

A.19

15

**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

И Я Ф 21 - 71

И.И.Авербух, М.Ю.Гельцель, Г.Б.Глаголев, Б.И.Гришанов,  
В.И.Купчик, А.А.Лившиц, Ю.В.Маклаков, В.И.Нифонтов,  
Г.Н.Острейко, В.В.Петров, В.И.Сербин, А.В.Филипченко,  
Г.И.Ясенов

**СИНХРОТРОН Б - 4 - ИНЖЕКТОР ДЛЯ  
ПОЗИТРОН - ЭЛЕКТРОННОГО НАКОПИТЕЛЯ ВЭП - 3**

Новосибирск

1971

Авербух И.И., Гельцель М.Ю., Глаголев Г.Б., Гришанов Б.И.,  
Купчик В.И., Лившиц А.А., Маклаков Ю.В., Нифонтов В.И.,  
Острейко Г.Н., Петров В.В., Сербин В.И., Филипченко А.В.,  
Яснов Г.И.

## СИНХРОТРОН Б-4 - ИНЖЕКТОР ДЛЯ ПОЗИТРОН- ЭЛЕКТРОННОГО НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

Второй этап будет заключаться в обеспечении максимальной скорости на входе инжекторов и электронов в захватывающий для чего потребуются получение предельного тока электронов в вакуумной трубке, что всегда требует специальных исследований.

Для создания схемы работы на синхротроне Б-4, 1,5-мксекундный инжектор электронами и предельного тока электронов в вакуумной трубке, что всегда требует специальных исследований.

**БИБЛИОТЕКА**  
Института ядерной  
физики СО АН СССР  
ИНВ. № \_\_\_\_\_

Основные параметры синхротрона Б-4 приведены в таблице 1.

### Блок-схема установки

Блок-схема всей установки, включая собственно синхротрон Б-4, инжектор ВЭПП-3 и все остальные элементы, необходимые для запуска, захвата, ускорения, выпуска пачки, представлено на рис. 1.

Весь цикл работ Новосибирск  
1971

На первом этапе электроны на линейном ускорителе I че-  
рез электроно-оптический канал 2 направляются на внешний ра-

## А Н Н О Т А Ц И Я

Описано устройство и конструкция синхротрона Б-4 - инжектора для электрон-позитронного накопителя ВЭПП-3. Приведены параметры отдельных узлов, входящих в схему синхротрона, расчёты элементов выпуска и результаты, полученные на первом этапе работ на синхротроне.

В настоящей работе приводятся сведения о конструкции, основных элементах и результатах, полученных при запуске синхротрона Б-4 (1-й этап), являющегося инжектором для электрон-позитронного накопителя ВЭПП-3 Института ядерной физики СО АН СССР / 1,2 /.

Работы по проектированию синхротрона были начаты в 1966г. К середине 1968 г. основные узлы были готовы и начата сборка синхротрона. В мае 1969 г. осуществлен запуск инжектора синхротрона - линейного ускорителя ЭЛИТ-3 / 3 /, в августе 1969г. произведен выпуск электронов в Б-4, а в январе 1970 г. получен выпущенный пучок.

Работа на синхротроне разделяется на два этапа. На первом этапе необходимо было получить выпущенный пучок с параметрами, обеспечивающими проверку всех систем накопителя ВЭПП-3. Работы на синхротроне велись, практически, параллельно с созданием ВЭПП-3, что в значительной мере определило результаты, полученные на первом этапе.

Второй этап будет заключаться в обеспечении максимальной скорости накопления позитронов и электронов в накопителе, для чего потребуются получение предельного тока электронов в выпущенном пучке, что всегда требует специальных исследований.

При создании синхротрона Б-4 был учтен опыт работы на синхротроне Б-3М / 4,5 /. В частности, здесь применена многооборотная инжекция электронов, обладающая рядом преимуществ перед однооборотной, бетатронное ускорение после инжекции до 8 Мэв.

Основные параметры синхротрона Б-4 приведены в таблице 1.

### Блок-схема установки

Блок-схема всей установки, включая собственно синхротрон Б-4, инжектор ЭЛИТ-3 и все остальные элементы, необходимые для впуска, захвата, ускорения, выпуска частиц, представлена на рис.1.

Весь цикл ускорения можно условно разделить на несколько этапов.

На первом этапе электроны из линейного ускорителя 1 через электронно-оптический канал 2 впускаются на наружный ра-

диус камеры синхротрона в квазипостоянное магнитное поле, создаваемое специальным генератором 13. Одновременно с инъекцией включается сердечник накопления 4, с помощью которого частицы заполняют всю камеру по радиусу.

Второй этап заключается в предварительном ускорении электронов до энергии 8 Мэв. для того, чтобы уменьшить потери при захвате в синхротронный режим. Электроны ускоряются вихревой ЭДС, которая создается бетатронным сердечником 5, питающимся от отдельного генератора 9.

Таблица 1.

Основные параметры синхротрона Б-4

Энергия электронов	500 Мэв
Радиус равновесной орбиты	102 см
Длина прямолинейных промежутков	4x40 см
Вертикальная апертура	9 см.
Радиальная апертура	14 см.
Показатель спада магнитного поля	0,4
Энергия инъекции	2,5 Мэв.
Длительность импульса инъекции	1,5 мксек.
Число ускоренных электронов в импульсе	$10^{11}$ х)
Мощность генератора ВЧ	500 квт.
Частота генератора	75 Мгц
Амплитуда напряжения на резонаторе	60 кв.
Время ускорения	2-2,5 мсек.
Добротность резонатора	200
Шунтовое сопротивление резонатора	$4 \times 10^3$ ом.
Вакуум в камере синхротрона	$1 \times 10^{-5}$ торр.
Ток в шинах электромагнита	140 ка.
Энергия, запасенная в магнитном поле	90 клж.)
Частота повторения циклов ускорения	0,5 гц. х)

х) На первом этапе

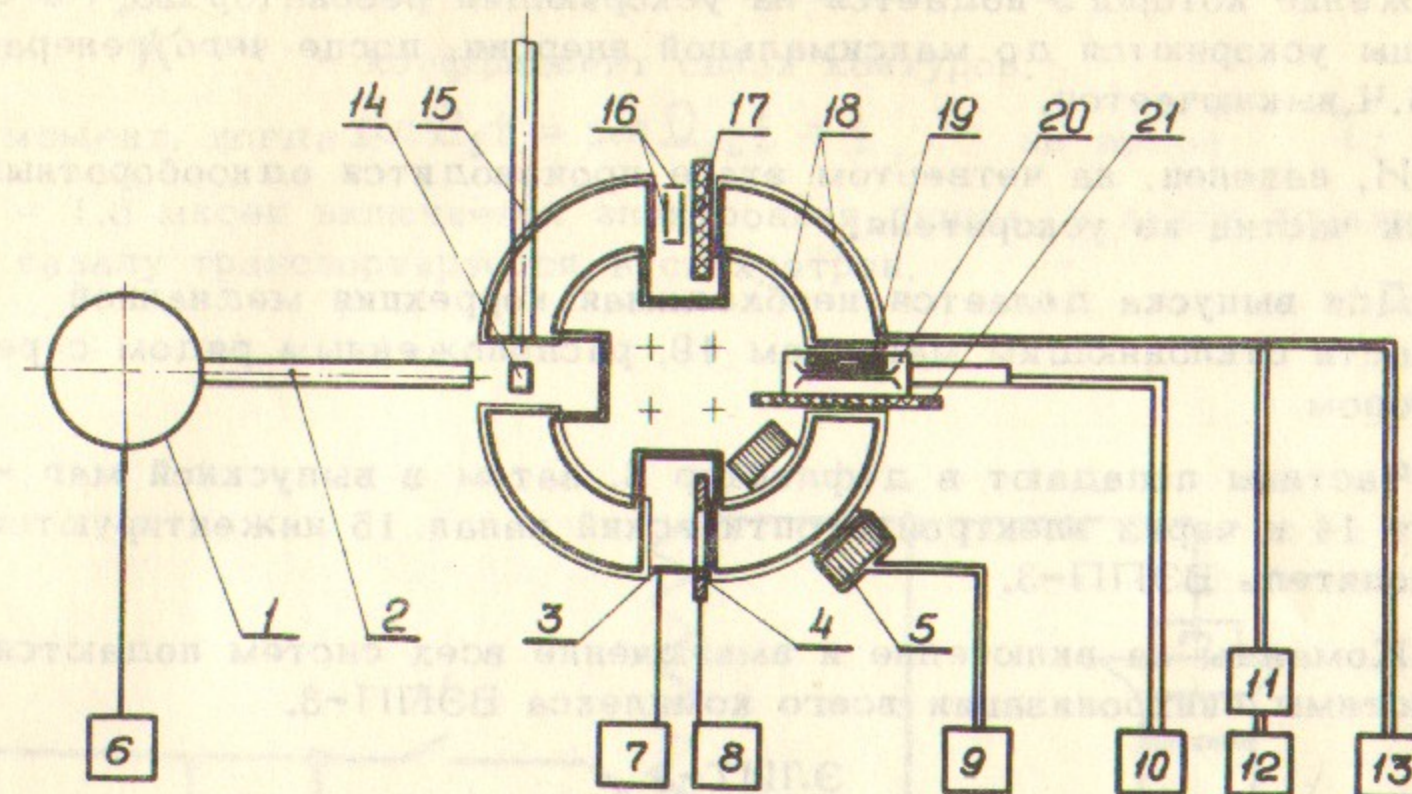


Рис.1. Блок-схема синхротрона

1 - ЭЛИТ-3, 2 - электронно-оптический канал ЭЛИТ-3 - Б-4, 3 - дефлектор; 4 - сердечник накопления, 5 - бетатронный сердечник, 6 - зарядное устройство ЭЛИТ-3, 7 - генератор дефлектора, 8 - генератор сердечника накопления, 9 - генератор бетатронного сердечника, 10 - В.Ч.генератор, 11 - импульсный трансформатор, 12 - генератор основного поля, 13 - генератор поля инъекции, 14 - выпускной магнит, 15 - выпускной канал, 16 - ёмкостные датчики, 17 - индукционные датчики, 18 - токоведущие шины, 19 - отклоняющий магнит, 20 - резонатор, 21 - изолятор.

