляемых газоразрядных вентилях с твердым холодным катодом, разработанных в Институте ядерной физики СО АН СССР. Такие вентили позволяют коммутировать токи 30-40 кА при обратном напряжении 4-5 кв и длительности импульса миллисекунда и более.

Иллюстрационный разрез одной из конструкций управляемого вентиля с твердым холодным катодом показан на рис. 9²⁾

Принцип действия таких вен-

2) Разработана Подминогиным А.А., детали конструкции поясняются в подписях к рисунку.

тилей основан на давно известном принципе гашения дуги при проходе током нулевого значения и используется в вакуумных выключателях, находящих широкое применение в промышленности /4/. В отличие от вакуумных выключателей дуга в описываемых вентилях зажигается с помощью специального поджигающего устройства в любой требуемый момент времени. Дуга горит в разрядном промежутке, перемещаясь со скоростью, пропорциональной скорости нарастания тока или, иначе, скоростью поступления энергии из внешней цепи. Движение разряда происходит по направлению вводов тока, начинаясь в центральной части электродов - месте поджига. Скорость движения разряда при подходе к вводам вентиля резко падает и к концу цикла коммутации разряд начинает двигаться обратно, но гаснет, не успевая дойти до центральной части электродов вследствие резкого увеличения скорости рекомбинации частиц на стенках камеры и снижения проводимости дуги при спаде температуры и разрядного тока.

Использование короткой дуги ($\sim 5 \div 8$ мм) при начальном давлении $P_0 \leq 10^{-2}$ мм рт.ст. с искровым поджигом позволяет резко увеличивать прочность перед зажиганием дугового разряда (> 20 кв) и упростить эксплуатацию большого количества таких приборов, так как в них не требуется специального газового наполнения. Основная трудность, состоящая в защите поджигающего устройства от действия дугового разряда, может быть преодолена специальной конструкцией катода и поджигающего устройства. Одна из таких конструкций показана на рис.9. Поджигающее устройство в этом слу-

чае весьма простое и представляет собой диск с несколькими трубочками диаметром 3-4 мм., расположенных напротив отверстий в катоде, имеющих диаметр 4-5 мм. Зазор между трубочками и краями отверстий составляет 0,5 - 1 мм. В процессе работы происходит обработка краев отверстий и трубочек разрядом. Долговечность такого поджигающего устройства составляет $\sim 10^6$ импульсов. Фланец съемный и диск с трубочками может легко быть заменен при профилактике. Напряжение поджигающего импульса ~ 15 кв, длительность импульса ~ 2 мксек.

Таким образом, в вентиле с короткой дугой возможно осуществить сочетание сравнительно долговечного поджигающего устройства с высокой электрической прочностью. В случае сравнительно длинной дуги ($d \geq 20$ мм) в вентиле с водородным наполнением играют существенную роль нестационарные процессы, приводящие к обрывным колебаниям и возникновению перенапряжений на электродах вентиля. Изменение материала катода, добавление в водород более тяжелого газа, например аргона, хотя и уменьшают величину нестационарных процессов, но не решают этот вопрос до конца. Известно, что неустойчивость водородной дуги связана с её температурой, поэтому уменьшение последней увеличивает устойчивость дуги. В то же время уменьшение температуры дуги легко достигается уменьшением её длины. Использование короткой дуги таким образом облегчает задачу устранения нежелательных перенапряжений, вызванных обрывными колебаниями в дуге. Практически в короткой дуге не было обнаружено обрывов дуги в течение длительного времени.

Конструкция вентиля, изображенная на рис. 9, при наличии поджигающего устройства во втором электроде позволяет коммутировать токи в обоих направлениях с минимальной задержкой ~ 1 мсек. Эта возможность является отличительной чертой управляемых вентилях с твердым холодным катодом и однородным электрическим полем, поскольку направление тока в таких вентилях зависит только от относительной разности потенциалов между электродами. Таким образом, каждый электрод может выполнять как роль катода, так и роль анода и направление проводимости вентиля может изменяться путем перемены знака потенциала на электродах. Такая симметричная конструкция вентиля приобретет самостоятельное значение как коммутатор тока электромагнита в прямом и обратном направлениях, если синхротрон будет использован для поочередного ускорения электронов и позитронов в установках встречных электрон-позитронных пучков. В таблице 1 даны основные параметры вентилях с твердым холодным катодом в импульсном режиме. Для сравнения приведены параметры игнитронов, используемых в импульсном режиме. Малое время разброса в развитии разряда (~ 1 мсек) позволяет сравнительно просто осуществить параллельное соединение таких вентилях для получения больших импульсных токов. При использовании управляемых вентилях с твердым холодным катодом количество вентилях для создания тока 150 кА в схеме генератора сравнительно невелико.

Авторы выражают благодарность Подминогину А.А. за ценные предложения и совместные обсуждения результатов.

Генератор однополярных импульсов тока, выполненный по схеме (рис.8) и с приведенными здесь параметрами, испытан на эквивалент нагрузки э/магнита синхротрона.

