

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт 61

Всеволожская Т.А., Пакин В.Н., Сильвестров Г.И.

**Впускные магниты
электронно-позитронного
накопителя ВЭПП-2**

НОВОСИБИРСК 1966

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается безжелезный магнит, осуществляющий ввод позитронного и электронного пучков в накопительную дорожку. Магнит представляет собой изогнутый плоский коаксиал, питающийся импульсом тока специальной формы длительностью 100 мсек и амплитудой более 200 ка, стабильной от импульса к импульсу не хуже 0,1%. Наружная стенка - "нож", отделяющая область рабочего поля магнита от апертуры накопителя, имеет на конце толщину 2 мм, амплитуда внешнего поля ниже 0,2%. Приводится расчет внешних полей и результаты эксперимента по влиянию внешнего поля магнита на процесс накопления.

І. В В Е Д Е Н И Е

При решении задачи впуска (выпуска частиц) в современной ускорительной технике получил развитие метод ввода (вывода) пучка в рабочее поле с помощью специальных импульсных магнитов, расположенных в непосредственной близости к рабочей апертуре ускорителя. Область импульсного поля магнита и рабочая область ускорителя разделены тонкой стенкой, которую мы называем "ножом" магнита ("septum" в иностранной литературе, откуда и весь магнит принято называть septum-магнитом / 1, 2 /). Общим критерием применимости таких магнитов является малая величина внешних полей, не приводящая к существенному возмущению движения пучка в ускорителе, при минимальной толщине ножа для обеспечения максимальной эффективности инжекции.

Обычно septum-магниты располагаются в линейном промежутке ускорителя в области нулевого поля и имеют шихтованный магнитопровод. В рейстраке накопителя ВЭШ-2 / 3 /, ввиду малой абсолютной длины линейного промежутка, впускные магниты расположены в области достаточно больших полей накопителя и поэтому могут быть лишь безжелезными. Малая величина внешних полей ($\sim 0,1\%$ от поля в апертуре) при толщине ножа 2 мм достигается коаксиальной конструкцией^{ж)} и малой длительностью (~ 100 мсек) импульса питающего тока. Поле создается импульсом тока специальной формы с амплитудой более 200 ка, стабилизированной с точностью $\pm 0,1\%$. Магнит расположен в камере предварительного вакуума (рис. 1) и отделен от сверхвысокого вакуума накопителя тонким кожухом (1) из нержавеющей стали. Ввод пучка в камеру осуществляется через окно, закрытое титановой фольгой толщиной 0,05 мм.

ІІ. К О Н С Т Р У К Ц И Я

Конструктивно магнит представляет собой изогнутый медный коаксиал (рис. 1) прямоугольного сечения 150×80 мм² со съемной нижней крышкой (2). Внутренняя шина (3) сечением 100×15 мм²

^{ж)} Коаксиальной конструкцией мы называем систему, в которой шина с током одного знака полностью охватывается шиной с током другого знака.

через изолирующие стойки из стеатита ^{ж)} (4) крепится к нижней крышке корпуса (5) и обрабатывается совместно и за одну установку с её посадочными поверхностями. Такое крепление внутренней шины позволяет выдержать апертуру с минимальными допусками, выполнимыми при станочной обработке. Один торец корпуса закорочен, на втором осуществляется подвод тока плоскими шинами, переходящими в вакуумно уплотненный коаксиальный токоподвод (6). Для входа и выхода пучка в толстых торцевых стенках (7) сделаны прямоугольные отверстия размером в апертуру $25 \times 40 \text{ мм}^2$, стенки которых за счет скин-эффекта осуществляют формирование провисающих краевых полей. На конце наружная стенка корпуса - нож имеет толщину 2 мм. Радиус магнита 75 см, угол поворота 35° . При энергии частиц $E = 200 \text{ МэВ}$ поле должно быть $8,9 \text{ кэВ/см}$, необходимый для этого ток составляет 220 ка. Все разборные контактные соединения на такие токи выполнены путем разжатия между контактными поверхностями отожженной медной проволоки $\phi 0,2 \text{ мм}$. Благодаря малой эффективной длине волны деформация тонкой стенки - ножа при давлении 4 атмосферы не превышает 0,1 мм.

Непрерывная эксплуатация магнитов без профилактических переборок в течение 1 года в режиме 10^6 импульсов в месяц показала надежность контактных и силовых соединений созданной конструкции.