После окончания второго этапа включается основное магнитное поле. Напряжение на токоведущие шины подается от мощного генератора 12 через импульсный трансформатор 11. Одновременно с главным полем включается высокочастотный генератор 10, напряжение которого подается на ускоряющий резонатор 20, и частицы ускоряются до максимальной энергии, после чего генератор В.Ч. выключается.

И, наконец, на четвертом этапе производится однооборотный выпуск частиц из ускорителя.

Для выпуска делается необходимая коррекция медианной плоскости отклоняющим магнитом 19, расположенным рядом с резонатором.

Частицы попадают в дефлектор 3, затем в выпускной магнит 14 и через электронно-оптический канал 15 инжектируются в накопитель ВЭПП-3.

Команды на включение и выключение всех систем подаются от системы синхронизации всего комплекса ВЭПП-3.

#### ЭЛИТ-3

Инжектором синхротрона Б-4 является ЭЛИТ-3 - ускоритель на основе трансформатора Тесла. Блок-схема такого ускорителя приведена на рис.2.

Ускоритель работает следующим образом. Конденсатор  $C_1$  заряжается от стабилизированного с точностью до 0,1% выпрямителя до напряжения  $U_{01}$ . В момент максимума поля инжекции в синхротроне система синхронизации включает коммутатор "К" и в связанных контурах  $L_1, C_1$  и  $L_2, C_2$  возникают колебания.

$$U_2 = U_{01} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin \Omega_s t \sin \Omega_{cb} t, \text{ где}$$

$U_2$  - напряжение во вторичном контуре,

$L_1, L_2$  - индуктивности соответственно первичного и вторичного контуров,

$$\Omega_s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}; \quad \Omega_{cb} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_{01}}{\sqrt{1+K}}; \quad \omega_2 = \frac{2\pi f_{02}}{\sqrt{1-K}}; \quad K = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$f_{01}, f_{02}$  - собственная частота контуров,

$K$  - коэффициент связи контуров.

В момент, когда  $\sin \Omega_s t = \sin \Omega_{cb} t = 1$ , на время  $\tau_i =$

= 1,5 мксек включается электронная пушка, и пучок электронов по каналу транспортируется в синхротрон.

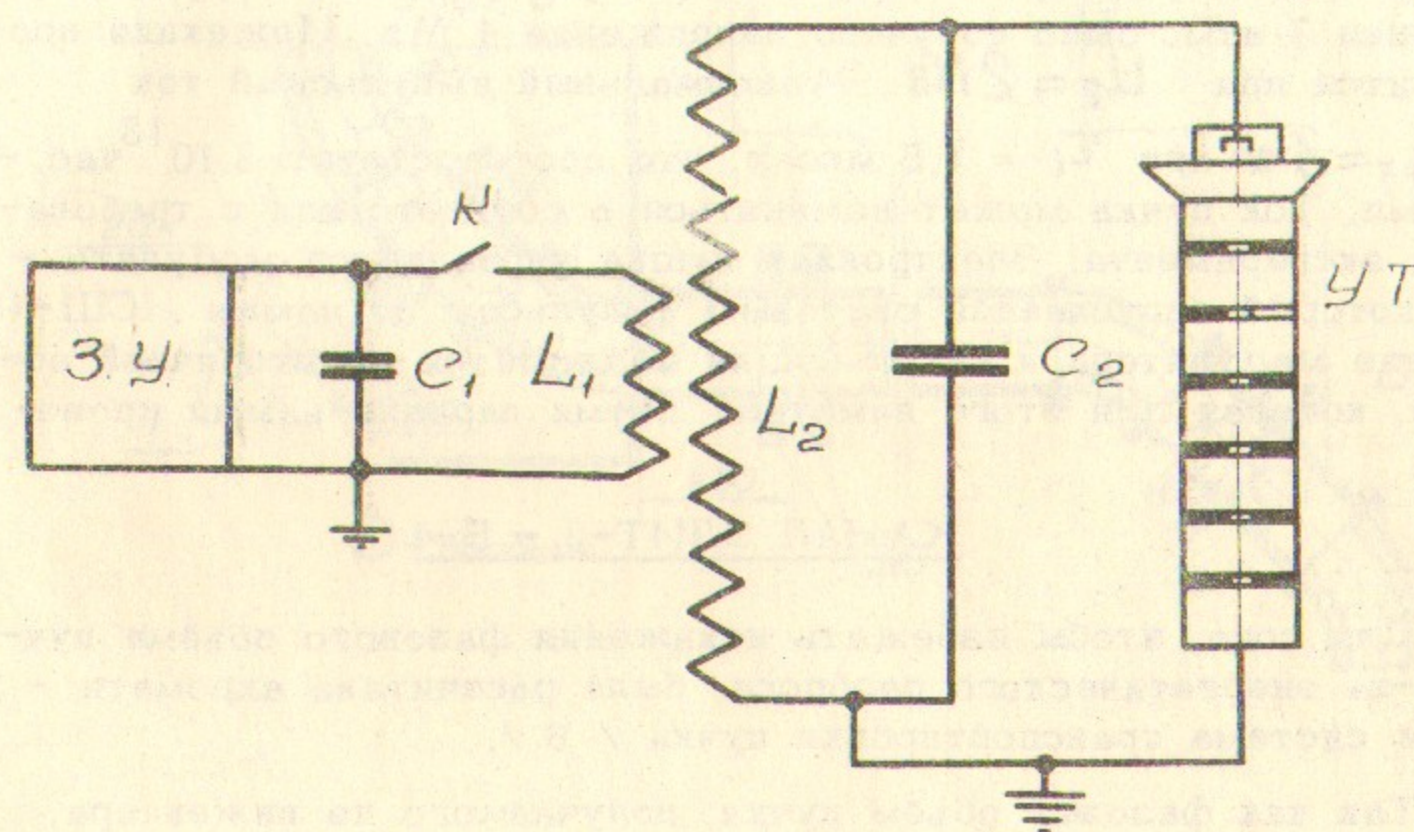


Рис.2. Блок-схема ЭЛИТ-3

З.У. - зарядное устройство,  $C_1$  - ёмкость первичного контура,  $L_1$  - первичная обмотка, К - коммутатор,  $L_2$  - вторичная обмотка,  $C_2$  - конструктивная ёмкость, П - электронная пушка, У.Т. - ускорительная трубка.

Для того, чтобы энергия пучка за время инжекции изменялась не более, чем на 0,5%, собственная частота контуров выбрана равной  $f_0 = 35$  кгц.

Основные параметры контуров  $C_1 = 4,2$  мкф;  $L_1 = 5,5$  мкгн.

$C_2 = 150$  пф;  $L_2 = 195$  мгн;  $K = 0,385$ . При рабочем напряжении  $U_{01} = 25$  кв на вторичной обмотке развивается напряжение до 3 Мв. Секционированная ускорительная трубка из керамики 22ХС включена параллельно вторичному контуру. Трансформатор, образованный контурами, вместе с ускорительной трубкой помещены в стальной бак диаметром 1200 мм и высотой 2300 мм. В качестве изолирующего газа применен элегаз ( $SF_6$ ) под давлением до 12 атм.

В трансформаторном режиме (без ускорительной трубки) при давлении 7 атм. было получено напряжение 4 Мв. Инжекция производится при  $U_2 = 2$  Мв. Максимальный импульсный ток

$I_{max} = 3$  а при  $\tau_i = 1,5$  мксек, что соответствует  $3 \cdot 10^{13}$  частиц/имп. Ток пучка может изменяться в соответствии с требованиями эксперимента. Электронная пушка управляется модулятором, который запускается световым импульсом от лампы ИСШ-15. Питание модулятора и накал пушки подводятся по вторичной обмотке, которая для этого намотана двумя параллельными проводами.

#### КАНАЛ ЭЛИТ-3 - Б-4

Для того, чтобы избежать искажения фазового объема пучка из-за энергетического разброса, была рассчитана ахроматическая система транспортировки пучка / 6 /.

Так как фазовый объем пучка, получаемого из инжектора, может быть сделан равным фазовому объему пучка, захватываемого в синхротрон, то канал был рассчитан с увеличением, равным единице.

На рис.3 приведена блок-схема электронного оптического канала. Пучок из инжектора выходит вниз, поэтому для перевода пучка сделаны два поворота на  $90^\circ$  в разных плоскостях. Каждый поворот осуществляется двумя магнитами 1 с согласующей линзой 2 между ними. Для согласования поворотов, между ними включена согласующая линза 3.

Магниты одновитковые, с равновесным радиусом  $R_0 = 9$  см, апертурой  $12 \times 12$  мм, углом поворота  $\alpha = 45^\circ$  и показателем схода поля  $\mu = 0,5$ .