Таблица

Параметр	Т и п в е н т и л я	
	Игнитроны ИВС 500/5 ИВП 500/5	Управляемые импульсные вентили с холодным катодом
Газ	Пары ртути	Водород, пары меди
Начальное давление (мм рт.ст.)	$10^{-5} - 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Расстояние между электродами (мм)	-	25
Предельный импульс- ный ток (кА)*	5,0 (номинал 1,5)	45/20
Электрическая проч- ность (кв)	5	15
Вентильная проч- ность (кв)	2,5	2,0/4,0
Максимальная ско- рость спада тока (а/сек)	$6 \cdot 10^6$ (номинал $2 \cdot 10^6$)	$3 \cdot 10^8 / 0,5 \cdot 10^8$
Скорость нараста- ния обратного на- пряжения (кв/мксек)	1,0	5/7
Частота тока (Гц)	300	1000/500
Тип поджига	Вспомогат. дуга	Искровой по ди- электрику
		Искровой в зазо- ре 0,5 + 1 мм

* См. графику "Вентильная прочность (кв)".

Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И. и др. Запуск синхротрона Б-3М - инжектора для позитрон-электронного накопителя. Атомная энергия, 3, 20 (1966).
2. Будкер Г.И. и др. Доклад, представленный на Международную конференцию по ускорителям, Фраскати, Италия (1965).
3. Кузнецов В.М., Кочегуров В.А., Чучалин И.П. Ионный переключатель для возбуждения электромагнита однополярными импульсами. Известия ТПИ т.122 (1962), 116.
4. Попов Н.А. Вакуумные выключатели, изд. Энергия (1965), М.

Подписи к рисункам

- Рис.1. Форма импульса тока в шинах э/магнита (масштаб не выдержан).
- Рис.2. Блок-схемы питания э/магнита синхротрона.
- Рис.3. Схема генератора однополярных импульсов тока квазипостоянного магнитного поля инжекции.
- Рис.4. Эквивалентная схема двух генераторов, работающих на общую нагрузку.
- Рис.5. а) Кривые тока в контуре и напряжения на ёмкости C_1 в зависимости от напряжения U_c на ёмкости C_2 :
- 1) при $U_c = 0$,
 - 2) при $U_c = 1$ кв,
 - 3) при $U_c = 2$ кв,
 - 4) при $U_c = 3$ кв.
- б) Осциллограмма тока в контуре при $U_c = 1,5$ кв и $U_c = 0$.
- Рис.6. Схемы рекуперации энергии из генератора ведущего поля в генератор поля инжекции.
- Рис.7. Блок-схема цепи обратной связи для стабилизации напряжения на ёмкости.
- Рис.8. Схема генератора однополярных импульсов тока ведущего магнитного поля.
- Рис.9. Иллюстрационный разрез конструкции управляемого вентиля с твердым холодным катодом.
- 1 - изолятор
 - 2 - основной электрод (анод)
 - 3 - основной электрод (катод)
 - 4 - поджигающий электрод