III. ВНУТРЕННИЕ ПОЛЯ

Впускной магнит является одним из элементов электронно-оптической схемы, осуществляющей транспортировку пучка в накопитель. Согласно оптической схеме он должен иметь показатель спада поля $n = 1$, что задается соответствующим профилированием внутренней и наружной шин. Отношение радиальной апертуры a к высоте внутренней шины, определяющее качество формирования поля, выбрано равным $1/4$. Такое соотношение, хорошо удовлетворяющее условию формирования поля в случае двух параллельных шин, в нашей геометрии является недостаточным. Действительно, с точки зрения формирования поля наружная шина при достаточно высокой частоте эквивалентна системе шин, полученных отражением внутренней шины от плоскостей наружной, так

^{ж)} Предусмотрена возможность нагрева магнита до 120° при прогреве камеры накопителя.

что минимальное расстояние между шинами с током обратного знака оказывается равным $2a$. Это приводит к завышенному показателю спада поля, который, как показали измерения, в основной части апертуры равен $n = 1,3 \pm 0,1$.

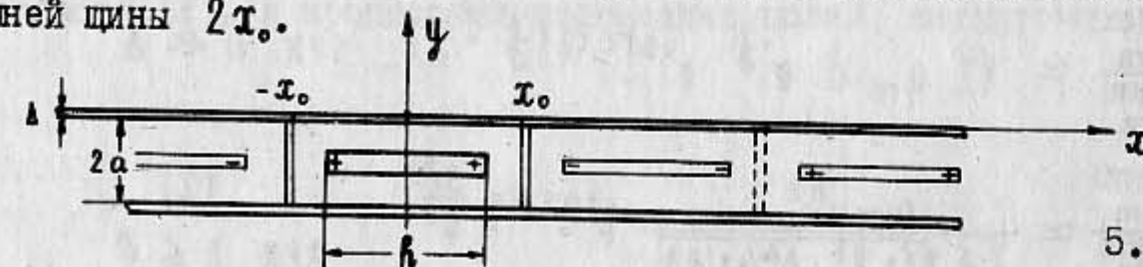
Поскольку, высота внутренней шины определяет эффективность магнита (соотношение между полем и током), то увеличение её нежелательно, так как влечет за собой усложнение системы питания. Другой путь исправления формы поля - посредством шиммирования нами не применялся, поскольку, отличие фокусирующих свойств магнита от расчетных может быть скомпенсировано соответствующей настройкой других оптических элементов.

В импульсных магнитах специального внимания требует формирование краевых полей, поскольку при провисании силовых линий в отверстия торцевых шин возникают дополнительные поперечные составляющие поля, приводящие к абберациям. Этот эффект ликвидируется созданием формирующих экранов, являющихся продолжением поверхности токовых шин на расстояние порядка вертикальной апертуры. В данном случае ими служат стенки входного и выходного прямоугольных отверстий в специально толстых торцевых шинах.

IV. ВНЕШНИЕ ПОЛЯ

Коаксиальная конструкция в общем случае не устраняет полностью внешних полей, за исключением тех геометрий, где наружная и внутренняя шины по форме совпадают с эквипотенциальными поверхностями одного и того же поля (круглый коаксиал, коаксиал из двух софокусных эллипсов). В любой другой геометрии имеются внешние поля, величина которых определяется геометрией и частотой питающего тока.

В нашем случае величину внешних полей можно получить, рассматривая шину с током I_0 , помещенную между двумя бесконечными плоскостями, по каждой из которых течет ток $I = -\frac{I_0}{2}$ (предельный случай нашей геометрии при стремлении к бесконечности высоты внешней шины $2x_0$).



Продольная составляющая поля снаружи такой системы $H_x^{(ex)}(x, y)$ имеет вид:

$$H_x^{(ex)}(x, y) = 2 \int_0^{\infty} H_q^{(ex)} \cdot \cos qx \cdot e^{-qy} \cdot dq$$

и компоненты её $H_q^{(ex)}$ связаны с компонентами разложения в интеграл Фурье продольной составляющей внутреннего поля у поверхности внешней шины $H_x^{(in)}(x) = 2 \int_0^{\infty} H_q^{(in)} \cdot \cos qx \cdot dq$

соотношением
$$H_q^{(ex)} = \frac{q \cdot H_q^{(in)}}{q \cdot \cos \Delta \cdot \sqrt{k^2 - q^2} - \sqrt{k^2 - q^2} \cdot \sin \Delta \cdot \sqrt{k^2 - q^2}}$$