Питание магнитов импульсное  $\tau_{имп} = 55$  мксек, согласующие сдвоенные аксиально - симметричные линзы питаются импульсным током  $I = 300$  а,  $\tau_{имп} = 190$  мксек

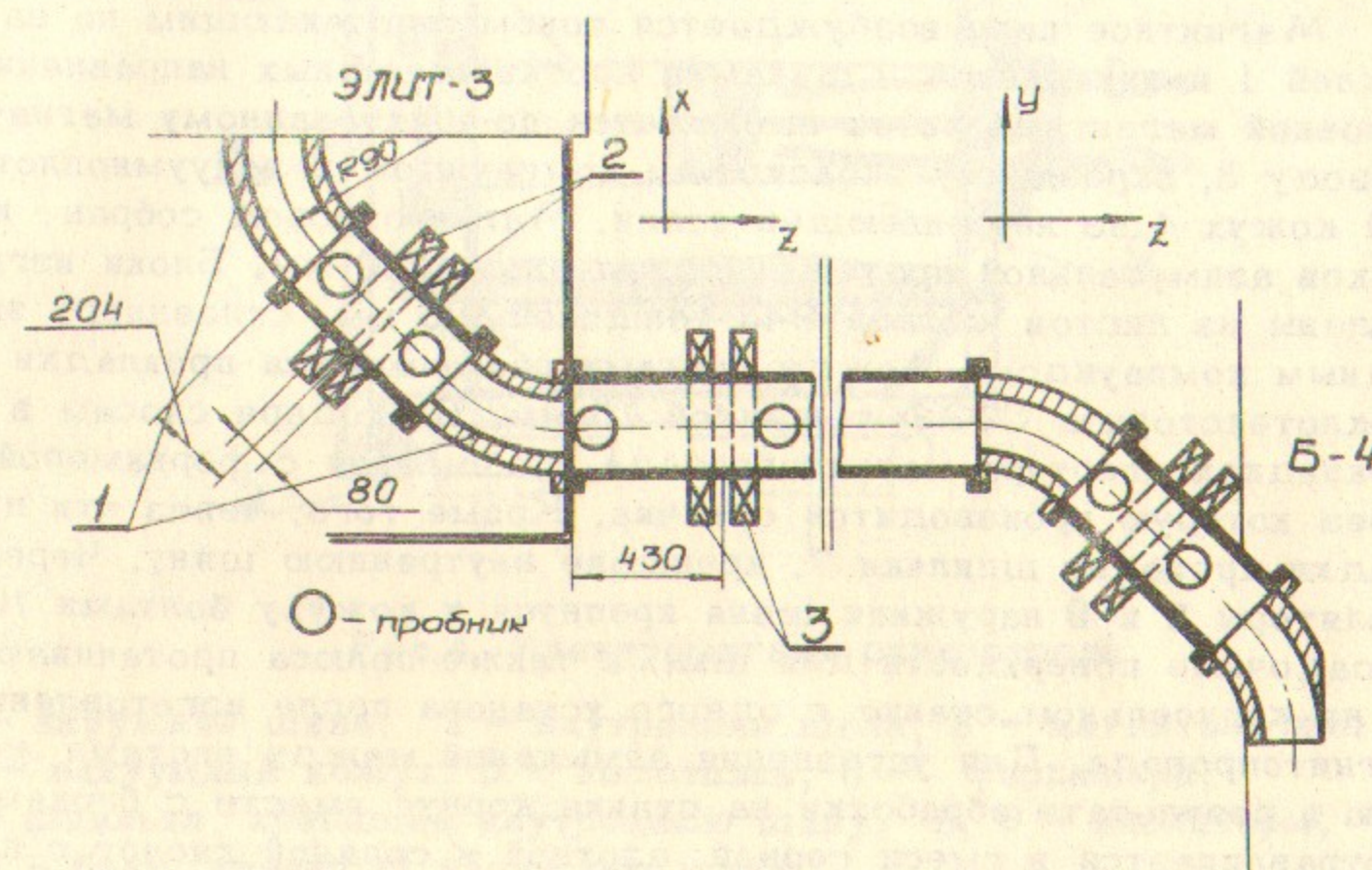


Рис.3. Канал ЭЛИТ-3 - Б-4

1 - поворотные магниты; 2,3 - согласующие аксиально - симметричные линзы.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТ СИНХРОТРОНА

Конструкция электромагнита синхротрона является логическим продолжением работ по созданию железно-безжелезных магнитов в ИЯФ / 7, 8 /. Такая конструкция обеспечивает минимальные поля рассеяния при максимальном использовании магнитного поля по всему объему.

Магнитная система синхротрона состоит из четырех С-образных магнитов, азимутальной протяженностью по 88° каждый, с четырьмя прямолинейными промежутками между ними. Поперечное сечение электромагнита приведено на рис.4.

Магнитное поле возбуждается током, протекающим по наружной 1 и внутренней 2 шинам в противоположных направлениях. Основной магнитный поток замыкается по шихтованному магнитопроводу 3, вклеенному эпоксидным компаундом в вакуумноплотный кожух 4 из нержавеющей стали. Магнитопровод собран из блоков азимутальной протяженностью около 200 мм. Блоки изготовлены из листов железа Э43 толщиной 0,5 мм, склеенного эпоксидным компаундом. Между блоками размещаются прокладки из стеклотекстолита СТЭФ толщиной 15 мм. Благодаря скосам в прокладках, апертура магнитопровода сообщается с форкамерой 6, через которую производится откачка. Кроме того, через эти прокладки проходят шпильки 7, крепящие внутреннюю шину. Через изоляторы 8 и 9 наружная шина крепится к кожуху болтами 10. Посадочные поверхности для шин, а также полюса протачиваются на карусельном станке с одного установка после изготовления магнитопровода. Для устранения замыканий между листами железа в результате обработки на станке корпус вместе с блоками протравливается в смеси серной, азотной и соляной кислот с последующей нейтрализацией и промывкой.

Необходимый показатель спада магнитного поля обеспечивается как наклоном полюсов, так и профилем шин 1 и 2.

Использование внешнего кожуха сделало магнит надежным механически, а кроме того позволило, отказавшись от отдельной вакуумной камеры, полностью использовать весь объем магнитного поля для ускорения частиц.

Несмотря на большое количество эпоксидной смолы в вакуумном объеме, пять диффузионных насосов Н5-С с азотными

ловушками, обеспечивают вакуум  $10^{-5}$  торр. В дальнейшем предполагается перейти на магниторазрядные насосы.

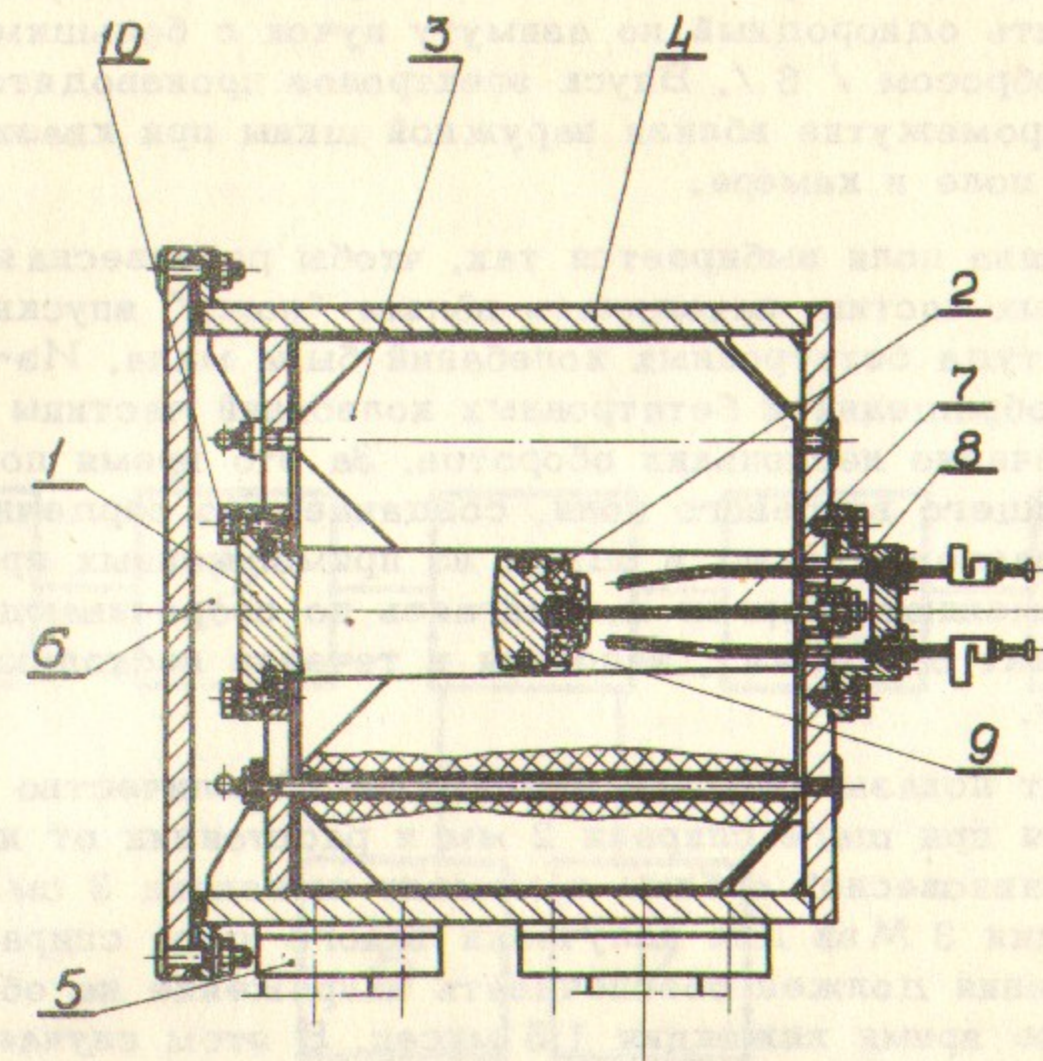


Рис.4. Электромагнит синхротрона.

1 - наружная шина, 2 - внутренняя шина, 3 - магнитопровод, 4 - вакуумный кожух, 5 - подставка, 6 - форкамера, 7 - шпилька, крепящая внутреннюю шину, 8, 9 - изоляторы, 10 - болт, крепящий наружную шину.

Для окончательной корректировки показателя спада поля и положения орбиты по радиусу и высоте во время инжекции и при выпуске на поверхности полюсов укреплены специальные витки. Для этих же целей часть блоков магнита охвачена дополнительными шинами.

## МНОГООБОРОТНАЯ ИНЖЕКЦИЯ

В синхротроне применена многооборотная инжекция, позволяющая получить однородный по азимуту пучок с большим энергетическим разбросом / 6 /. Впуск электронов производится в прямолинейном промежутке вблизи наружной шины при квазипостоянном магнитном поле в камере.

Величина поля выбирается так, чтобы равновесная орбита инжектируемых частиц, находилась вблизи "ножа" впускного магнита и амплитуда бетатронных колебаний была мала. Из-за разности частот обращения и бетатронных колебаний частицы обходят "нож" в течение нескольких оборотов. За это время под действием тормозящего вихревого поля, создаваемого сердечником накопления, расположенным в одном из прямолинейных промежутков, частицы изменяют энергию и, двигаясь по сворачивающейся спирали, отходят от "ножа", заполняя в течение нескольких оборотов всю камеру.

Расчет показывает, что максимальное количество частиц захватывается при шаге спирали 2 мм и расстоянии от наружной шины до равновесной орбиты в момент инжекции 3 см. При энергии инжекции 3 Мэв для получения такого шага спирали сердечник накопления должен обеспечивать напряжение на обходе 5 кв. Оптимальное время инжекции 1,5 мксек. В этом случае с каждого оборота захватываются частицы в интервале координат  $\pm 0,6$  см и углов  $\pm 7 \cdot 10^{-3}$  радиана при общем наклоне пучка к наружной шине  $+ 8 \cdot 10^{-3}$  радиана.

Формирование прямоугольного импульса амплитудой до 5 кв и длительностью до 1,5 мксек осуществляется путем разряда гиперболической линии с сосредоточенными параметрами на трехвитковую обмотку сердечника накопления, шунтированную активным сопротивлением / 9 /.

Основным коммутирующим элементом служит тиратрон ТГИ1-2000/35. Для формирования крутого заднего фронта используется тиратрон ТГИ1-1000/25, который запускается через линию задержки тем же импульсом, что и основной тиратрон. После того, как гиперболическая линия разрядится, ток в обмотке сердечника продолжает течь в том же направлении, и возникает импульс напряжения отрицательной полярности, для подавления этого импульса используется тиратрон ТГИ1-700/25. Высоковольтный выпрямитель, заряжающий линию до напряжения 25 кв, собран на кенотронах В1-0,1/40. Схема генератора, питающего сердечник накопления, приведена на рис.5.

вольный выпрямитель, заряжающий линию до напряжения 25 кв, собран на кенотронах В1-0,1/40. Схема генератора, питающего сердечник накопления, приведена на рис.5.

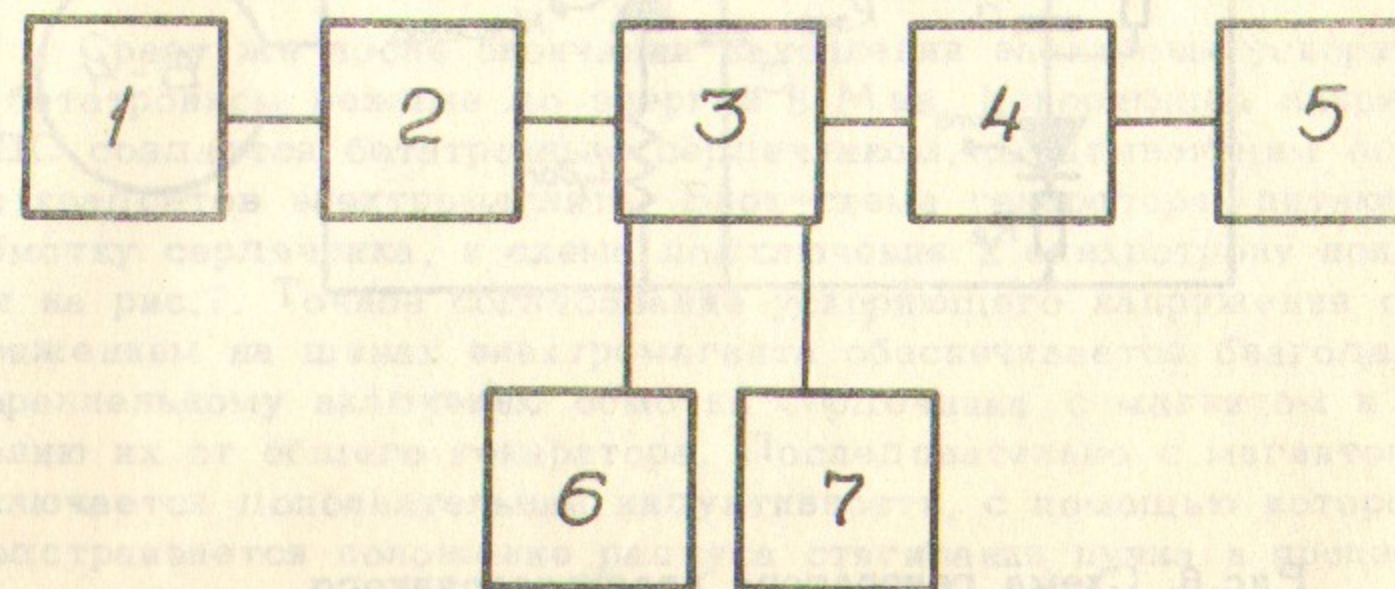


Рис.5. Блок-схема генератора сердечника накопления.

1 - блок управления, 2 - высоковольтный выпрямитель, 3 - гиперболическая линия, 4 - разрядный тиратрон, 5 - сердечник накопления, 6 - формирователь заднего фронта импульса, 7 - демпфер.



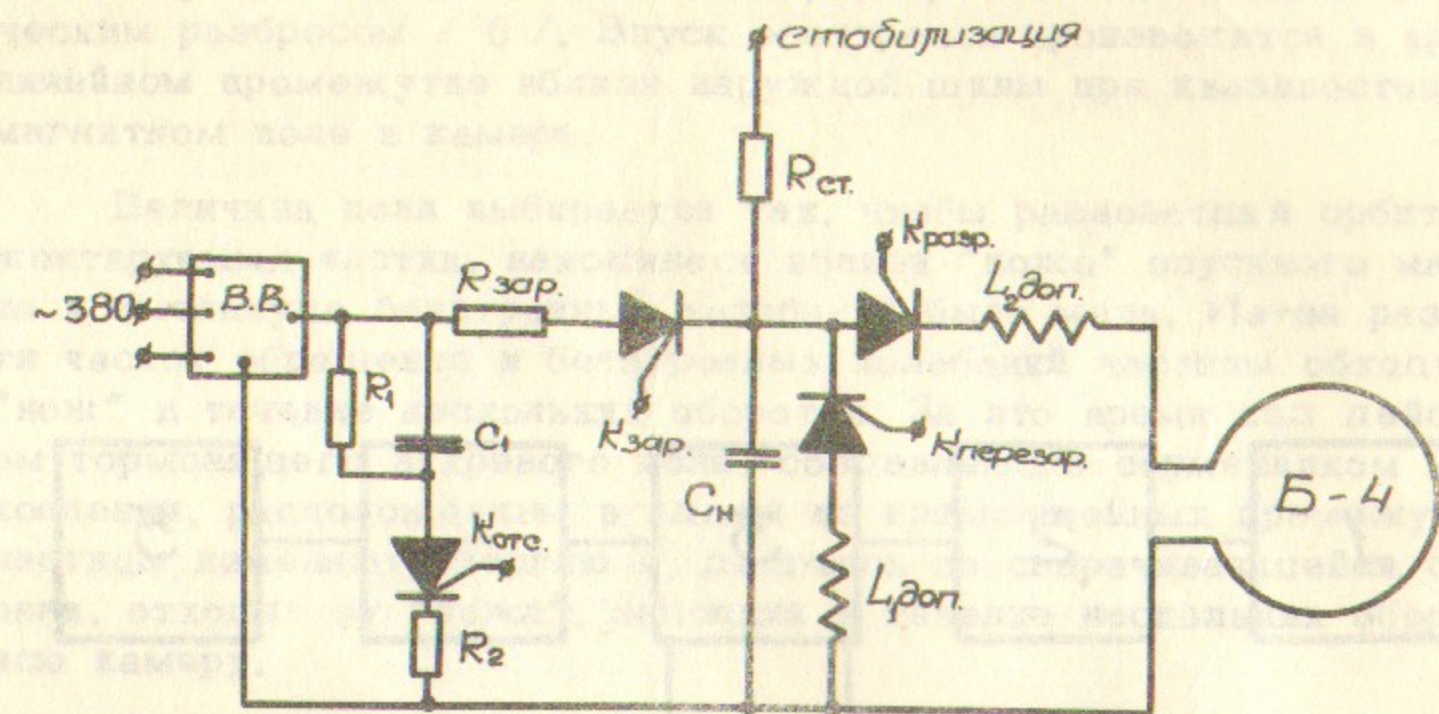


Рис. 6. Схема генератора квазипостоянного магнитного поля.

В.В. - высоковольтный выпрямитель,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $K_{отс.}$  - элементы цепи отсечки,  $K_{зар.}$  - зарядные вентили,  $C_n$  - накопительная ёмкость,  $L_{1доп.}$ ,  $K_{перезар.}$  - элементы цепи перезаряда,  $L_{2доп.}$ ,  $K_{разр.}$  - элементы разрядной цепи, Б-4 - токоведущие шины синхротрона,  $R_{ст.}$  - сопротивление цепи стабилизации.

## ПОЛЕ ИНЖЕКЦИИ

Квазипостоянное магнитное поле инъекции формируется током от отдельного генератора. Синусоидальные импульсы тока стабилизированы с точностью 0,1%. Кроме стабилизации тока от импульса к импульсу в схеме предусмотрена медленная стабилизация, предотвращающая изменения тока из-за температурных нестабильностей элементов.

Блок-схема генератора показана на рис. 6.

## БЕТАТРОННОЕ УСКОРЕНИЕ

Сразу же после окончания накопления электроны ускоряются в бетатронном режиме до энергии 8 МэВ. Ускоряющая вихревая ЭДС создается бетатронным сердечником, охватывающим один из квадратов электромагнита. Блок-схема генератора, питающего обмотку сердечника, и схема подключения к синхротрону показаны на рис. 7. Точное согласование ускоряющего напряжения с напряжением на шинах электромагнита обеспечивается благодаря параллельному включению обмотки сердечника с магнитом и питанию их от общего генератора. Последовательно с магнитом включается дополнительная индуктивность, с помощью которой подстраивается положение радиуса стягивания пучка в процессе бетатронного ускорения. После того, как ток в обмотке бетатронного сердечника достигнет максимума, она закорачивается посредством отдельного вентиля, благодаря чему ток в обмотке спадает за длительное время (1 мсек) и напряжение обратного знака, тормозящее электроны, оказывается пренебрежимо малым.

В конце бетатронного ускорения включается основное поле и В.Ч. генератор. Коэффициент захвата электронов в синхротронный режим оказывается близким к единице, т.к. в результате бетатронного ускорения пучок, заполнявший после инъекции всю камеру по радиусу, сжимается, освобождая место для синхротронных колебаний, возникающих после включения В.Ч.

Для более полного использования железа бетатронного сердечника он подмагничивается импульсным полем, длительность которого много больше, чем длительность бетатронного ускорения. Чтобы ток подмагничивания не создавал в синхротроне магнитного поля, противоположного рабочему, в схему включен диод Д2.

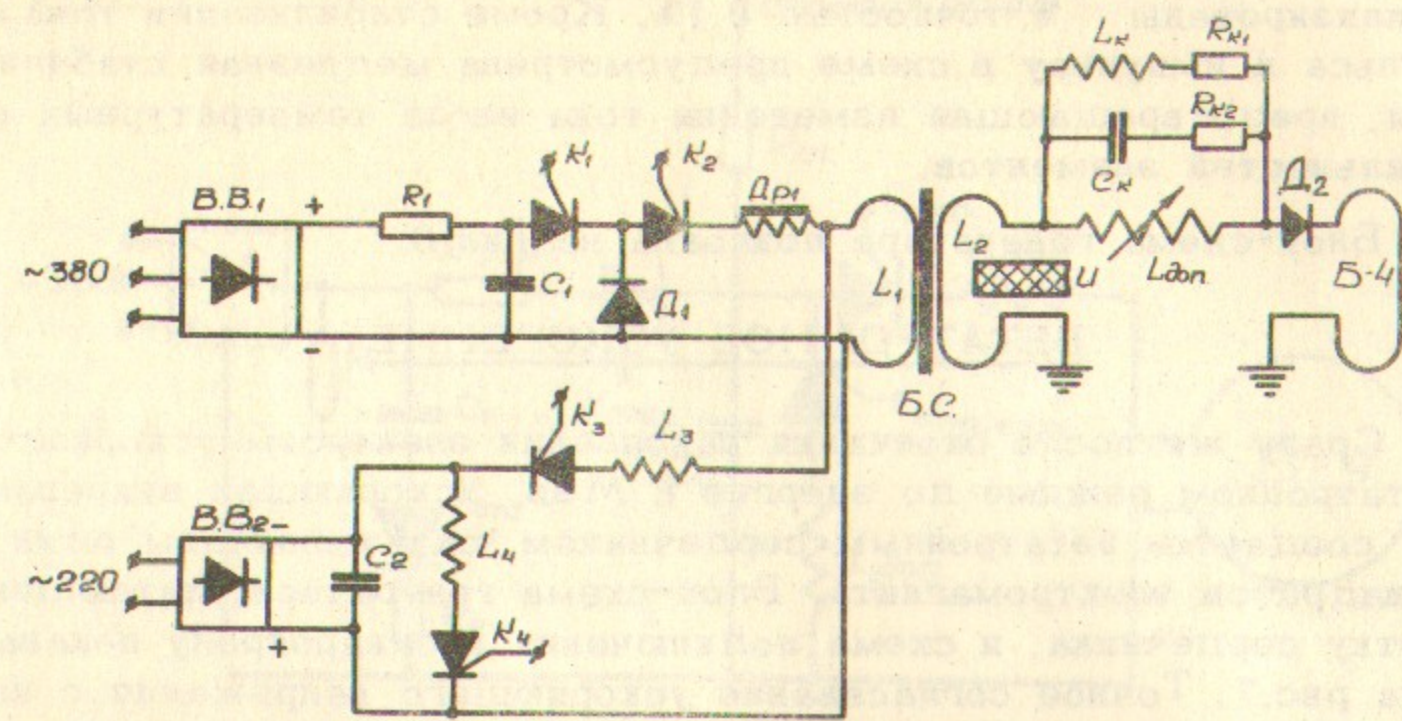


Рис.7. Блок-схема генератора бетатронного сердечника.

В.В.1 - высоковольтный выпрямитель,  $R_1$  - зарядное сопротивление,  $C_1$  - накопительная ёмкость,  $K_1, K_2$  - разрядные коммутаторы,  $D$  - демпфирующий диод,  $Dr$  - дроссель коррекции, Б.С. - бетатронный сердечник,  $L_1$  - обмотка бетатронного сердечника,  $L_2$  - корпус синхротрона,  $I$  - изолятор,  $L_k, C_k, R_{k1}, R_{k2}$  - корректирующие цепи,  $L_{доп}$  - дополнительная индуктивность, Б-4 - токоведущие шины синхротрона, В.В.2 - высоковольтный выпрямитель подмагничивания,  $C_2$  - накопительная ёмкость,  $K_3$  - разрядный коммутатор,  $K_4$  - перезарядный коммутатор,  $L_3$  - разрядная индуктивность,  $L_4$  - перезарядная индуктивность.

## ОСНОВНОЕ ПОЛЕ

Для получения ведущего поля при конечной энергии электронов 500 МэВ, с учётом насыщения железа электромагнита требуется ток  $I \approx 140$  ка. Схема генератора, формирующего такие импульсы, приведена на рис.8.

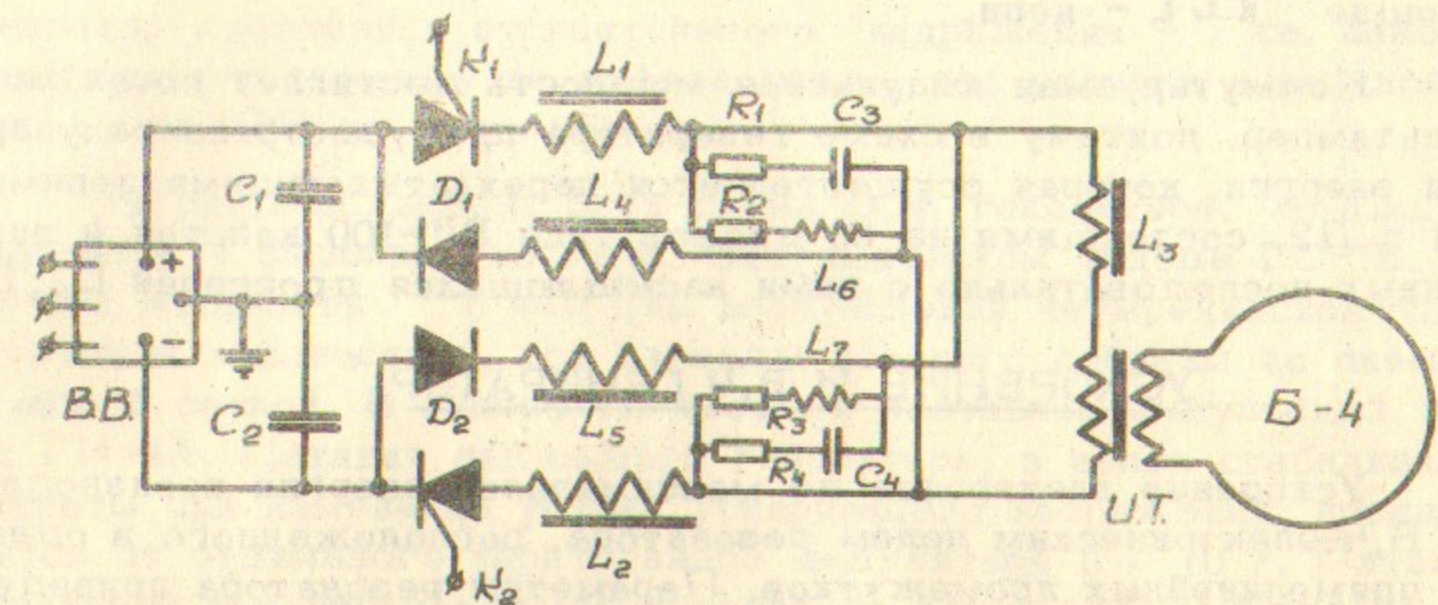


Рис.8. Генератор основного магнитного поля.

В.В. - высоковольтный выпрямитель,  $C_1, C_2$  - накопительные ёмкости,  $K_1, K_2$  - разрядные коммутаторы, ИТ - импульсный трансформатор,  $L_1, L_2, L_3$  - насыщающиеся дроссели,  $D_1 L_4, D_2 L_5$  - перехватывающие цепи.

Накопительная ёмкость, состоящая из двух батарей  $C_1-C_2 = 15 \cdot 10^3$  мкф, включенных последовательно, разряжается до напряжения  $\pm 7$  кв. Через коммутаторы  $K_1$  и  $K_2$ , которые состоят из 144 тиристоров Т-150, накопительная ёмкость заряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора ИТ. При коэффициенте трансформации  $N = 4$  во вторичной цепи формируется синусоидальный импульс тока, амплитуда которого  $I_0 = 140$  ка, длительность  $T = 4$  мсек. В разрядную цепь включены насыщающиеся дроссели  $L_1, L_2, L_3$ , магнитные свойства которых подобраны таким образом, чтобы обеспечить плавное нарастание напряжения на электромагните синхротрона. Для устранения выбросов напряжения при включении коммутаторов служат корректирующие  $RCL$ -цепи.

Коммутируемая импульсная мощность достигает сотен мегавольтампер, поэтому в схеме генератора предусмотрена рекуперация энергии, которая осуществляется перехватывающими цепями  $D_1$  и  $D_2$ , состоящими из 90 диодов типа ВЛ-100 каждая и включенных последовательно с ними насыщающихся дросселей  $L_4, L_5$ .

### УСКОРЕНИЕ И В.Ч.ГЕНЕРАТОР

Ускорение электронов до максимальной энергии производится В.Ч.электрическим полем резонатора, расположенного в одном из прямолинейных промежутков. Параметры резонатора приведены в табл.1.

Резонатор представляет собой симметричную конструкцию, составленную из двух коаксиальных линий, нагруженных конденсаторами, которые образованы дисками.

Резонатор соединяется с камерой ускорителя с помощью фланцев с плавающими уплотнениями, что облегчает его установку. Все вводы в резонатор выполнены с помощью фланцевых соединений, расположенных по окружности резонатора. Изоляторы вводов изготовлены из фторпласта, уплотнения - из вакуумной резины.

Резонатор шунтирован внешними нагрузками (сопротивления УВ1-20, охлаждаемые маслом) до значения добротности  $Q = 200$ . Это даёт возможность, не расстраивая резонатор, удерживать при захвате в синхротронный режим тока порядка нескольких ампер. Связь нагрузок с резонатором - ёмкостная и выполнена

внутри резонатора в виде согласованной полосковой линии, что обеспечивает шунтирование резонатора до более высоких частот, увеличивая устойчивость движения сгустков. С этой же целью предусмотрена возможность изменять длину подводящего фидера.

Подстройка резонатора производится конструктивным конденсатором, обеспечивающим перестройку частоты в диапазоне  $\pm 1,5\%$ . Напряжение на резонаторе измеряется петлей, нагруженной на согласованное сопротивление 75 ом и специально откалиброванной.

Для подавления резонансного вакуумного разряда (РВР) в резонаторе предусмотрена подача на все элементы вводов и конденсатор подстройки отрицательного напряжения - 2 кв. Зазор ускоряющего промежутка выбран таким, что условия возникновения в нём РВР не выполняются.

На рис.9 приведена блок-схема В.Ч. генератора. Задающий генератор 1 выполнен на металлокерамическом триоде ГС-1Б. и отдаёт мощность 5 квт для возбуждения четырехкаскадного усилителя мощности 2, все каскады которого собраны по схеме с общей сеткой. В оконечном каскаде поставлен импульсный триод ГИ-4А. Питание задающего генератора, в целях стабилизации частоты при изменении уровня ускоряющего напряжения, производится от отдельного тиратронного модулятора 5 / 10 /. Питание усилителя мощности осуществляется от линейного модулятора 6, причём на первый и второй каскады подается половинное напряжение, а на третий<sup>х)</sup> и четвертый каскад - полное через модулятор фронта импульса 7.

В модуляторе фронта с помощью специальной активной и пассивной схемы формируется начальный участок импульса, обеспечивающий получение на ускоряющем зазоре резонатора огибающей В.Ч. напряжения, соответствующей требованиям наилучшего захвата в синхротронный режим и последующего ускорения без потерь.

<sup>х)</sup> Модуляция предпоследнего каскада необходима для уменьшения проходной мощности.

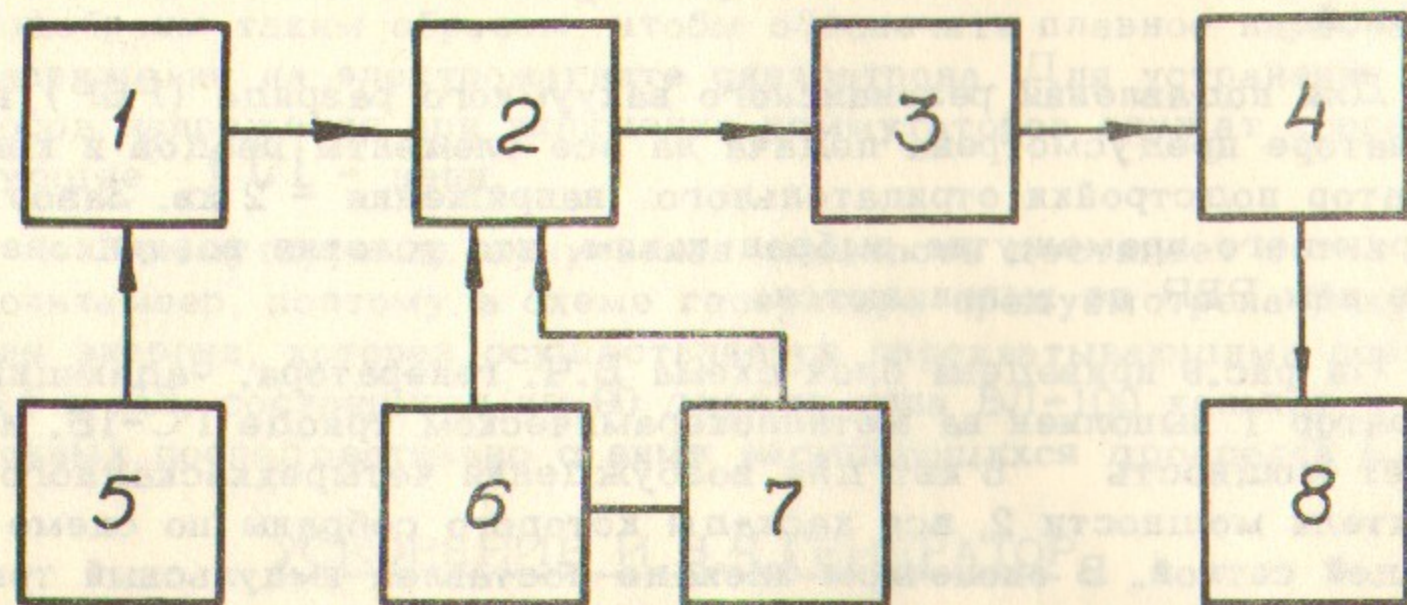


Рис.9. Блок-схема В.Ч.генератора.

1 - задающий генератор, 2 - усилитель мощности, 3 - согласующее устройство, 4 - резонатор, 5 - тиратронный модулятор, 6 - линейный модулятор, 7 - модулятор фронта импульса, 8 - шунтирующие нагрузки.

От усилителя через согласующее устройство 3 и фидер, В.Ч. напряжение подается на ускоряющий зазор резонатора. Связь с резонатором - индуктивная. Петля компенсирована конструктивной ёмкостью, изменяя величину которой, можно в небольших пределах изменять величину связи.

### КОРРЕКЦИЯ ОРБИТЫ

Во время работы синхротрона возникает необходимость коррекции орбиты электронного пучка по радиусу и по вертикали, а также изменения показателя спада поля  $\mathcal{N}$  на этапах инжекции и выпуска.

Для этого используются витки, укрепленные на полюсах магнитов, и шины, охватывающие часть блоков магнита. На рис.10 показана блок-схема  $R, Z, \mathcal{N}$  - коррекции.

Коррекция орбиты и  $\mathcal{N}$  на этапе инжекции производится введением в корректирующие цепи сигнала, форма которого повторяет форму магнитного поля в синхротроне. Сигнал формируется схемой 1, в которой суммируются токи, создающие квазипостоянное поле инжекции и бетатронного режима. Через регулирующее сопротивление  $R_1$  и усилитель мощности 2 сигнал подается в витки коррекции 4. Усилители мощности выполнены на транзисторах и обеспечивают токи в цепях  $Z$  и  $R$  - коррекции до 15 ампер, а в цепях  $\mathcal{N}$  - коррекции до 40 ампер.

Коррекция орбиты при выпуске производится введением в корректирующие цепи импульса тока синусоидальной формы, синхронизированного с моментом выпуска. Амплитуда тока в витках  $R$  - коррекции 600 а, в витках  $Z$  и  $\mathcal{N}$  - коррекции - 300 а. Длительность импульса - 400 мксек.

Импульс тока формируется тиристорным генератором 5. Амплитуда тока регулируется изменением напряжения питания.

### ВЫПУСК

Выпуск ускоренных электронов производится по вертикали в течение одного оборота. В.Ч.напряжение выключается на спадающем участке импульса магнитного поля. При дальнейшем уменьшении поля радиус равновесной орбиты увеличивается, и пучок попадает в дефлектор, расположенный в прямолинейном проме-

жутке, вблизи наружной стенки камеры. Окно выпускного канала находится в следующем за дефлектором прямолинейном промежутке около верхнего полюса магнита, вплотную к наружной шине.

Пластины дефлектора / 11 / являются отрезками полосковых линий, согласованных на конце. Рабочая апертура дефлектора  $\Delta Z \times \Delta R = 10 \times 16 \text{ мм}^2$ . Зарядное напряжение генератора до

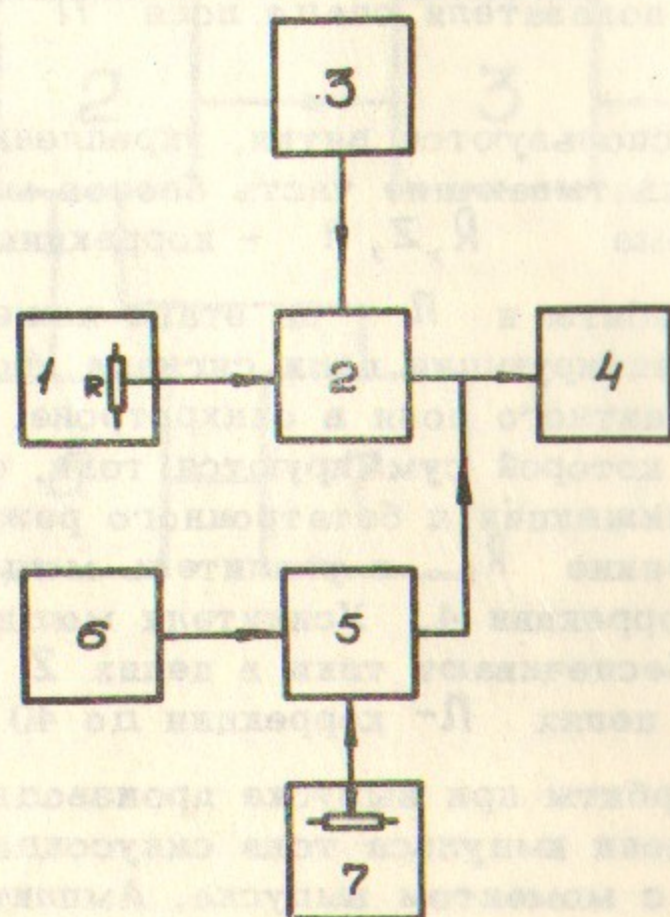


Рис.10. Блок-схема R, z, n - коррекции.

1 - Схема формирования сигнала при инжекции, 2 - усилитель мощности, 3 - источник питания, 4 - витки коррекции в синхротроне, 5 - тиристорный генератор, 6 - синхронизирующее устройство, 7 - источник питания.

65 кв. Для уменьшения заброса пучка дефлектором одновременно с расширением орбиты происходит искажение медианной плоскости таким образом, чтобы орбита перед выпуском была вблизи "ножа" выпускного магнита. Такое искажение осуществляется с помощью короткого (в азимутальном направлении) магнита в промежутке, диаметрально противоположном выпускному.

Если радиальное магнитное поле, создаваемое магнитом, искажающим медианную плоскость, представить в виде

$$h(\varphi) = \begin{cases} h_0 & \text{при } -\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0 \\ 0 & \text{при } -\pi \leq \varphi \leq -\varphi_0 \\ & \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi \end{cases}$$

где  $h_0$  - поле в магните,  $2\varphi_0$  - азимутальная протяженность его, то искаженная орбита имеет вид:

$$z(\varphi) = \frac{h_0 \Pi_0 R}{\pi H} \left\{ \frac{\varphi_0}{\sqrt{2}} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\varphi_0 \cdot \sin k\varphi}{k(\sqrt{2}^2 - k^2)} \right\}$$

Здесь  $H$  - поле на орбите,  $\Pi_0 = 1 + \frac{L}{2\pi R}$

Смещение орбиты от середины камеры в районе отклоняющего магнита:

$$z(0) = -0,46 \frac{h_0 l}{H}$$

в районе дефлектора:

$$z\left(\frac{\pi R \Pi_0}{2}\right) = 0,38 \frac{h_0 l}{H}$$

в районе выпускного магнита:

$$z(\pi R \Pi_0) = 0,87 \frac{h_0 l}{H}$$

( $l$  - длина магнита вдоль орбиты).

Наклон орбиты в районе дефлектора:

$$z\left(\frac{\pi R \Pi_0}{2}\right) = 0,41 \cdot 10^{-2} \frac{h_0 l}{H} \quad (\text{радиан})$$

Толщина магнита  $l = 2,5$  см. Восьмивитковая обмотка питается током, возникающим при разряде конденсаторной батареи через трансформатор. Длительность импульса тока около 200 мксек.

### ПОТЕРИ НА ИЗЛУЧЕНИЕ

При энергии 500 Мэв становятся существенными потери на излучение (5,5 кэв на оборот). Поэтому после выключения В.Ч. радиус орбиты будет меняться по закону:

$$\left(\frac{R}{R_0}\right)^{1-n} = \left[1 - \frac{W(t-t_0)}{E_0}\right] \frac{\cos \omega t_0}{\cos \omega t}$$

Здесь  $R_0$  - радиус равновесной орбиты перед выключением В.Ч.,  $E_0$  - энергия в момент выключения В.Ч.,  $W$  - мощность потерь на излучение,  $t_0$  - момент выключения В.Ч. При этом предполагается, что мощность потерь на излучение остается постоянной.

Пучок попадает в дефлектор в момент:

$$t_1 = \frac{\frac{W}{\omega E_m} + \sqrt{\frac{W^2}{\omega^2 E_m^2} + 2 \left[1 + (1-n) \frac{\Delta R}{R_0}\right] \left[(1-n) \frac{\Delta R}{R_0} - \frac{W}{E_m} t_0 + \frac{\omega^2 t_0^2}{2}\right]}}{\omega \left[1 + (1-n) \frac{\Delta R}{R_0}\right]}$$

$$(\Delta R = R_{\text{выпуска}} - R_0).$$

Оптимальный момент выключения В.Ч., при котором энергия выпущенных электронов максимальна, получим, положив  $\frac{\partial t_1}{\partial t} = 0$ :

$$t_{0 \text{ опт}} = \frac{W}{\omega E_m}; \quad t_{1 \text{ опт}} = \frac{\frac{W}{\omega E_m} + \sqrt{2(1-n) \frac{\Delta R}{R_0} \left[1 + (1-n) \frac{\Delta R}{R_0} - \frac{W^2}{2\omega^2 E_m^2}\right]}}{\omega \left[1 + (1-n) \frac{\Delta R}{R_0}\right]}$$

и энергия выпущенных электронов:

$$E_{\text{вып}} = E_m \left[1 + (1-n) \frac{\Delta R}{R_0}\right] \cos \omega t_{1 \text{ опт}}$$

Нестабильность амплитуды магнитного поля приводит к неустойчивости энергии электронов на радиусе выпуска при фиксиро-

ванной энергии в момент выключения В.Ч.:

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{вып}} = \frac{(ctg \omega t_1 - ctg \omega t_0) W \cdot \Delta H_m}{\omega E_{\text{вып}} H_m} \approx \frac{W(t_1 - t_0)}{\omega^2 t_1 t_0 E_{\text{вып}}} \cdot \frac{\Delta H_m}{H_m}$$

### СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ И НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ПУЧКОМ

Специальная система синхронизации / 12 / обеспечивает определенную последовательность включения всех элементов установки. Она же подаёт команду на выключение В.Ч. в момент, когда энергия электронов достигает заданного значения, а также команды на включение элементов канала, соединяющего Б-4 и ВЭПП-3. На рис. 11 показана форма основных импульсов элементов синхротрона и очередность их следования.

Измерение геометрических параметров пучка в синхротроне производится с помощью дистанционно управляемых пробников в виде тонких пластин. Некоторые из них покрыты порошком сернистого цинка, что даёт возможность визуально наблюдать размер и положение пучка с помощью телевизионной установки ПТУ-102. Ток в пучке измеряется индукционным датчиком с чувствительностью 1 мв/ма. Кроме того, в синхротронном режиме ток измеряется пикап-электродом.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К настоящему времени первый этап работ на синхротроне завершен. Получен ток ускоренных электронов 500 ма, максимальная энергия 270 Мэв, выпущенный ток - до 300 ма в импульсе. Такие параметры пучка обеспечивают настройку накопителя ВЭПП-3. На рис. 12 приведена осциллограмма ускоренного тока, а на рис. 13 осциллограмма тока, выпущенного из синхротрона. Дальнейшее повышение энергии ускоренных частиц ограничено электрическим пробоем с токоведущих шин на железо электромагнита. Пробой происходит при напряжении 1,5 кв, хотя оценки показывают, что зазор 1,5 мм при вакууме  $10^{-5}$  торр должен выдерживать напряжение не менее 2,5 - 3 кв. В настоящее время ведутся работы по выяснению и устранению причин пробоя.

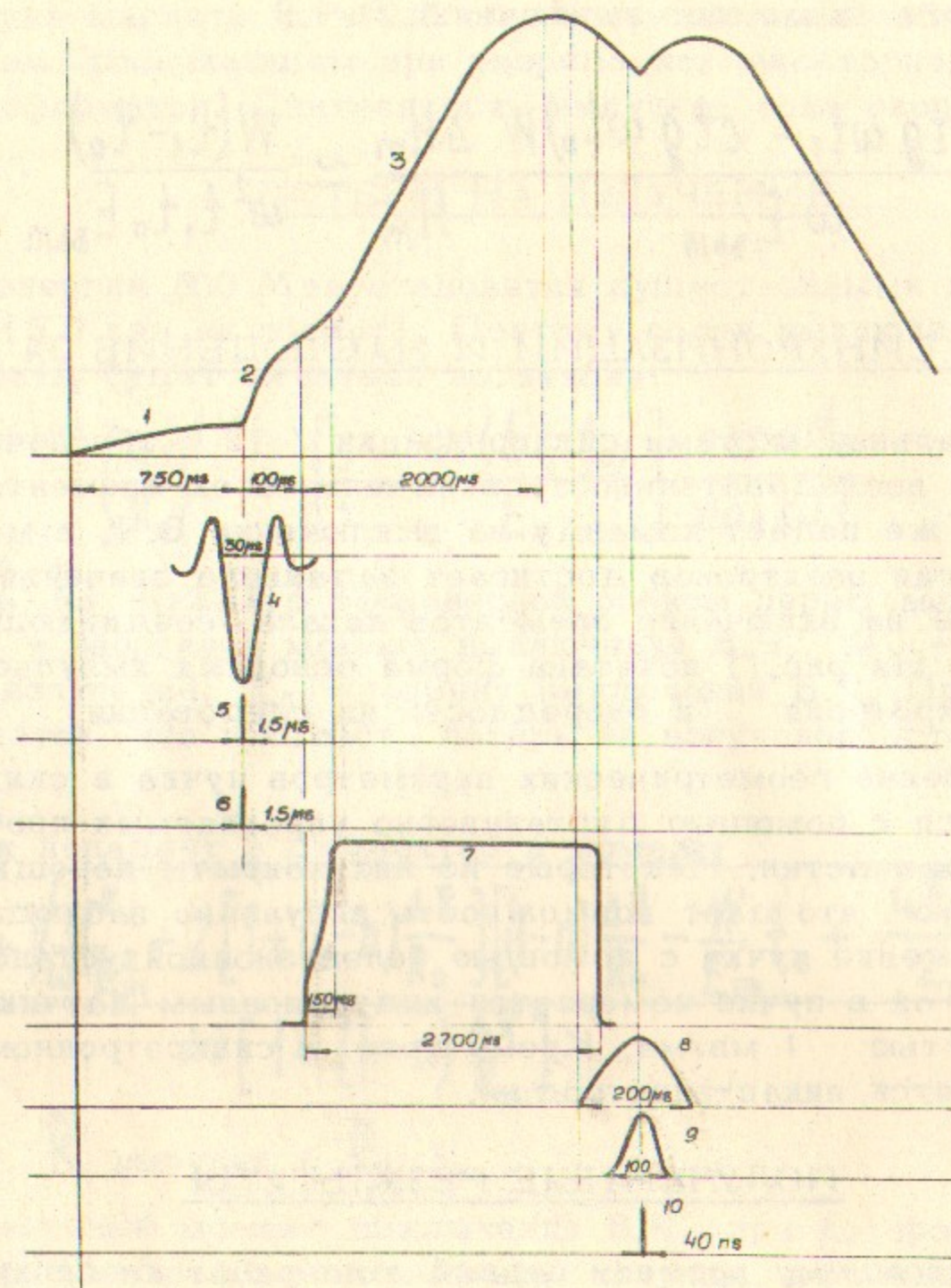


Рис.11. Основные импульсы элементов синхротрона.  
 1 - магнитное поле инъекции, 2 - поле во время бетатронного ускорения, 3 - основное магнитное поле, 4 - напряжение на ускорительной трубке ЭЛИТ-3, 5 - импульс тока инъекции, 6 - напряжение на сердечнике накопителя, 7 - напряжение на ускоряющем резонаторе, 8 - поле в магните, искажающем медианную плоскость, 9 - магнитное поле выпускного магнита, 10 - напряжение на пластинах дефлектора.