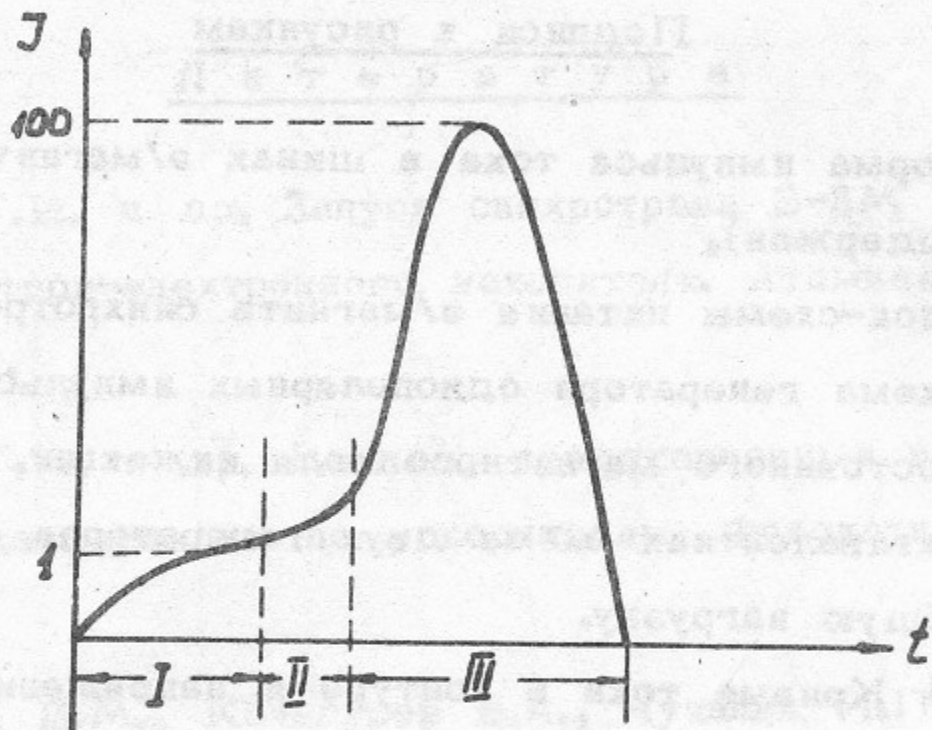


Рис. 1

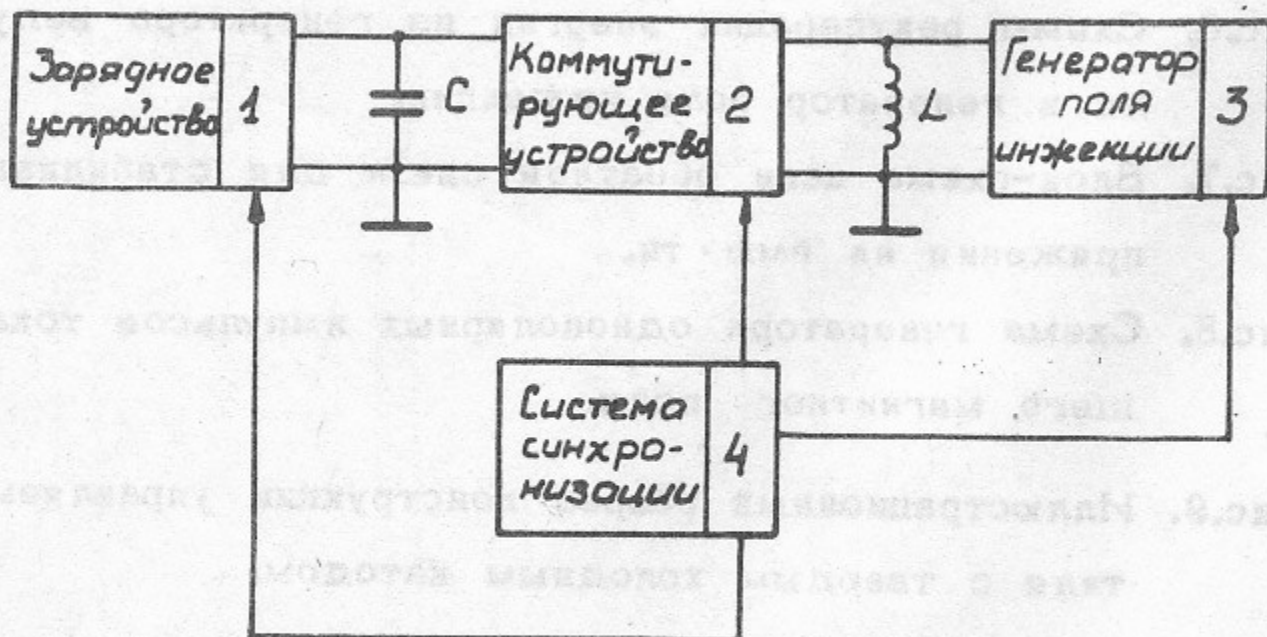


Рис. 2