где Δ — толщина наружной шины, $K = \frac{1+i}{\delta}$ — постоянная вихревых

токов и δ — толщина скин-слоя в ней. Коэффициент перед $H_q^{(in)}$ в общем случае комплексный и может быть представлен в виде $H_q^{(ex)}/H_q^{(in)} = Q_q \cdot e^{-i\varphi_q}$. Влияние боковых стенок в том слу-

чае, когда им нельзя пренебречь (примерно при $2x_0 < a + h$, где h — высота внутренней шины, $2a$ — высота боковых стенок), учитывается путем отражения от них внутренней шины. Тогда в разложении полей остаются лишь гармоники с $q = q_m = \frac{(2m+1) \cdot \pi}{2x_0}$, из кото-

рых нас интересуют только первые две или три, так как остальные во внешнем поле быстро спадают с расстоянием. Очевидно, что отражение внутренней шины от стенок наружной справедливо при достаточно высоких частотах, таких что $\delta \ll x_0$. При этом для первых гармоник выполняется соотношение $q^2 \ll 2/\delta^2$, так что $\sqrt{k^2 - q^2} \approx k$, и

коэффициент преобразования их во внешней стенке упрощается к виду:

$$\frac{H_m^{(ex)}}{H_m^{(in)}} \approx \sqrt{2} \cdot q_m \cdot \delta \cdot e^{-\frac{\Delta}{\delta}} \cdot e^{i \arctg(\frac{\Delta}{\delta} + \frac{\pi}{4})} \quad \text{при } \delta \ll \Delta$$

$$\frac{H_m^{(ex)}}{H_m^{(in)}} \approx \frac{q_m \cdot \delta^2}{2 \Delta \sqrt{1 + 2^5 \cdot \Delta^4 / 6! \cdot \delta^4}} \cdot e^{i \arctg \frac{3\delta^2}{\Delta^2}} \quad \text{при } \Delta \lesssim \delta$$

6.

Второе ограничение на справедливость рассматриваемого решения в случае конечной высоты внешней шины состоит в том, что экспоненциальный спад поля с расстоянием от ножа, следующий из выражения

$$H_x^{(ex)}(x) = \sum_{m=0}^{\infty} H_m^{(ex)} \cdot \cos \frac{(2m+1)}{2x_0} \cdot \pi x \cdot e^{-\frac{(2m+1) \cdot \pi y}{2x_0}} \quad (3)$$

имеет место только на малых расстояниях $y \ll x$. На больших расстояниях поле спадает быстрее примерно в

$$\sqrt{1 + (2a+z) \cdot z / a x_0} \quad (4)$$

раз. Для нахождения величины внешнего поля по формулам (2) и (3) должна быть использована близкая к истинной функция $H_x^{(in)}(x)$ у поверхности наружной шины. Однако, для оценок с точностью $1,5+2$ можно считать, что эта функция равна постоянной величине H_0 , равной рабочему полю в апертуре магнита, если высота наружной шины не очень велика по сравнению с внутренней ($2x_0 \leq a + h$). В нашем случае функция $H_x^{(in)}(x)$ у поверхности наружной шины интерполируется трапецией с основаниями $2x_0$ и h , и расчет дает хорошее совпадение с опытными данными, как величины поля, так и спада его с расстоянием (с учетом поправки (4)) (рис. 2). Зависимость внешнего поля от частоты и от толщины наружной шины с хорошей точностью описывается правыми частями выражений (2), поскольку $H_x^{(in)}(x)$, а значит и $H_m^{(in)}$ мало зависят от этих параметров.

Наиболее эффективным способом уменьшения внешнего поля является увеличение частоты тока. Уменьшение поля за счет изменения геометрии может быть достигнуто путем одновременного увеличения высоты внутренней и наружной шин. Внешнее поле при этом падает как $1/h$, но в этом же отношении падает эффективность магнита, что делает этот путь нежелательным.

При питании однополярным импульсом тока, форма импульса внешнего поля определяется импульсом внутреннего, сдвинутым по фазе согласно (2), и процессами релаксации полей, затянутых в скин-

7.

слоях токовых поверхностей после окончания тока. Более выгодным является питание двуполярным импульсом из-за вычитания релаксационных "хвостов" прямого и обратного полупериодов.