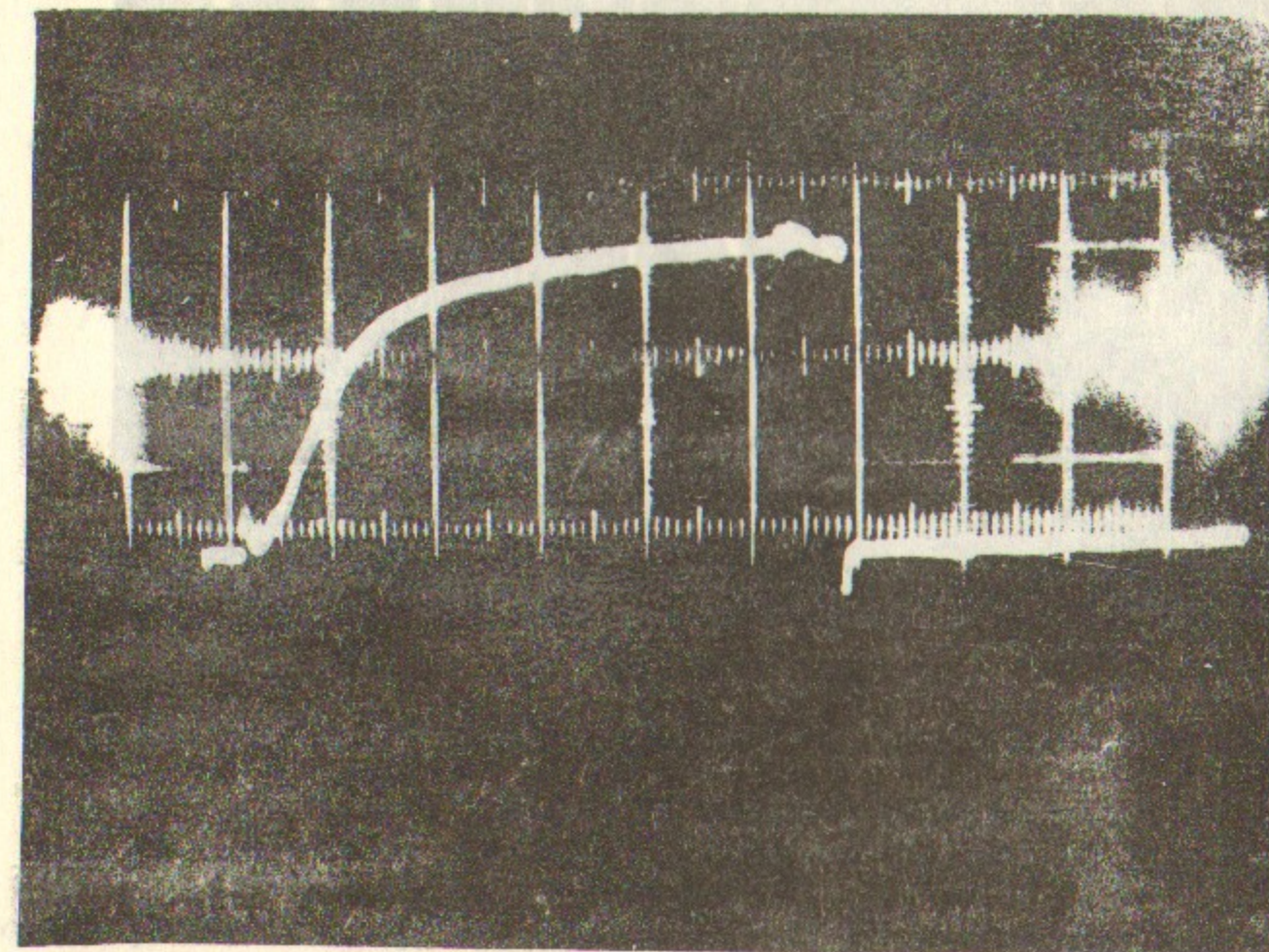


Рис.12. Ускоренный ток, сигнал с пикап-электрода.

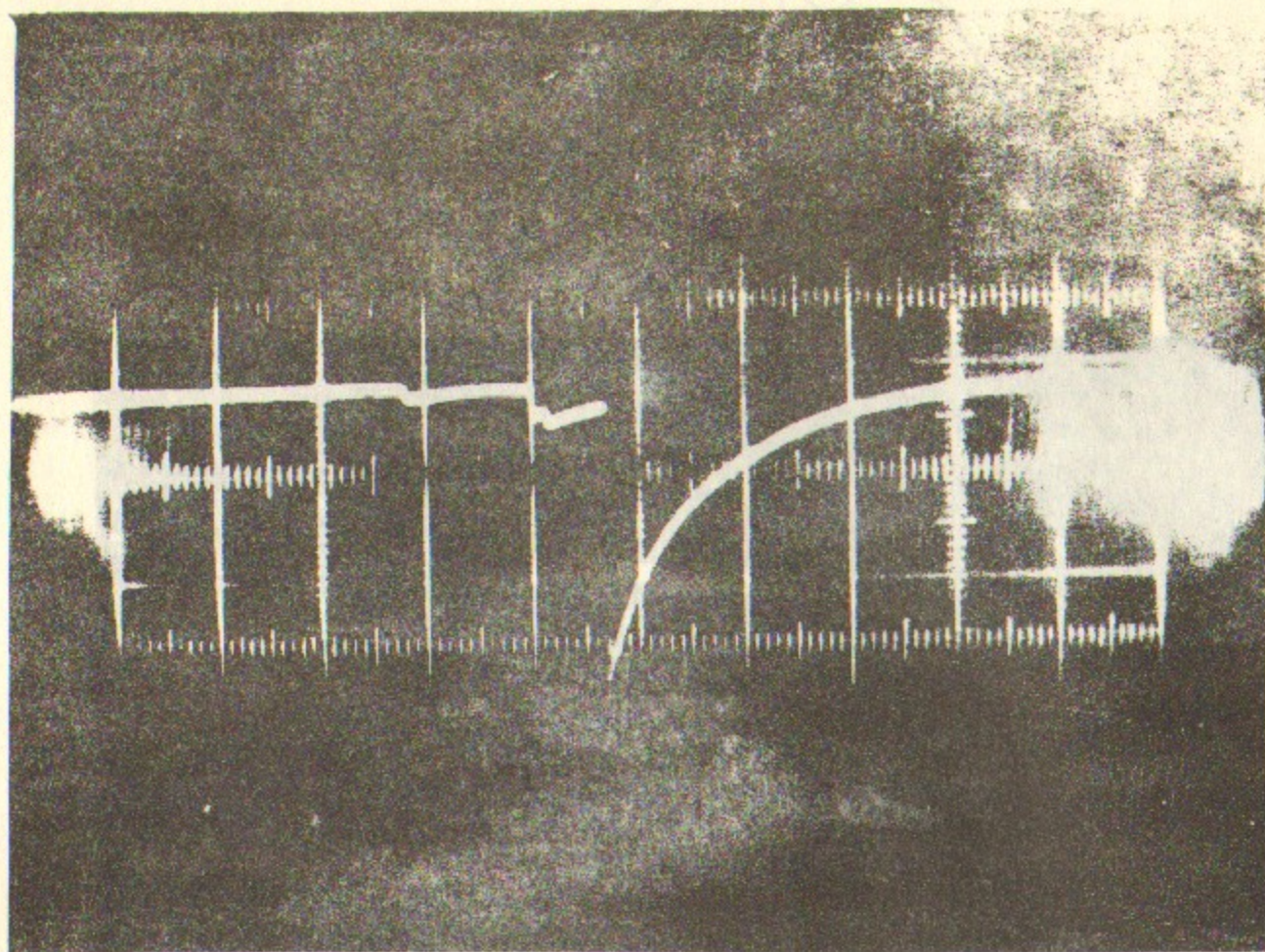


Рис.13. Выпущенный ток, сигнал с индукционного датчика.

Величина ускоренного тока ограничена неустойчивостями, которые развиваются в пучке. Основные потери частиц происходят во время инжекции. При накопленных токах больше 1,5-2 а пучок теряется за время порядка 5 мксек после впуска, в то время как при малых токах ( $\sim 100$  ма) потерь практически нет. Параллельно с работой накопителя ведутся работы по выяснению причин возникновения неустойчивостей в пучке и возможности их ликвидации. Кроме того, для повышения ускоренного тока предполагается увеличить энергию инжекции.

## ЛИТЕРАТУРА

- / 1 / - Г.И.Будкер и др. Доклад на Международной конференции по ускорителям высоких энергий. Кембридж, 1967г.
- / 2 / - Г.И.Будкер и др. Доклад на Международной конференции по ускорителям. Ереван, 1969 г.
- / 3 / - Е.А.Абрамян и др. Доклад на VII межвузовской конференции по электронным ускорителям. Томск, 1968 г.
- / 4 / - Е.А.Абрамян и др. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна. 1963, Атомиздат, М., 1964, с.1065.
- / 5 / - Г.И.Будкер и др. Атомная энергия, 20, вып.3, 206 (1966).
- / 6 / - В.И.Бобрик и др. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1968, Атомиздат, М., 1970, с.500.
- / 7 / - Т.А.Всеволожская и др. Одновитковый импульсный магнит. Препринт ИЯФ, Новосибирск, 1968 г.
- / 8 / - Л.А.Данилов и др. Авторское свидетельство № 212394.
- / 9 / - А.Д.Букин. Элементы спирального накопления синхротрона Б-4. Дипломная работа, ИЯФ, Новосибирск, 1969г.
- / 10 / - В.А.Борисов и др. ПТЭ, № 4, 1963 г.
- / 11 / - Б.И.Гришанов и др. Система быстрой коммутации заряженных частиц установки со встречными пучками Б-4-ВЭПП-3. Препринт ИЯФ, Новосибирск, 1969 г.
- / 12 / - В.И.Нифонтов и др. Доклад на II Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1970г.



Ответственный за выпуск В.И.Купчик

Подписано к печати 18.3.71.

Усл. 1,4 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно.

Заказ № 21 . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротаприфте в ИЯФ СО АН СССР , нв.