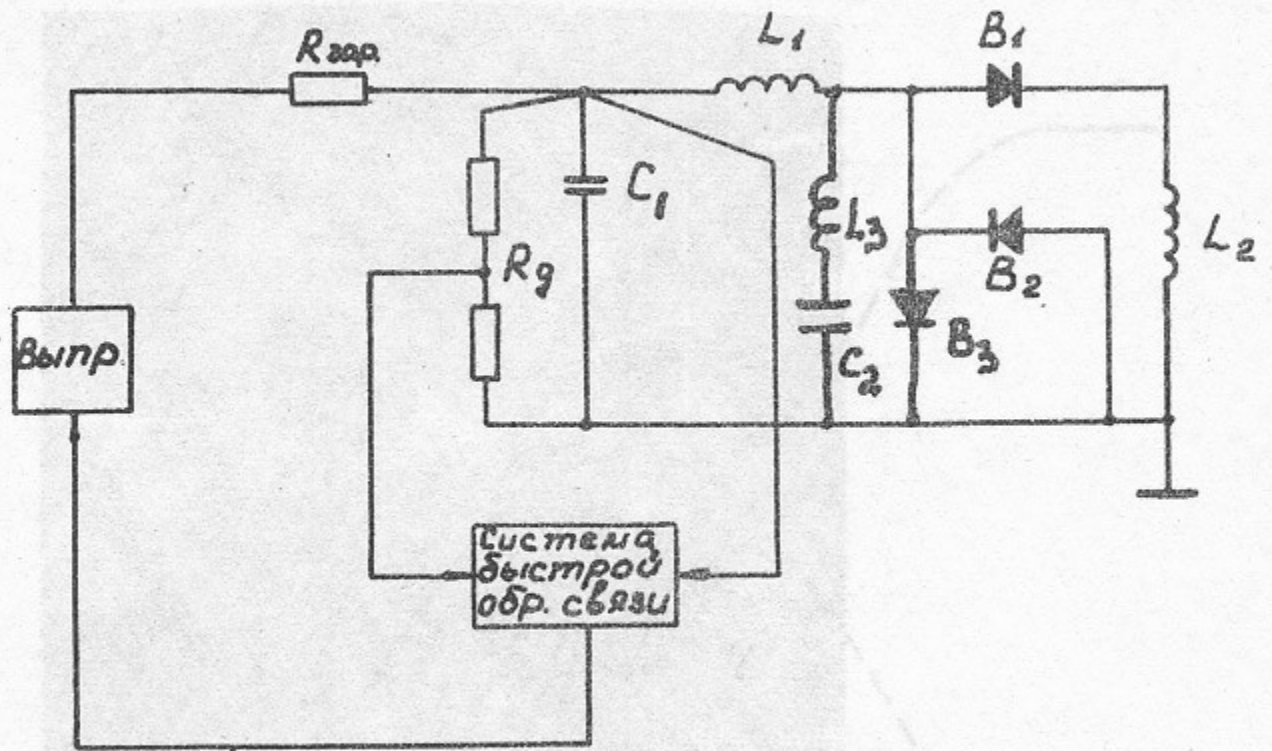


Рис. 3

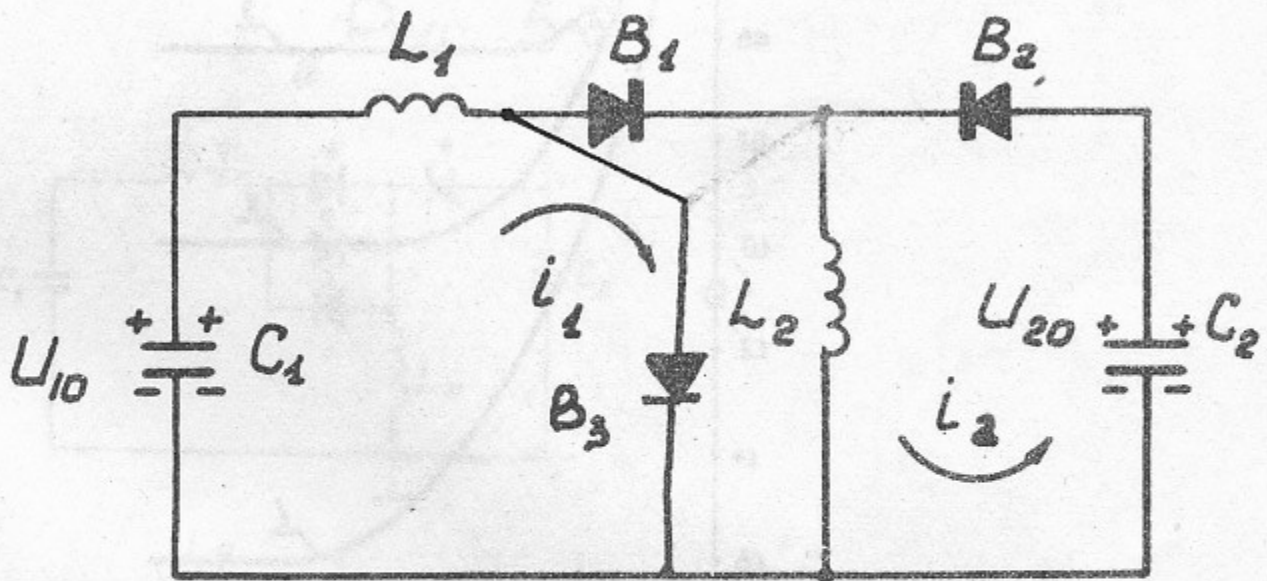


Рис. 4

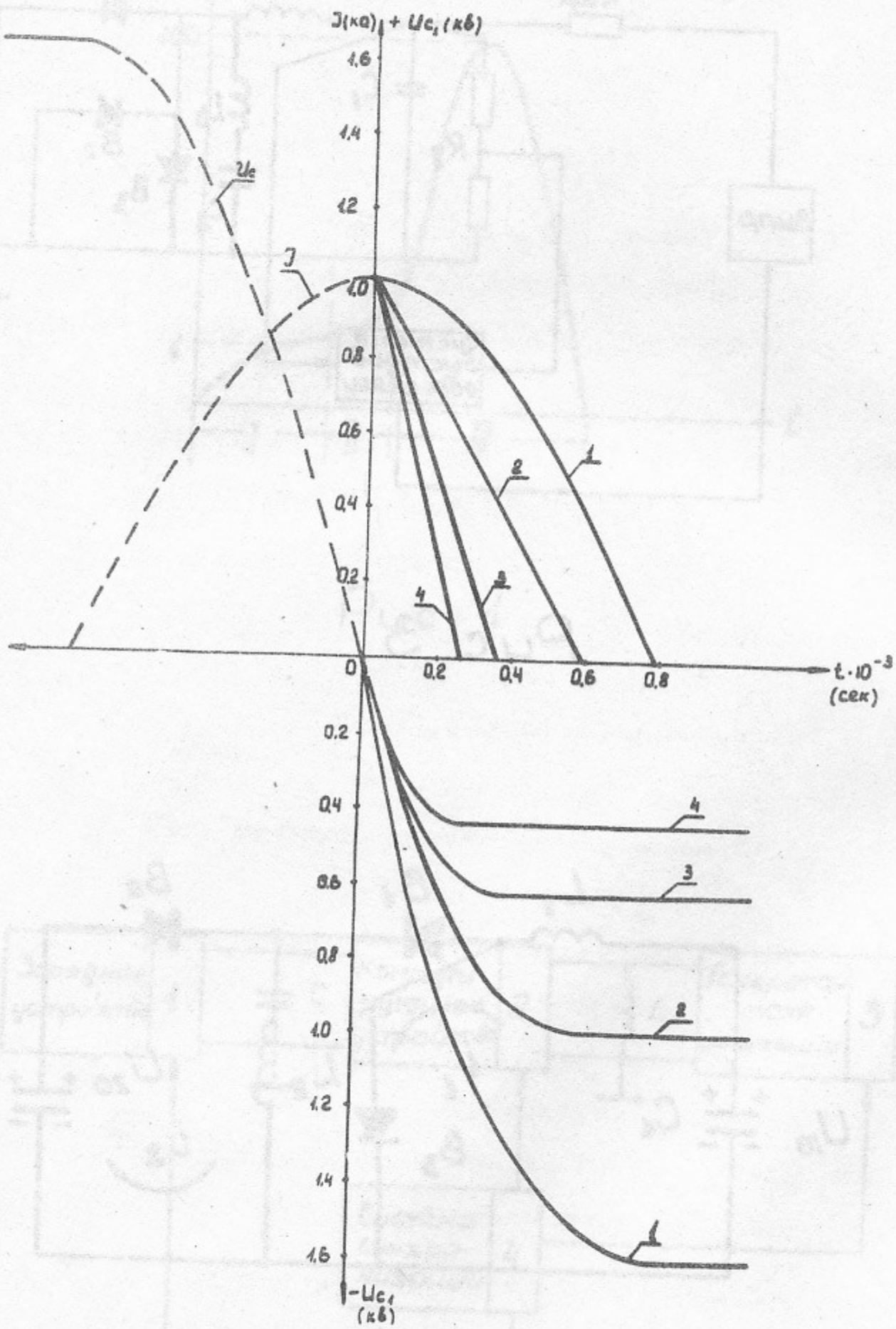