На рис. 2 приведены осциллограммы импульса внешнего поля в разных точках над поверхностью поля на расстоянии 5 мм от него при питании магнита однополярным (сплошные кривые) и двуполярным (пунктирные кривые) импульсом тока при длительности первого полупериода 140 мсек и 620 мсек. Форма второго полупериода мало влияет на картину внешнего поля и выбирается из соображений упрощения системы питания (см. импульс тока на рис. 3). Воздействие на частицу определяется интегралом от внешнего поля по траектории, который берется в той фазе, где его значение максимально.

Критичность процесса накопления к амплитуде внешнего поля в нашем накопителе в большой степени определяется принятым у нас вариантом однооборотной инжекции с раскачкой ранее накопленного пучка. Инжектируемый пучок вводится на равновесном радиусе параллельно медленной плоскости в нижнюю часть камеры, так что верхняя стенка впускного магнита ограничивает снизу вертикальную апертуру $A_z = 37$ мм. Импульс инфлектора, расположенного в районе пересечения впускаемым пучком медианной плоскости, уменьшает амплитуду его колебаний, раскачивая при этом на ту же величину ранее накопленный пучок. Величину удара инфлектора удобно характеризовать амплитудой раскачки накопленного пучка β в единицах апертуры. Очевидно, что β не может быть больше 1. Эффективность захвата быстро растет с увеличением удара от 0 при $\beta = \frac{\Delta}{A_z}$ и близка к максимальной при $\beta = \frac{\Delta + Z_0}{A_z}$, где Δ - толщина ножа, Z_0 - размер впускаемого пучка. Рабочее значение раскачки выбирается как оптимальное из соображений пренебрежимо малых потерь основного пучка и наилучшего захвата впускаемого. В данном случае оно составляет $\beta \approx 0.7$, так что накопленный пучок попадает в область, достаточно близкую к ножу впускного магнита. Это может привести к небольшим относительно накопленного, но большим относительно впускаемого пучка потерям частиц. Влияние внешнего поля магнита на накопленный пучок при раскачке его инфлектором проверялось по изменению его времени жизни с включенным и выключенным магнитом при разных величинах интеграла внешних полей. Результаты этого эксперимента сведены в таблицу I, где $\int H(t) dt$ дан в относительных единицах.

ТАБЛИЦА I

$\int H(t) dt$	β	τ без магнита / τ с магнитом
910	0,8	выбивание накопленного пучка
350	0,8	4,2
130	0,8	1,3
130	0,7	~ 1,05
100	0,7	1,0

При толщине ножа (по меди) равной 2 мм внешнее поле, не влияющее на процесс накопления ($\int H(t) \cdot dt = 100$), получается при питании магнита импульсом с длительностью 130 мсек - прямой полупериод, 400 мсек - обратный полупериод.

У. ПИТАНИЕ МАГНИТОВ

Чтобы обеспечить указанные выше параметры импульса тока потребовалась разработка специальной системы питания. Магнит питания через импульсный кабельный трансформатор (конструкция приведена на рис. I), обмотка которого выполнена высокочастотным кабелем РК-50^{1/3}. Кабель мотается на тороидальный сердечник (9) из шихтованного железа так, что его непрерывная центральная шина (10) образует 36 витков (с выводом посередине) первичной обмотки, в то время как оплетка разрывается на каждом витке и подключается к двум токосборным кольцам (12), образуя один виток вторичной обмотки. Такая конструкция обеспечивает динамическую уравновешенность обмоток и максимальное потокосцепление, так как индуктивность рассеяния определяется только потоком, замыкающимся вокруг внутренней жилы и не связанным с соседними витками, т.е. просто индуктивностью кабеля заданной длины. Приведенная ко вторичной обмотке индуктивность рассеяния составляет в нашем случае 4 см. Из конструктивных соображений трансформатор расположен на расстоянии 1,2 м от магнита и соединен с ним малоиндуктивным многослойным то-

коподводом, в котором шины с прямым и обратным током чередуются между собой. Малая индуктивность токоподвода обусловлена тем, что шины имеют толщину меньше скин-слоя, так что объем поля определяется в основном изоляцией, толщина которой сведена к минимуму, а многослойность обеспечивает малую величину поля и плотности токов в шинах. Индуктивность токоподвода при нашей геометрии менее 1 см на метр длины.

При индуктивности самого магнита $L_m = 60$ см, индуктивность всей вторичной цепи, включая рассеяние трансформатора составляет 70 см, причем из 10 см паразитной индуктивности половина сосредоточена в переходах с токоподвода на магнит и трансформатор.