Рис. 5а

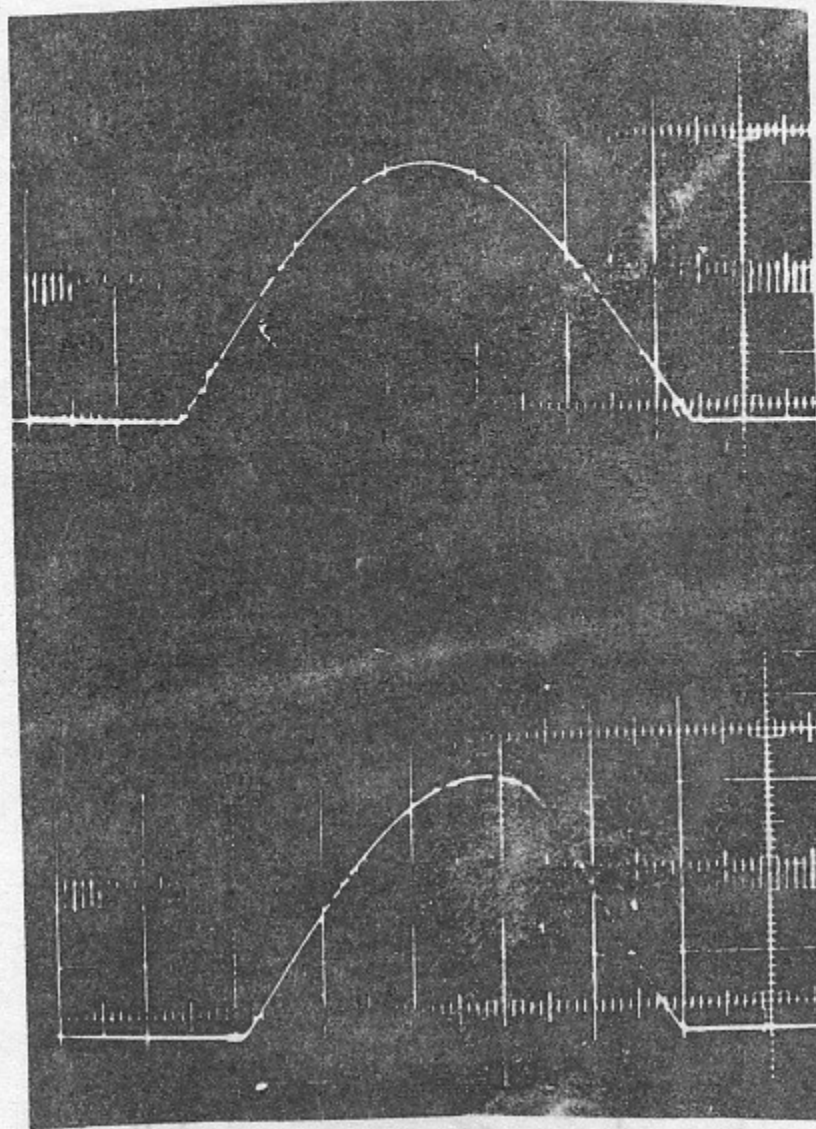


Рис. 5б

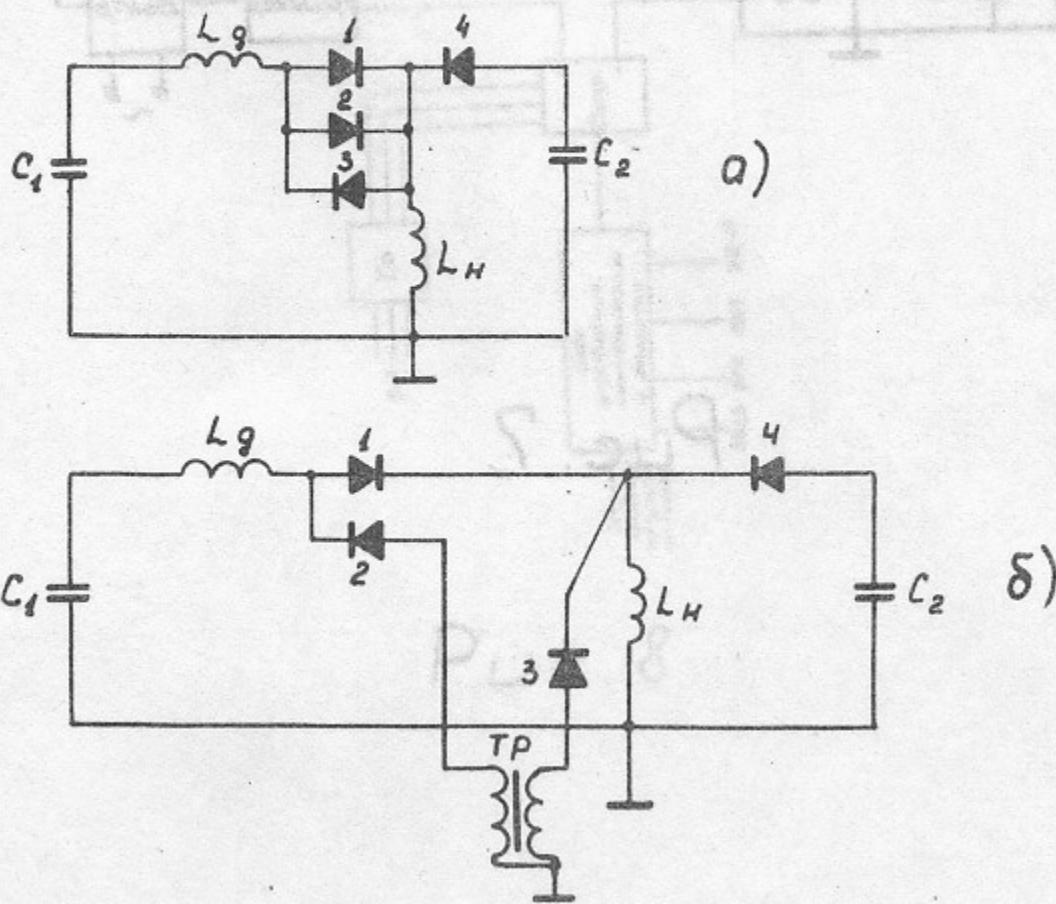


Рис. 6

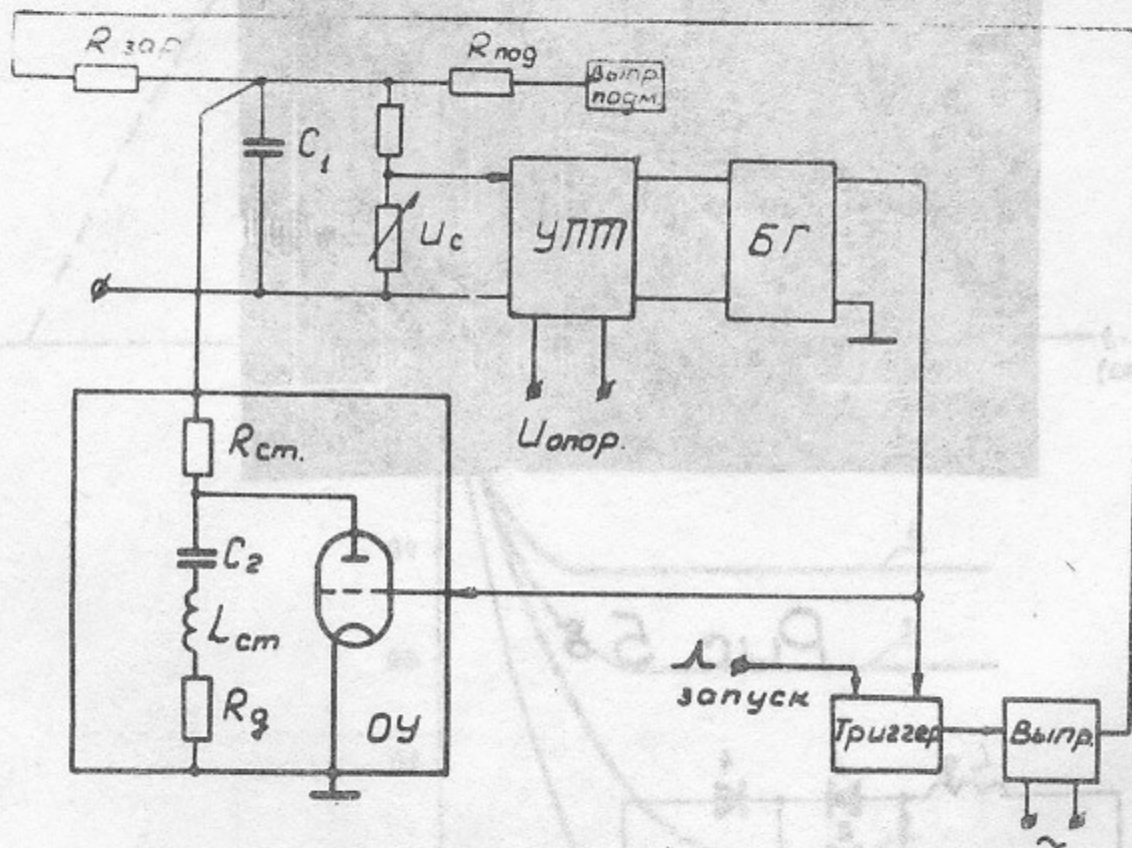


Рис. 7

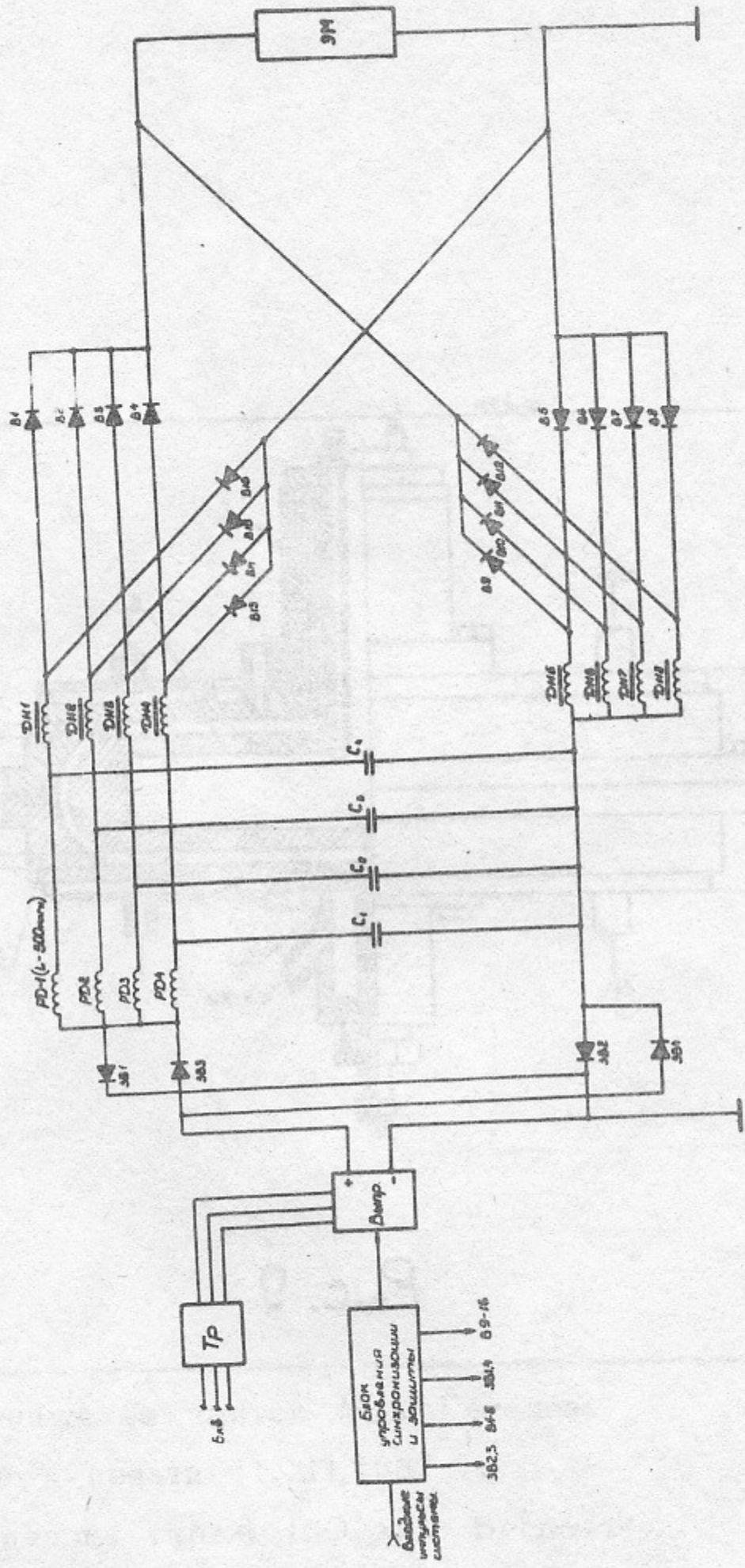


Рис. 8