Первичная обмотка питается током от импульсного генератора на водородных тиратронах ТИ-1-2500/35 (рис. 3). Накопительная емкость $C_1 = 9 \mu\text{F}$ разряжается на нагрузку через 6 тиратронов, параллельная работа которых обеспечивается компенсирующими реакторами (R_1, \dots, R_6). Перезарядка емкости, создающая обратный полупериод тока через магнит, осуществляется через два тиратрона (T_7, T_8), так как с включением в перезарядную цепь дросселя D_1 амплитуда тока уменьшается.

Для упрощения допусков на синхронизацию момента пролета частиц и максимума поля производится коррекция импульса тока пятой гармоникой (контур $L_2 C_2$) создающая плоскую (с точностью 0,1%) вершину импульса тока в пределах ± 10 мсек. Форма импульса тока приведена на рис. 3. При токе в нагрузке 220 ка амплитуда тока в первичной цепи 6,1 ка, напряжение на рабочей емкости $U_c = 20$.

Необходимая стабильность амплитуды тока ($\pm 0,1\%$) обеспечивается стабилизацией напряжения на емкости, которая осуществляется по способу порционного сброса заряда через тиратрон T_9 с применением управляемого вентиля T_{10} в зарядной цепи для быстрой работы стабилизатора на частотах до 10 гц. Принцип работы стабилизатора ясен из схемы рис. 3. После быстрой зарядки до определенного уровня тиратрон T_{10} запирается и на емкости C_1 вплоть до начала рабочего цикла поддерживается пульсирующее напряжение с амплитудой пульсаций, равной отношению емкостей $\frac{\Delta U}{U_c} = \frac{C_3}{C_1} = 5 \cdot 10^{-4}$, которая и определяет точность стабилизации напряжения.

При этом колебания амплитуды тока, вызванные медленными уходами параметров контура R, L и C в течение многих часов не превышают $\pm 0,1\%$.

В разработке впускных магнитов и их систем питания на разных этапах работы принимали участие: Миронов Е.С., Трахтенберг Э.М. Ильин А.В., Данилов Л.Л., Баянов Б.Ф., Панов А.П.

Авторы выражают благодарность Скринскому А.Н. за постоянный интерес к работе и Протопопову И.Я. за ряд полезных обсуждений.

Л и т е р а т у р а

- / 1 / - M. Giesch, ... Nucl. Instr. and Meth., 20, 58, 1963
- / 2 / - H. Bruck, Intern. Conf. on High Energy Accel., p. 288
Dubna, 1963
- / 3 / - В.Л. Ауслендер и др. "Атомная энергия", 19, 502 (1965).

Подписи к рисункам

Рис.1 Впускной магнит с токоподводом и трансформатором.

- 1 - кожух из нержавеющей стали,
- 2 - нижняя крышка наружной шины,
- 3 - внутренняя шина,
- 4 - опоры из стеатита,
- 5 - наружная шина,
- 6 - коаксиальный токоподвод,
- 7 - торцевые шины,
- 8 - нож магнита,
- 9 - тороидальный магнитопровод трансформатора,
- 10 - первичная обмотка - внутренняя жила кабеля,
- 11 - вторичная обмотка - оплётка кабеля,
- 12 - токосборные кольца.

Рис.2 Осциллограммы внешнего поля на расстоянии 5 мм от поверхности ножа при разных длительностях импульса тока. Сплошные кривые - при питании магнита одним полупериодом тока, пунктирные - двумя полупериодами. Кривые 1,2,3,4 соответствуют точкам на расстоянии 2,4,6 и 8 см от края магнита соответственно. В правом верхнем углу приведена кривая спада поля с расстоянием от ножа: —●— экспериментальная кривая, ⊙ расчетные точки.

Рис.3 Принципиальная схема генератора впускных магнитов и стабилизатора. Приведена форма импульса тока в нагрузке.

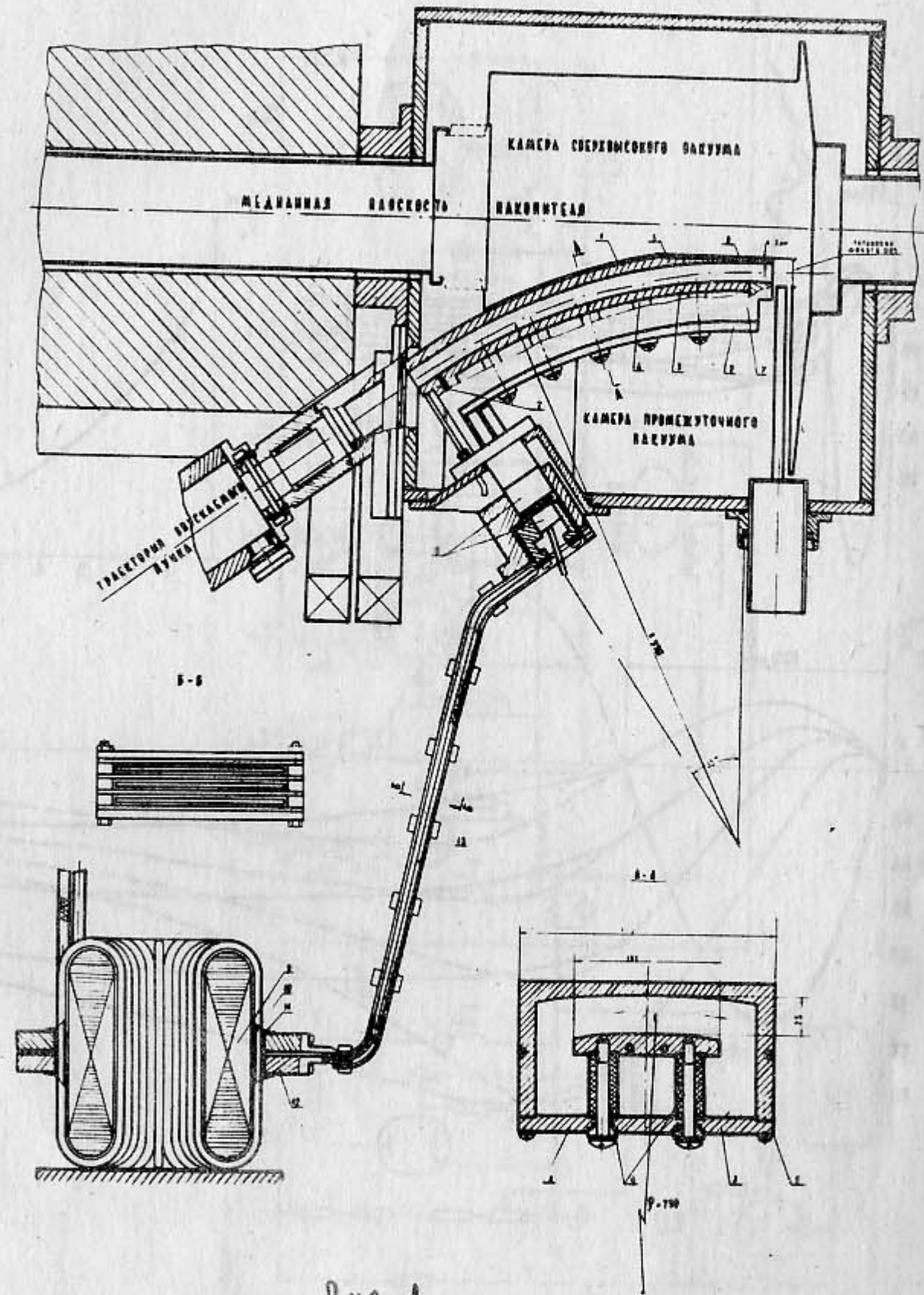


Рис. 1

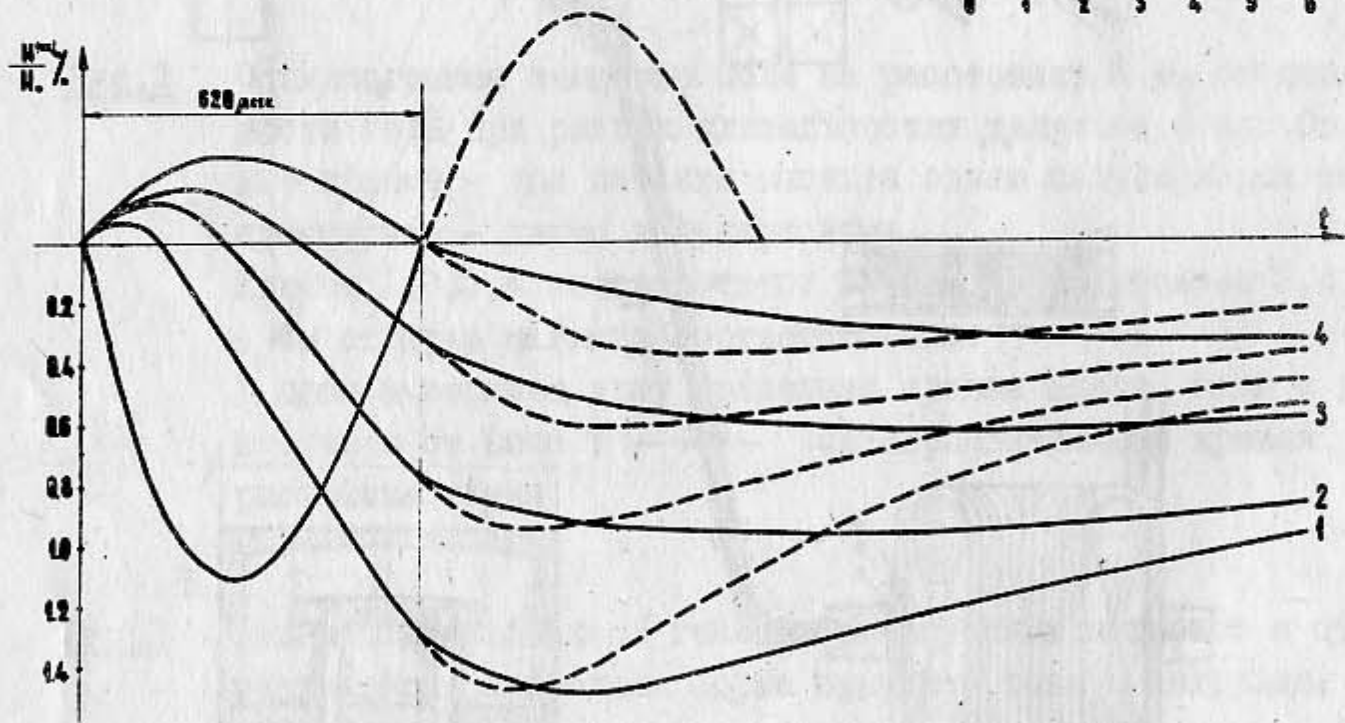
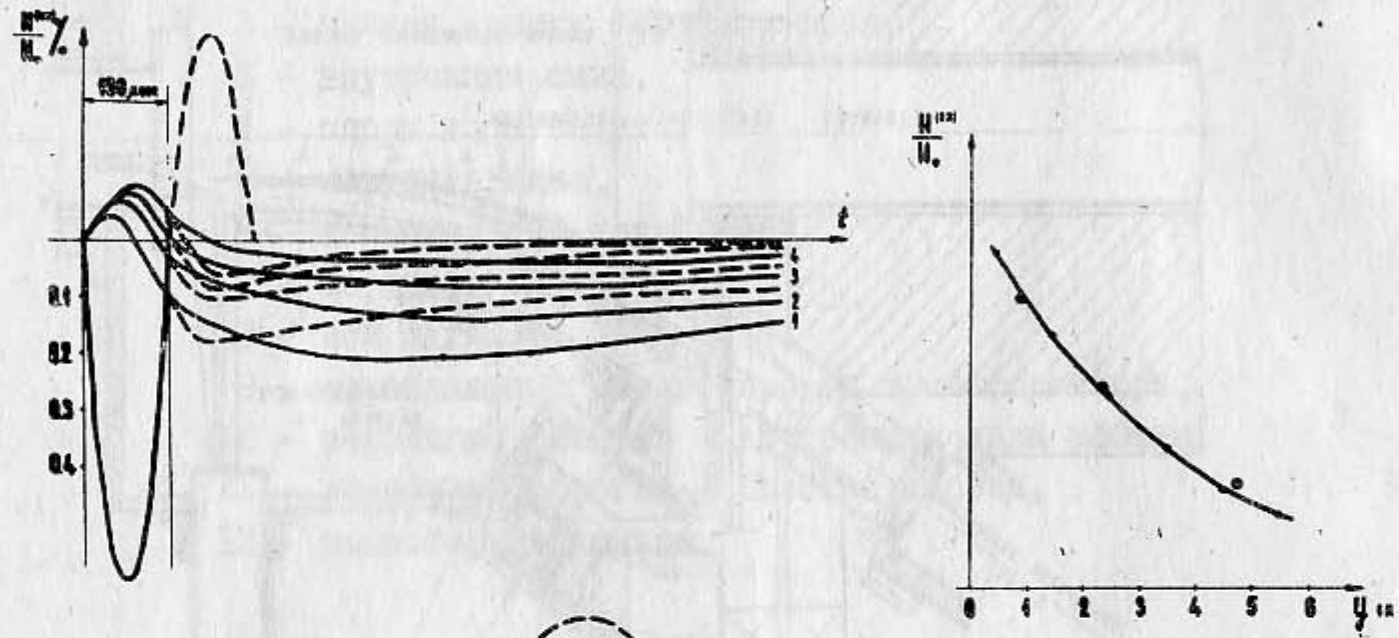


Рис. 2

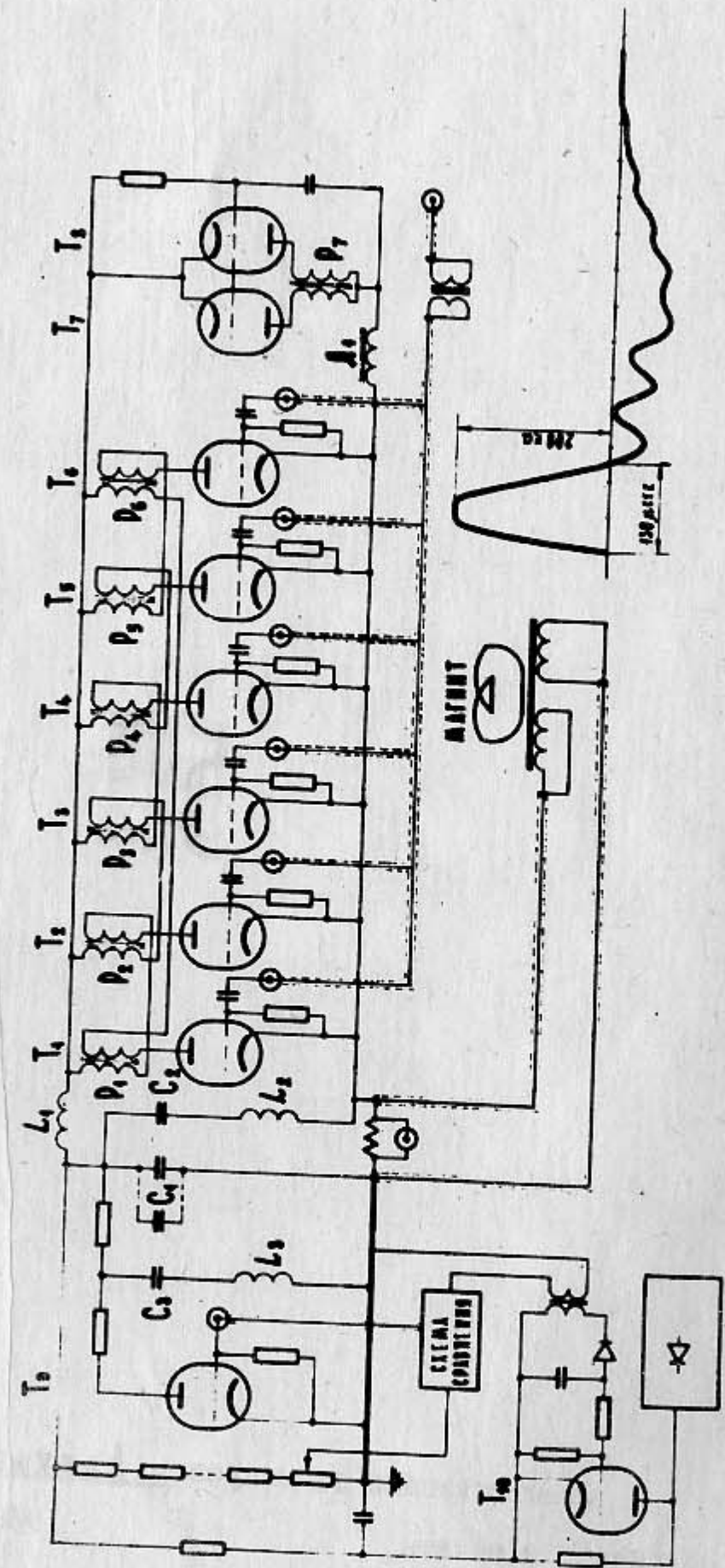


Рис. 3