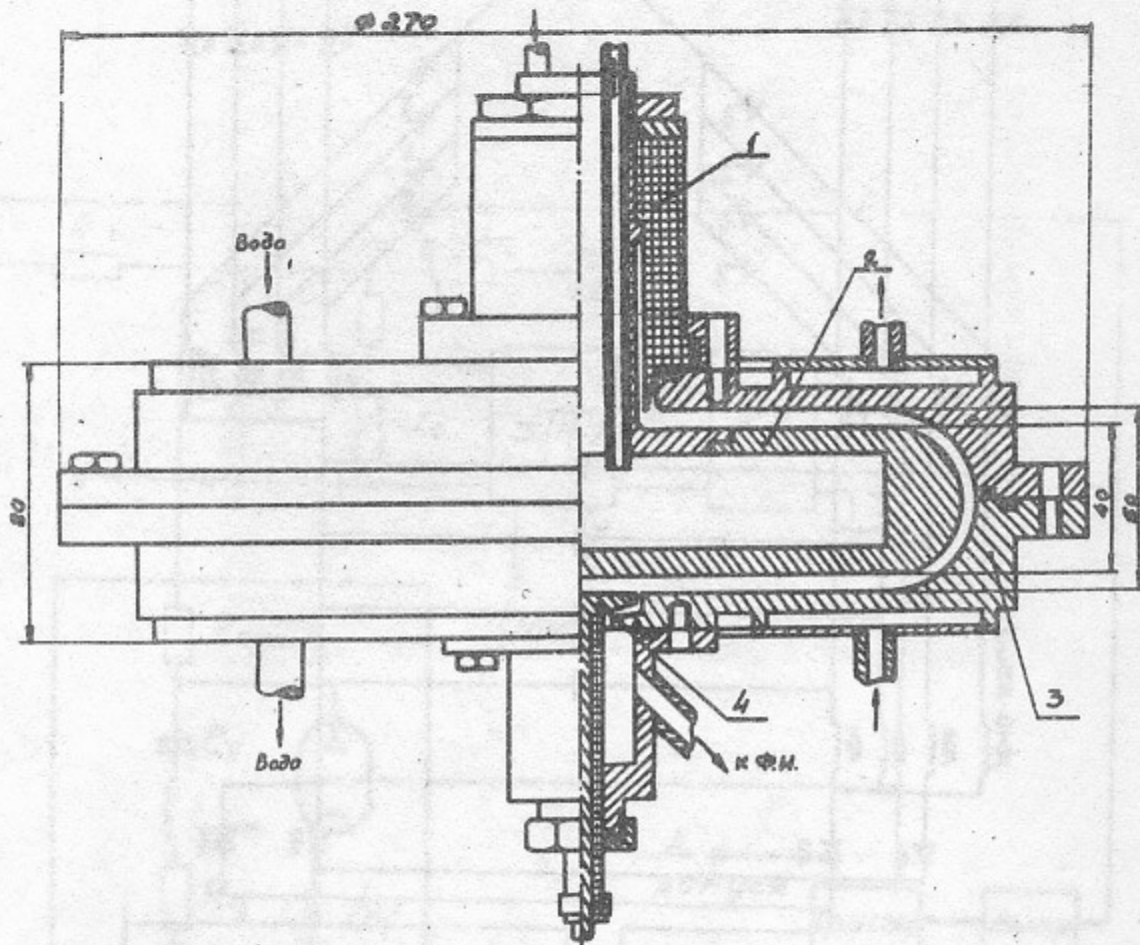


Рис. 9

Ответственный за выпуск М.Ю.Гельцель

Подписано к печати 11.XII.1967 г.

Усл. 1,2 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.

Заказ № 173.

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР.