

28

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

В.Л. Ауслендер, С.В. Кузьмин, Р.М. Лапик

«Flat-top-устройства синхротрона
Б-5»

ПРЕПРИНТ 82 - 35



Новосибирск

В.Л.Ауслендер, С.В.Кузьмин, Р.М.Лапик

FLAT-TOP- УСТРОЙСТВА СИНХРОТРОНА Б-5

АННОТАЦИЯ

Описываются устройства формирования плоских участков во временной зависимости тока магнита (*flat-top* - устройства) резонансной системы питания электромагнита синхротрона Б-5. Рассматриваются электромагнитные и волновые процессы, сопровождающие работу устройств формирования "плато" инжекции и выпуска заряженных частиц.

О г л а в л е н и е

Введение	4
I. Система питания электромагнита синхротрона Б-5	5
II. "Плато" инжекции	7
III. "Плато" выпуска	19
IV. Волновые процессы	23
V. Литература	26

Введение

Устройства формирования "плато" во временной зависимости тока электромагнита (*flat-top*-устройства) находят широкое применение в экспериментальной технике [1+15]. Обычно их используют при необходимости обеспечить постоянство магнитного поля в индуктивной нагрузке в течение части цикла работы системы питания электромагнита. Устройства формирования "плато" находят применение как в импульсных системах питания магнитов [1+8], так и в резонансных [9+15], эти устройства обычно содержат дополнительный источник питания для компенсации активных потерь на "плато" [1+8, 11, 12, 15], а иногда выполняются без такого источника [1, 9, 10, 13]. Последний вариант возможен при малой длительности "плато" в сравнении с постоянной времени электромагнита, или невысоких требованиях к качеству "плато".

По назначению можно выделить устройства, предназначенные для обеспечения требований физического эксперимента, например, медленного вывода ускоренных частиц [4, 8, 9+11, 15] и устройства для целей стабилизации уровня магнитного поля в индуктивной нагрузке [12, 20].

Поскольку условием формирования плоской вершины импульса тока является равенство нулю напряжения на индуктивной составляющей магнита, то более удобно классифицировать известные *flat-top*-устройства по способу обеспечения указанного условия, т.е. по принципу действия. Очевидно, что выбор конкретного варианта устройства в значительной степени связан с особенностями основной системы питания электромагнита. Не вдаваясь в детальное рассмотрение частных преимуществ одних схем устройств перед другими, по принципу действия их можно разделить на несколько групп: устройства, использующие наложение гармонических составляющих более высокого порядка [8, 11]; устройства с применением специальных компенсационных источников питания [1+4, 6+8]; устройства с изменением параметров основного резонансного контура [5], а также устройства с шунтированием электромагнита нагрузки в момент, близкий к максимуму тока [1, 9, 10, 12+15]. В последнем варианте, в случае резонансной системы питания магнита, возможно непосредственное шунтирование магнита или конденсаторной батареи [9, 10], или применение балластной индуктивности [12+15], в качестве которой обычно используется измери-

тельный магнит.

Качество "плато" во временной зависимости тока электромагнита в значительной степени определяет конечный результат проводимого эксперимента. Это в полной мере относится к ускорительным установкам, где от качественных характеристик магнитного поля зависят процессы инжекции, ускорения и выпуска заряженных частиц, поэтому анализу электромагнитных процессов, возникающих при формировании "плато", следует уделять особое внимание.

I. Система питания электромагнита синхротрона Б-5

Система питания магнита синхротрона Б-5 [21] относится к классу резонансных систем [16+18] и выполнена с подмагничиванием магнита ускорителя постоянным током, возбуждение колебательного контура осуществляется от однотактного инверторного преобразователя [19, 20]. Поскольку напряжение на магните не превосходит 1 кВ, то система питания выполнена сосредоточенной, т.е. распределения конденсаторной батареи и секций электромагнита по кольцевой схеме [16+18] не требуется. Подмагничивание магнита ускорителя постоянным током осуществляется без применения специального источника питания (пассивное подмагничивание). Колебательный контур системы питания (рис. I-1) включает конденсаторную батарею C , разделительный реактор L_p , измерительный магнит L_n и магнит ускорителя L_m . Возбуждение колебательного контура осуществляется от однотактного преобразователя, включающего источник питания U_d , инверторный реактор L_d и управляемые вентили V_1 и V_2 . Источник питания U_d выполнен на управляемых вентилях, для регулирования входного напряжения источника питания используется индукционный регулятор ИР. При возбуждении колебательного контура, в цепи $L_m-L_n-L_d-L_p$ возникает постоянная составляющая тока, которая приблизительно равна амплитуде переменной составляющей. Во временной зависимости тока электромагнита присутствует характерная пауза Δt , величина которой определяется добротностью колебательного контура. Можно показать, что пауза тока определяется углом $\beta = \arccos(1 - T/\tau)$, где T - период колебаний в контуре, $\tau = \frac{L_m}{r_p + r_m}$, r_p, r_m - активное сопротивление разделительного реактора и магнита ускорителя. Связь между напряжением источника питания инверторного преобразователя (U_d) и напря-

жением на колебательном контуре (U_k) находится из выражения:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_k \cos \varphi$$
 , где φ - углы коммутации вентиля инверторного преобразователя. На рис. I-1 приведены временные зависимости тока магнита (i_M) и напряжения на конденсаторной батарее (U_C) в режиме работы системы питания без формирования "плато".

Основные параметры системы питания следующие:

Частота циклов ускорения	50 Гц
Максимальное значение тока в обмотке	12 кА
Максимальная энергия, запасаемая в магните	50 кДж
Потребляемая мощность	400 кВт
Длительность паузы тока	1,8 мс
Реактивная мощность конденсаторной батареи	5 Мвар

Для обеспечения эффективного впуска ускоряемых частиц стабильность магнитного поля на уровне инжекции должна быть не хуже $\pm 0,1\%$. Кроме того, для обеспечения хороших условий захвата частиц в синхротронный режим, необходимо производить инжекцию в момент нулевой производной магнитного поля. Это особенно важно при ускорении тяжелых ионов, т.к. инжекция при нулевой производной и последующий медленный подъем магнитного поля резко снижает требования, предъявляемые к ускоряющей ВЧ-системе в части скорости перестройки частоты ускоряющего напряжения

[22]. Указанному требованию полностью удовлетворяет временная зависимость магнитного поля вида: $H = H_i + H_m (1 - \cos \omega t)$, где H_i - магнитное поле инжекции, H_m - амплитуда переменной составляющей магнитного поля. Указанная временная зависимость предполагает формирование "плато" в кривой тока магнита на заданном уровне магнитного поля инжекции H_i .

Для поддержания постоянства энергии ускоренных частиц и обеспечения их эффективного выпуска необходимо стабилизировать амплитуду магнитного поля с точностью $\pm 0,1\%$. Анализ известных способов стабилизации амплитуды поля в резонансных системах питания [23+25], с учетом особенностей системы питания магнита синхротрона Б-5, показал, что наиболее простым способом стабилизации амплитуды поля является формирование "плато" на вершине импульса тока магнита при достижении магнитным полем заданного уровня. При этом требования, предъявляемые к стабилизации источника возбуждения колебательного контура, резко снижаются, что в значительной степени упрощает изготовление этого источ-

ника и снижает его стоимость.

При обеспечении предварительной стабилизации амплитуды магнитного поля порядка $\pm 0,5\%$, что не представляет особых затруднений, технические трудности создания устройства формирования "плато" существенно ниже трудностей, связанных с необходимостью повышения стабильности мощного источника возбуждения колебательного контура. Указанная предварительная стабилизация осуществляется индукционным регулятором ИР с последующей стабилизацией выходного напряжения источника питания инверторного преобразователя U_d (рис. I-1).

Т.о. необходимая стабильность магнитного поля в синхротроне Б-5 достигается путем формирования "плато" в кривой тока магнита на заданных уровнях инжекции и выпуска заряженных частиц. Временная зависимость магнитного поля в зазоре электромагнита синхротрона Б-5 приведена на рис. I-2, где

- H_i - магнитное поле инжекции,
- H_v - магнитное поле выпуска,
- t_i - длительность "плато" инжекции,
- t_v - длительность "плато" выпуска.

II. "Плато" инжекции

Схема основных цепей системы питания электромагнита синхротрона Б-5 с устройством формирования "плато" инжекции приведена на рис. 2-1. На спадающей части тока магнита (i_M), при достижении магнитным полем заданного уровня инжекции (момент времени t_0), сигнал с пермаллового датчика I через формирователь 2 запускает управляемый вентиль V_3 , при этом диод D запирается положительным напряжением на конденсаторной батарее С, а ток магнита замыкается через вентиль V_3 и предварительно заряженную емкость $C\phi$, причем $C\phi \gg C$. Формирование "плато" заканчивается в момент времени t_1 , при появлении на конденсаторной батарее отрицательного напряжения, превышающего напряжение на емкости $C\phi$, при этом вентиль V_3 автоматически выключается, а ток магнита замыкается через диод D и конденсаторную батарею С этого момента времени, характеризующегося началом подъема поля в магните ускорителя, начинается новый цикл работы системы питания. Емкость фильтра $C\phi$ обеспечивает компенсацию активных потерь в обмотке электромагнита в течение всего "плато" инжекции. Очевидно, что условие формирования

идеального "плато" дает выражение:

$$U_{\phi} = I_i \cdot R_{\Sigma} \quad (2 \cdot I)$$

где U_{ϕ} - напряжение на емкости C_{ϕ} ,

I_i - ток магнита на "плато",

$R_{\Sigma} = R_{\text{и}} + R_{\text{м}}$ - суммарное активное сопротивление измерительного магнита $L_{\text{и}}$ и электромагнита ускорителя $L_{\text{м}}$.

Как уже отмечалось, определение момента достижения спадающим магнитным полем заданного уровня инжекции осуществляется с помощью пермаллового датчика. Этот момент времени фиксируется импульсом, возникающим на сигнальной обмотке датчика, т.е. по принципу действия пермалловый датчик является устройством измерения мгновенного значения переменного (или импульсного) магнитного поля. Сам датчик (рис.2-2) обычно представляет собой пермалловый сердечник 1, помещенный в кварцевую трубочку 2, на которую намотана сигнальная обмотка 3 [26,27]. Весь этот узел размещен внутри компенсационной обмотки 4. Регулируя ток компенсационной обмотки устанавливается заданная величина опорного магнитного поля, связанного с током обмотки неизменным для данного датчика коэффициентом.

Весь датчик в сборе размещен в зазоре измерительного магнита $L_{\text{и}}$, включенного последовательно с электромагнитом ускорителя (рис.2-1), причем измеряемое магнитное поле направлено встречно опорному. При равенстве указанных магнитных полей происходит перемагничивание пермаллового сердечника и в сигнальной обмотке датчика индуцируется импульс: $e = -W_2 S \mu_3 \frac{dH}{dt}$,

где W_2 - число витков сигнальной обмотки,

S - сечение, а μ_3 - эквивалентная магнитная проницаемость сердечника:

$$\mu_3 = \frac{\mu}{1 + N(\mu/\mu_0 - 1)}$$

где μ - проницаемость материала сердечника,

N - коэффициент размагничивания [28].

Т.о. чувствительность датчика связана с его конструкцией и растет с увеличением эквивалентной магнитной проницаемости.

Проницаемость материала в значительной степени зависит от обработки пермаллоя [26,27,29].

На точность индикации влияет ширина импульса, которая зависит от сечения сердечника, коэрцитивной силы и скорости пе-

ремагничивания [26].

Строго говоря сердечник перемагничивается с запозданием относительно нуля магнитного поля приблизительно на величину коэрцитивной силы, которая, в свою очередь, зависит от производной магнитного поля [30,31].

Показателями качества датчика являются амплитуда и ширина импульса, которые зависят от размеров сердечника, коэрцитивной силы и скорости перемагничивания.

Т.о. очевидно, что разработка датчика сопряжена с необходимостью принятия ряда компромиссных решений относительно его конструкции для получения желаемых характеристик.

Одним из недостатков пермаллового датчика является его верхний предел измерений магнитного поля, ограниченный значением $B \approx 0,015$ Т. Указанное ограничение связано с чрезмерным нагревом компенсационной обмотки при создании более сильного опорного поля. Поскольку в синхротроне Б-5 магнитное поле на уровне инжекции приблизительно на порядок превосходит указанный верхний предел измерений, то очевидны трудности использования пермаллового датчика для измерения магнитного поля в нашем случае. Выход может быть найден, если применить импульсное питание компенсационной обмотки или использовать принудительное, например, водяное охлаждение. Анализ этих вариантов показал, что следует отдать предпочтение второму варианту, т.к. первый вариант требует стабильного ($\sim 10^{-4}$) импульсного источника питания, а также схемы синхронизации его работы с временной зависимостью измеряемого магнитного поля.

Для лучшего охлаждения компенсационной обмотки она пропитана под вакуумом эпоксидным компаундом и весь датчик помещается в разъемный корпус, в который подается охлаждающая вода. Полностью конструкция датчика, основные его параметры и типичная осциллограмма импульса напряжения с сигнальной обмотки приведены на рис.2-3.

Некоторые важные характеристики датчика:

Сечение сердечника	0,05x0,2 мм
Материал сердечника	79НМ
Сигнальная обмотка	$W_i = 1000, \varnothing 0,05$
Компенсационная обмотка	$W_k = 800, \varnothing 0,45$
Температура внутри датчика, измеренная по нагреву сигнальной обмотки	$\theta = 110^{\circ}\text{C}$

Ток компенсационной обмотки

до 5 А.

Качество работы устройства формирования "плато" инжекции определяется точностью соответствия начального значения магнитного поля "плато" заданному уровню, а также точностью поддержания магнитного поля в течение "плато" на этом уровне. Исходя из этого, анализ качества работы устройства подразделяется на два этапа.

Точность соответствия начального значения магнитного поля "плато" заданному уровню зависит от точности индукции момента достижения магнитным полем ускорителя заданного уровня инжекции и процессов при коммутации тока электромагнита ускорителя после включения управляемого вентиля V_3 (рис.2-1).

Точность индикации определяется стабильностью источника подмагничивания пермадлсего датчика, качеством этого датчика и формирователя. Количественно точность индикации может быть сведена к определению систематической ошибки времени индикации t_j и разбросу указанного параметра $\pm \Delta t_j$.

Процессы при коммутации тока могут оказать значительное влияние на точность соответствия магнитного поля в начале "плато" заданному уровню. На рис.2-4 приведена эквивалентная схема для анализа влияния коммутации тока. На этом же рисунке приведена диаграмма напряжения $U_{ми}$ на суммарной индуктивности ($L_{ми}$) магнита ускорителя и измерительного магнита в начальный момент формирования "плато". Для простоты анализа влиянием емкости C_f (рис.2-1) пренебрегаем. После включения вентиля V_3 ток электромагнита, протекающий через диод D , не может мгновенно перейти в вентиль V_3 , т.к. контур коммутации $C-D-V_3$ обладает индуктивностью (L_A и L_{V3}). После включения вентиля V_3 напряжение на конденсаторной батарее будет приложено к индуктивному делителю, составленному из индуктивностей L_A и L_{V3} . Считая, что напряжение на конденсаторной батарее остается неизменным за время коммутации ($U_{ск}$ на рис.2-4), к индуктивности $L_{ми}$ будет приложено напряжение:

$$U_{мик} = U_{ск} \frac{L_{V3}}{L_A + L_{V3}}$$

Очевидно, что длительность коммутации тока будет определяться выражением:

$$\Delta t_k = \frac{(L_A + L_{V3}) I_i}{U_{ск}}$$

где I_i - величина тока магнита в момент коммутации.

Величина изменения тока магнита за время коммутации будет:

$$\Delta I_{ик} = \frac{U_{мик} \cdot \Delta t_k}{L_{ми}} = \frac{L_{V3}}{L_{ми}} I_i$$

или в относительных единицах: $\frac{\Delta I_{ик}}{I_i} = \frac{L_{V3}}{L_{ми}}$.

Отсюда очевидна необходимость уменьшения индуктивности цепи управляемого вентиля V_3 .

При анализе влияния процесса коммутации тока электромагнита на точность соответствия начального значения "плато" заданному уровню мы предполагали, что вентиль V_3 идеальный. Оценим влияние реальной характеристики этого вентиля. Как известно, тиристоры характеризуются определенным временем включения относительно поджигающего импульса [32]. Указанное время включения ($t_{вкл}$ на рис.2-5) складывается из времени задержки t_3 и времени нарастания t_n , эти параметры нормируются техническими условиями. Проведенное исследование температурной зависимости указанных параметров показало, что изменение этих параметров в рабочем диапазоне температур приборов может составлять до 20% их нормированного значения.

Количественная оценка влияния пусковой характеристики управляемого вентиля на точность соответствия начального значения "плато" заданному уровню может быть сведена к нахождению эквивалентной задержки включения этого вентиля (t_v) и разброса указанного параметра ($\pm \Delta t_v$). Следует заметить, что введенный параметр не совпадает с обычно используемым параметром "Время включения" ($t_{вкл}$), т.к. зависимость анодного напряжения на управляемом вентиле в момент включения имеет сложный характер. В нашем случае эквивалентная задержка включения вентиля определяется выражением: $t_v = \frac{1}{U_{ск}} \int_0^{t_0} u_v \alpha t$, где $U_{ск}$ - напряжение на конденсаторной батарее во время коммутации,

t_0 - длительность периода спада напряжения на аноде вентиля до постоянной величины (рис.2-5),

U_v - временная зависимость напряжения на аноде вентиля.

Т.о. основными дестабилизирующими факторами, влияющими на

точность соответствия начального значения "плато" заданному уровню, являются: ошибка индикации момента достижения магнитным полем заданного уровня (степень влияния этого фактора учитывают параметры t_j и $\pm \Delta t_j$); наличие индуктивности в цепи управляемого вентиля (этот фактор определяет относительное изменение тока магнита $\frac{\Delta I_i}{I_i} = L_v/L_{mi}$); задержка включения управляемого вентиля (параметры t_v и $\pm \Delta t_v$). Относительное изменение тока магнита, определяемое суммарным воздействием всех перечисленных факторов будет:

$$i'_m = i'_{mc} \pm \Delta i_m = \frac{\Delta I_i}{I_i} = \frac{U_{ск}}{L_{mi} \cdot I_i} (t_j + t_v) + \frac{L_v}{L_{mi}} \pm \frac{U_{ск}}{L_{mi} \cdot I_i} (\Delta t_j + \Delta t_v) \quad (2:2)$$

Систематическая ошибка (i'_{mc}) легко устраняется простой коррекцией тока компенсационной обмотки датчика, что касается разброса относительного изменения тока ($\pm \Delta i_m$), то эта величина должна быть сведена до необходимого минимального уровня. Величина напряжения на конденсаторной батарее в начале формирования "плато" ($U_{ск}$) в рабочем диапазоне энергий ускоряемых частиц достигает 700 В. При заданных величинах индуктивности магнита и тока на "плато" ($L_{mi} = 700 \text{ мкГ}$, $I_i = 1000 \text{ А}$), из (2.2) можно получить, что суммарный разброс временных параметров включения "плато" ($\Delta t_j + \Delta t_v$) не должен превышать одной микросекунды. Требуемое значение разброса может быть получено при использовании пермаллового датчика с малой шириной импульса (порядка нескольких мкс на уровне 0,5) и применением управляемых вентилях с минимальным (порядка 5 мкс) временем включения (тиристоры марки ТЧ, ТБ).

Более сложной проблемой оказалось обеспечение необходимой стабильности магнитного поля в течение "плато". Казалось, что без компенсации активных потерь ток магнита должен затухать по закону: $i_m = I_i \exp(-t/\tau)$
 где $\tau = \frac{L_{mi}}{r_{mi}} = \frac{700 \cdot 10^{-6}}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 0,2 \text{ с}$ - постоянная времени магнита.

Легко видеть, что при длительности "плато" 1,8 мс, затухание начального значения тока составит 0,9%.

При необходимости, компенсировать указанное затухание можно включением источника питания последовательно с управляемым вентиляем (рис.2-1). Очевидно, что в качестве такого источника

лучше всего использовать емкость. Как уже указывалось (2.1), величина напряжения на этой емкости должна быть близка к падению напряжения на активном сопротивлении магнита, что является условием формирования "плато". Т.к. величину емкости нельзя взять равной бесконечности, то напряжение на ней в течение "плато" не может оставаться постоянным, поэтому необходимо определить минимально возможное значение этой емкости и величину начального напряжения на ней для обеспечения требуемой стабильности магнитного поля на уровне инжекции. Указанные величины можно получить проведя анализ работы устройства после включения управляемого вентиля V_3 . Естественно было предположить, что временную зависимость тока магнита на "плато" можно получить решив уравнения соответствующие эквивалентной схеме, приведенной на рис.2-6:

$$\frac{d^2 u_\phi}{dt^2} + \frac{r_{mi}}{L_{mi}} \frac{du_\phi}{dt} + \frac{1}{L_{mi} C_\phi} u_\phi = 0$$

$$L_{mi} = C_\phi \frac{du_\phi}{dt}$$

где u_ϕ - напряжение на емкости C_ϕ ,
 i_{mi} - ток магнита на "плато" инжекции.

Начальными условиями являются:

$$u_\phi|_{t=0} = -U_{\phi 0}, \quad \frac{du_\phi}{dt}|_{t=0} = I_i / C_\phi$$

Пренебрегая потерями в коммутаторе К, можно показать, что решение приведенных уравнений для тока:

$$i_{mi} = e^{-\beta t} \left[I_i \cos \omega_i t + \left(\frac{U_{\phi 0}}{\omega_i} + U_{\phi 0} C_\phi \omega_i - \frac{\beta I_i}{\omega_i} \right) \sin \omega_i t \right], \quad (2.3)$$

$$\text{где } \beta = \frac{r_{mi}}{2L_{mi}}, \quad \omega_i = \sqrt{\frac{1}{L_{mi} C_\phi} - \beta^2}$$

На рис.2-7 приведены в относительных единицах расчетные временные зависимости тока магнита на "плато", соответствующие выражению (2:3) для различных начальных напряжений на емкости при $C_\phi = 1 \text{ Ф}$, а также зависимости тока для различных значений емкости при неизменной величине начального напряжения ($U_{\phi 0} = 3,5 \text{ В}$). Исходными данными для расчета являлись:

$I_L = 1000 \text{ A}$, $r_{\text{ми}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$, $L_{\text{ми}} = 700 \text{ мкГ}$. Из приведенных зависимостей видно, что величина емкости должна быть $\geq 0,8 \text{ Ф}$, а величина начального напряжения на ней должна быть приблизительно в 1,3 раза больше падения напряжения на активном сопротивлении магнита. В этом случае отклонения тока магнита на "плато" не будут превосходить $\pm 0,1\%$. Из приведенных зависимостей также видно, что рассматриваемое устройство формирования "плато" инжекции не предъявляет жестких требований к стабильности начального напряжения на емкости и величине этой емкости.

На рис.2-8 приведены расчетная (i_p) и экспериментальная (i_3) зависимости тока магнита на "плато" при отсутствии емкости $C\phi$. Из приведенного рисунка видно, что в начале формирования "плато" действительная временная зависимость тока магнита имеет отклонение от расчетной. Это обстоятельство указывает на то, что использованная для анализа эквивалентная схема (рис.2-6) требует уточнения, а полученные с ее помощью результаты следует рассматривать только как предварительные. Экспериментально обнаруженное смещение тока магнита на "плато" в сторону увеличения легко может быть скомпенсировано уменьшением тока подмагничивания пермаллового датчика (пунктирная кривая $i_{\text{кор}}$ на рис.2-8). В этом случае магнитное поле в конце "плато" (где и происходит инжекция заряженных частиц) будет равно заданной величине.

Несмотря на легкость компенсации обнаруженного смещения тока магнита, представляет интерес найти причину этого явления. Экспериментальная временная зависимость тока магнита на "плато" (рис.2-8) имеет вид, характерный для переходных токов в индуктивно связанных контурах. Действительно, возрастание тока в короткозамкнутой LR -цепи можно объяснить только подмагничивающим действием вихревых токов, т.к. магнитное поле в зазоре ускорителя определяется не только током в обмотке, но и вихревыми токами. Поскольку "плато" инжекции формируется на спадающей части тока магнита, то вихревые токи оказывают подмагничивающее действие. Рассмотрим эквивалентную схему формирования "плато" инжекции с учетом влияния вихревых токов, когда эквивалентный контур вихревых токов $L_2 R_2$ индуктивно связан с обмоткой электромагнита L_1 (рис.2-9). Для простоты анализа, в рассматриваемой схеме не учитывается источник компенсации актив-

ных потерь, т.к. наличие этого источника не может влиять на исследуемый процесс.

После включения коммутатора K и запираания диода D процессы в схеме определяются дифференциальными уравнениями:

$$r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0$$

$$r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0.$$

Решая эти уравнения, можно получить временную зависимость тока магнита:

$$i_1 = i_1' + i_1'' = A e^{\rho_1 t} - B e^{\rho_2 t}, \quad (2.4) \text{ где}$$

$$A = \frac{1}{\delta} \left[\sigma I_{10} \rho_1 + \delta_2 \left(I_{10} + \frac{M}{L_1} I_{20} \right) \right],$$

$$B = \frac{1}{\delta} \left[\sigma I_{10} \rho_2 + \delta_2 \left(I_{10} + \frac{M}{L_1} I_{20} \right) \right],$$

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2\sigma} \left[-(\delta_1 + \delta_2) \pm \beta \right], \quad \beta = \sqrt{(\delta_1 - \delta_2)^2 + 4k \delta_1 \delta_2},$$

$$\sigma = 1 - k^2, \quad k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}, \quad \delta_1 = r_1 / L_1, \quad \delta_2 = r_2 / L_2,$$

I_{10}, I_{20} - начальные значения контурных токов.

Временные зависимости тока магнита (i_1) и его составляющих (i_1' и i_1'') приведены на рис.2-9.

Представляет практический интерес нахождение мест формирования контуров вихревых токов, ответственных за нарастание тока в короткозамкнутом электромагните. Легко показать, что этими токами не могут являться вихревые токи в шихтованном магнитопроводе. Действительно, эквивалентная постоянная времени вихревых токов в магнитопроводе [33]:

$$T_B \approx 0,2 \frac{\mu_0 \cdot \delta^2}{10^3 \cdot \rho_{\text{ж}}} = 0,2 \frac{1000 \cdot 0,035^2}{1000 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ мкс} \quad (2.5)$$

в то время как, экспериментально обнаруженная постоянная времени составляет около 400 мкс. Едва ли такое значительное расхождение можно объяснить возможными дефектами изоляции пластин шихтованного магнитопровода.

Рассмотрение конструкции электромагнита ускорителя (рис.2-10) показывает, что краевое магнитное поле (силовые линии H_T) выходит из толщи магнитопровода 3 под большими углами к шихтовке, поэтому эквивалентная постоянная времени вихревых токов, наводимых краевым полем, будет много больше, чем полученная из (2.5). По-видимому, затухание вихревых токов, наводимых краевым магнитным полем в магнитопроводе и определяет возрастание тока в электромагните ускорителя в начале формирования "плато" инъекции.

Интересным экспериментальным фактом является не только возрастание тока в начальный момент формирования "плато", но и индукции магнитного поля в зазоре электромагнита. На рис.2-11 приведены осциллограммы тока магнита на "плато" i_{mi} и $\frac{dH_{mi}}{dt}$ в зазоре электромагнита, из которых видно, что сигнал производной магнитного поля также содержит несколько экспоненциальных составляющих, причем наличие составляющих с большим затуханием обеспечивает возрастание индукции в зазоре электромагнита (отрицательный сигнал $\frac{dH}{dt}$). Для того, чтобы объяснить возрастание индукции в зазоре электромагнита в начале формирования "плато" необходимо воспользоваться новой расчетной схемой, т.к. эквивалентная расчетная схема, приведенная на рис.2-9 наглядно демонстрирует эффект возрастания тока в короткозамкнутой обмотке, но не может объяснить возрастание индукции в зазоре электромагнита. Более того, исходя из закона сохранения потокосцепления, затухание тока в эквивалентном контуре должно приводить к возрастанию тока в первичном контуре (рис.2-9), а индукция в зазоре электромагнита должна оставаться постоянной с точностью до коэффициента затухания P_1 (2.4).

Из рис.2-10 видно, что лобовые части обмотки 2 расположены вблизи медных пластин 1, которые прижаты к торцам магнитопровода 3. Эти медные пластины служат для исключения нагрева торцевых частей магнитопровода краевым магнитным полем. Магнитное поле лобовых частей обмотки (силовые линии H_L) индуцирует значительные вихревые токи в медных пластинах. Доказательством этого являются значительные активные потери в них, которые вместе с потерями от краевого магнитного поля составляют около 2,5% общих потерь в обмотках (потери в пластинах измерялись калориметрическим способом). Возрастание индукции магнитного поля в зазоре электромагнита можно объяснить, если принять во внимание,

что магнитный поток лобовых частей обмотки, коммутационных шин, вводов и других элементов (поток рассеяния) не связан с магнитным потоком в зазоре электромагнита. Исходя из этого, индуктивность магнита ускорителя можно представить в виде двух индуктивностей, одна из которых определяется магнитным полем в зазоре электромагнита, а другая - полем рассеяния. Поскольку возрастание индукции в зазоре электромагнита при формировании "плато" объясняется, по-видимому, затуханием вихревых токов, наводимых полями рассеяния в различных массивных элементах конструкции магнита (медные пластины, вакуумный кожух и др.), то эквивалентная расчетная схема может быть представлена в виде, изображенном на рис.2-12, где

L_1 - индуктивность, определяемая полем в зазоре электромагнита,

L'_1 - индуктивность, определяемая полями рассеяния,

r_1 - активное сопротивление первичного контура,

L_2, r_2 - индуктивность и активное сопротивление эквивалентного контура вихревых токов.

Можно показать, что уравнения, описывающие процессы в этой эквивалентной схеме, и полученное решение для тока первичного контура аналогичны рассмотренным ранее для эквивалентной схемы, представленной на рис.2-9, т.е. $i_1 = A e^{-P_1 t} - B e^{-P_2 t}$.

Ток магнита на "плато" содержит две экспоненциальные составляющие (рис.2-12), быстрое затухание одной из составляющих вызывает возрастание тока и индукции в зазоре электромагнита ускорителя, причем очевидно, что возрастание тока и индукции должно быть пропорциональным.

Однако проведенные измерения показали, что в действительности пропорциональности не наблюдается (типичное значение возрастания магнитного поля составляет 1,5%, в то время как ток возрастает приблизительно на 4%). Т.о. эквивалентная схема, приведенная на рис.2-12, также нуждается в уточнении. Из анализа эквивалентных расчетных схем, приведенных на рис.2-9 и 2-12, следует, что первая схема объясняет возрастание тока в обмотках электромагнита на "плато", но не объясняет возрастание индукции в зазоре магнита, а эквивалентная схема (рис.2-12) объясняет и то и другое, но требует пропорциональности в возрастании тока и индукции, что экспериментально не подтверждается.

В действительности мы имеем дело с более сложным случаем,

когда рассмотренные процессы, по-видимому, имеют место одновременно.

Учет краевого магнитного поля, а также поля рассеяния, приводит к эквивалентной схеме, приведенной на рис.2-13, где

- L_1 - индуктивность, определяемая полем в зазоре ускорителя,
- L_1' - индуктивность, определяемая полем рассеяния,
- r_1 - активное сопротивление первичного контура,
- L_2, r_2 - индуктивность и активное сопротивление эквивалентного контура вихревых токов, наводимых краевым полем,
- L_2', r_2' - индуктивность и активное сопротивление эквивалентного контура вихревых токов, наводимых полем рассеяния.

Электромагнитные процессы в этой схеме описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} (L_1 + L_1') \frac{di_1}{dt} + r_1 \cdot i_1 + M_1 \frac{di_2}{dt} + M_2 \frac{di_2'}{dt} &= 0 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + M_1 \frac{di_1}{dt} &= 0 \\ L_2' \frac{di_2'}{dt} + i_2' r_2' + M_2 \frac{di_1}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} (2.6)$$

Решая уравнения (2.6), можно получить выражение для тока первичного контура в виде:

$$i_1 = i_{11} - i_{12} - i_{13} = A e^{-P_1 t} - B e^{-P_2 t} - C e^{-P_3 t},$$

где

A, B, C - постоянные, определяемые параметрами трех контуров и начальными значениями контурных токов,

P_1, P_2, P_3 - корни характеристического уравнения, составленного на основе системы уравнений (2.6).

Легко видеть, что затухание вихревых токов i_{12} и i_{13} вызывает возрастание тока контура i_1 и потока сцепления $\Phi_1 = L_1 \cdot i_1$, а, следовательно, и индукции в зазоре электромагнита ускорителя.

Соотношение между приращениями тока магнита и индукции в зазоре определяется параметрами эквивалентных контуров вихревых токов $L_2, r_2; L_2', r_2'$ и параметрами первичного контура L_1, L_1', r_1 .

Очевидно, что определение большинства этих параметров расчетным способом представляет сложную, практически неразрешимую задачу. Также очевидно, что с практической точки зрения более важным является не точное определение указанных параметров, а возможное их изменение во времени, т.е. их стабильность, т.к. они определяют величину приращения тока и индукции в магните на "плато". Постоянное стабильное приращение легко компенсирует-

ся коррекцией опорного напряжения, которое управляет величиной магнитного поля в пермалловом датчике.

Основным дестабилизирующим фактором параметров эквивалентных контуров вихревых токов, по-видимому, является нагрев магнита во время работы, что приводит к изменению сопротивлений этих контуров, а также их индуктивностей в силу изменения линейных размеров. Не исключено медленное изменение параметров, связанное с деградацией материалов, например, старением изоляции пластин шихтованного магнитопровода.

III. "Плато" выпуска

Как уже отмечалось во введении, система стабилизации выходного напряжения источника питания инверторного преобразователя обеспечивает точность поддержания амплитуды магнитного поля в зазоре электромагнита синхротрона Б-5 на уровне $\pm 0,5\%$. Необходимое дальнейшее повышение точности до $\pm 0,1\%$ осуществляется путем формирования "плато" во временной зависимости тока магнита при достижении магнитным полем заданного уровня.

Формирование "плато" выпуска осуществляется путем шунтирования электромагнита нагрузки L_M управляемым вентилям V_4 (рис.3-1), индуктивность измерительного магнита L_M играет роль балластного реактора, необходимого для увеличения длительности "плато" и уменьшения токовой загрузки управляемого вентиля V_4 . Индикация момента достижения магнитным полем заданного уровня осуществляется с помощью индуктивного датчика ИД, расположенного в зазоре измерительного магнита L_M , интегратора 1, компаратора 2 и формирователя 3. При достижении магнитным полем заданного уровня включается управляемый вентиль V_4 , присоединяя предварительно заряженную конденсаторную батарею C_B параллельно индуктивности магнита ускорителя L_M . Конденсаторная батарея необходима для компенсации активных потерь в обмотке электромагнита в течение длительности "плато"; очевидно, что величина напряжения на этой батарее должна быть близка к величине падения напряжения на активном сопротивлении магнита при максимальном значении тока.

Поскольку импульсы тока через управляемый вентиль V_4 периодически заряжают емкость C_B , то источника питания для обеспечения начального напряжения на этой емкости не требуется.

Напротив, указанную емкость необходимо периодически разряжать, для чего устройство содержит разрядную цепь, включающую резистор R_B и управляемый вентиль V_5 , снабженный схемой искусственной коммутации (на рис.3-1 эта схема, для простоты, не показана).

Анализ электромагнитных процессов, имеющих место в устройстве формирования "плато" выпуска после включения вентиля V_4 , проводится на основании эквивалентной схемы, приведенной на рис.3-2.

После включения коммутатора K процессы в схеме описываются уравнениями:

$$-U_{L_1} + U_{C_1} = 0$$

$$i_m = i_c + i_p \quad \text{или}$$

$$L_m \cdot L_p \cdot C \frac{d^2 U_{C_1}}{dt^2} + (L_m + L_p) U_{C_1} = 0$$

Решая это уравнение, получаем выражение для напряжения на емкости колебательного контура при формировании "плато" выпуска:

$$U_{C_1} = U_{C_0} \cos \omega_B t - \frac{I_{C_0}}{\omega_B \cdot C} \sin \omega_B t, \quad (3.1)$$

где $\omega_B = \frac{L_m + L_p}{L_m \cdot L_p \cdot C}$ - круговая частота колебаний во время "плато",
 U_{C_0} - напряжение на емкости C в начальный момент формирования "плато",
 I_{C_0} - ток в емкости C в начальный момент "плато".

Чтобы найти время спадания напряжения на емкости до нуля (угол ψ на рис.3-2), необходимо приравнять нулю выражение (3.1):

$$0 = U_{C_0} \cos \psi - \frac{I_{C_0}}{\omega_B \cdot C} \sin \psi, \quad \text{откуда:}$$

$$\psi = \arctg \frac{U_{C_0} \cdot \omega_B \cdot C}{I_{C_0}} \quad (3.2)$$

Начальные значения U_{C_0} , I_{C_0} находятся из временных зависимостей напряжения на емкости и тока в ней до формирования "плато":

$$U_c = U_{em} \sin \omega_3 t \quad (3.3),$$

$$i_c = U_{em} \cdot C \cdot \omega_3 \cos \omega_3 t \quad (3.4),$$

где U_{em} - максимальное значение напряжения на емкости,
 $\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{L_3 C}}$ - круговая частота колебаний в контуре,

$L_3 = \frac{(L_m + L_n) L_p}{L_m + L_n + L_p}$ - эквивалентная индуктивность контура.
 Из (3.3) и (3.4) получаем:

$$U_{C_0} = U_{em} \sin \alpha_4, \quad I_{C_0} = U_{em} \cdot \omega_3 \cdot C \cos \alpha_4, \quad \text{где}$$

α_4 - угол коммутации управляемого вентиля V_4 .

Подставляем последние выражения в (3.2):

$$\psi = \arctg \left(\frac{\omega_B}{\omega_3} \cdot \operatorname{tg} \alpha_4 \right)$$

Очевидно, что длительность "плато" выпуска будет определяться выражением:

$$\tau_B = \frac{2\psi}{\omega_B} = \frac{2}{\omega_B} \arctg \left(\frac{\omega_B}{\omega_3} \cdot \operatorname{tg} \alpha_4 \right) \quad (3.5)$$

Ток через вентиль V_4 во время формирования "плато" будет определяться выражением:

$$i_{V_4} = \frac{1}{L_n} \int U_{C_1} dt.$$

Максимальное значение этого тока будет иметь место при угле ψ :

$$I_{V_4m} = \frac{1}{L_n} \int_0^\psi U_{C_1} dt. \quad (3.6)$$

Временные зависимости напряжения на конденсаторной батарее (U_c), тока управляемого вентиля (i_{V_4}) и длительности "плато" τ_B получены в предположении отсутствия активных потерь в элементах схемы, поэтому их следует рассматривать как предварительные. Опыт наладки системы питания магнита показал, что указанные временные зависимости имеют отклонения от расчетных, причем наличие потерь в элементах схемы и влияние емкости, приводит не только к количественным отклонениям, но и качественно меняет форму магнитного поля на вершине импульса.

Действительно, активные потери в элементах колебательного контура определяют наличие фазового сдвига между напряжением на конденсаторной батарее (U_c) и максимумом тока электромагнита (i_m) (угол ψ_B на рис.3-3). Поэтому при угле коммутации $\alpha_4 < \psi_B$ хотя и формируется "плато" во временной зависимости тока электромагнита, но уровень этого "плато" будет меньше

амплитуды тока (рис.3-3). По этой причине работа устройства формирования "плато" выпуска в этом режиме не представляет интереса для практики.

Т.к. коммутация управляемого вентиля устройства формирования "плато" выпуска осуществляется на возрастающей части тока магнита, то на процесс формирования "плато" будут оказывать действие вихревые токи, причем эти токи, в отличие от "плато" инжекции, будут оказывать размагничивающее действие.

Очевидно, что эквивалентное действие вихревых токов пропорционально производной магнитного поля в момент коммутации управляемых вентилях *flat-top*-устройств. Если угол коммутации управляемого вентиля устройства формирования "плато" инжекции есть α_i , а для "плато" выпуска - α_b (углы отсчитываются относительно переменного напряжения dH/dt), то действие вихревых токов на "плато" выпуска будет меньше в отношении

$\sin \alpha_i / \sin \alpha_b$, а относительное изменение тока магнита, вызванное влиянием вихревых токов, будет еще меньше:

$$\frac{\Delta I_b}{I_b} = \frac{\Delta I_i}{I_i} \cdot \frac{\sin \alpha_b}{\sin \alpha_i} \cdot \frac{I_i}{I_b} = \frac{\Delta I_i}{I_b} \cdot \frac{\sin \alpha_b}{\sin \alpha_i},$$

где ΔI_b - приращение тока магнита на "плато" выпуска, вызванное влиянием вихревых токов; I_b - амплитуда тока магнита на "плато"; ΔI_i - приращение тока магнита на "плато" инжекции, вызванное влиянием вихревых токов; I_i - уровень "плато" инжекции.

Типичное значение $\alpha_i = 45^\circ$, а максимальное значение $\alpha_{bmax} = 110^\circ 30'$, тогда при $\Delta I_i / I_i = 4\%$ и $I_i = 0,1 I_b$ относительное приращение тока магнита при максимальной длительности "плато" выпуска будет: $\Delta I_b / I_b \approx 0,1\%$, т.е. величина отрицательного приращения тока магнита находится в пределах допуска. Величина этого приращения является систематической ошибкой и легко может быть устранена коррекцией опорного напряжения на компараторе (рис.3-1), но это не исключает изменения магнитного поля в течение перехода на "плато". Длительность этого перехода определяется постоянными времени эквивалентных контуров вихревых токов и по измерениям составляет около 400 мкс.

IV. Волновые процессы

Известно, что при воздействии на электромагнит ускорителя импульса напряжения с крутым передним фронтом, в обмотке магнита возникают волновые процессы, приводящие к азимутальной неоднородности магнитного поля [34,35].

Управляемые вентили *flat-top*-устройств синхротрона Б-5 (рис.2-1, рис.3-1) шунтируют магнит ускорителя в момент наличия на нем некоторого напряжения, что эквивалентно возникновению переходных процессов на заднем фронте воздействующего импульса напряжения. Возникновение волновых процессов обуславливается ударным возбуждением колебательной системы, составленной из элементов индуктивности магнита и паразитных параметров обмотки, в первую очередь, емкости на "землю".

Наличие гармонических составляющих в кривой пространственного распределения магнитного поля может привести к нарушению процессов инжекции и выпуска заряженных частиц, поэтому необходимо оценить искажение равновесной орбиты, которое может иметь место при работе устройств формирования "плато" инжекции и выпуска.

Для приближенного анализа процессов, происходящих в обмотке магнита в результате разряда распределенной емкости, воспользуемся эквивалентной схемой, состоящей из конечного числа Т-образных четырехполюсников (рис.4-1-а), где $L = L_M / N$, $r = r_M / N$, $N = 4$ - число квадрантов ускорителя; L_M - индуктивность магнита ускорителя; r_M - активное сопротивление обмотки магнита.

При допущении о равенстве параметров звеньев приведенной цепной схемы, переходный процесс в ней описывается системой уравнений в конечных разностях [36]. Для составления уравнений воспользуемся операторной схемой замещения звена (рис.4-1-б), где $Z_1(p) = p \frac{L}{2}$, $Z_2 = 1/pC$ - операторные сопротивления; $\varepsilon_0 = \frac{LI_0}{2}$, $V_{0n} = \frac{\varepsilon_0}{2Np} (2n+1)$ - эквивалентные источники напряжения, учитывающие начальные условия:

ε_0 - напряжение на магните в момент коммутации вентиля;

I_0 - ток магнита в момент коммутации вентиля.

Для удобства, нумерация звеньев цепной схемы осуществляется от заземленного конца обмотки.

Воспользовавшись методом контурных токов, получаем исходные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} (Z_1 + Z_2) \cdot i[n, p] - Z_2 \cdot i[n+1, p] + U[n, p] &= V_{on} + \varepsilon_0 \\ Z_2 \cdot i[n, p] - (Z_1 + Z_2) \cdot i[n+1, p] + U[n+1, p] &= V_{on} - \varepsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Решив систему уравнений (4-1) с учетом граничных условий $U[N, p] = U[0, p] = 0$, получим изображения для тока и напряжения в n -ом звене:

$$U[n, p] = \frac{E_0}{Np} \left[n - N \frac{\text{sh} n \nu}{\text{sh} N \nu} \right]$$

$$i[n, p] = \frac{\varepsilon_0}{Z_1} + \frac{E_0}{2NpZ_1} - \frac{E_0}{p} \frac{\text{ch} n \nu}{Z_0 \text{sh} N \nu},$$

где

$$Z_0 = Z_2 \text{ch} \nu, \quad \text{ch} \nu = 1 + Z_1/Z_2$$

Применяя обратное преобразование Лапласа, найдем оригинал тока:

$$i_n(t) = I_0 e^{-\frac{r}{L}t} + \frac{E_0}{2N} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{k 2 \cos \frac{k\pi n}{N}}{\omega_k L} e^{-\frac{r_k}{2L}t} \cdot \text{Sin} \omega_k t + (-1)^{n+N} \frac{\text{Sin} \omega_N L}{\omega_N L} \quad (4.2)$$

где $\omega_k = \sqrt{\frac{4}{LC} \text{Sin}^2 \frac{k\pi}{2N} - \frac{r_k^2}{4L^2}}$, r_k - активное сопротивление обмотки на частоте k -ой гармоники.

Азимутальная асимметрия поля будет:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{E_0}{2N} \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (-1)^k \frac{k 2 \cos \frac{k\pi n}{N}}{\omega_k L} e^{-\frac{r_k}{2L}t} \cdot \text{Sin} \omega_k t + (-1)^{n+N} \frac{\text{Sin} \omega_N L}{\omega_N L}}{I_0 e^{-\frac{r}{L}t}} \quad (4.3)$$

Искажение равновесной орбиты, вызываемое азимутальной асимметрией поля k -ой гармоники, определяется известным выражением:

$$(\Delta r)^k = R_0 \frac{(\Delta H/H)^k}{k^2 + n - 1}, \quad (4.4)$$

где R_0 - радиус магнита ускорителя; n - показатель спада магнитного поля.

Для синхротрона Б-5 $R_0 = 1,4$ м, $n = 0,6$.

Из (4.4) следует, что искажение орбиты будет максимально для 1-ой гармоники.

Учитывая, что индуктивность обмотки магнита $L_M = 700$ мкГ,

$C = 0,03$ мкФ, $r = 2$ Ом, $I_0 = 1$ кА и $E_0 = 700$ В для случая инъекции; $I_0 = 12$ кА, $E_0 = 350$ В для выпуска, принимая также во внимание, что инъекция осуществляется приблизительно через 1 мс после начала формирования "плато", из (4.4) получаем, что искажение равновесной орбиты в момент инъекции $\Delta r_i = 5 \cdot 10^{-3}$ см: а для выпуска $\Delta r_8 = 4 \cdot 10^{-2}$ см. Очевидно, что указанные искажения орбиты не могут повлечь сколь-нибудь существенной потери ускоряемых частиц.

Следует заметить, что приведенные значения искажения равновесной орбиты получены в предположении воздействия на обмотку магнита прямоугольного импульса (ударное возбуждение на заднем фронте). Эксперимент показывает, что конечное время включения управляемых вентилях *flat-top*-устройств и наличие индуктивности в цепи этих вентилях, приводит к увеличению фронта импульса возбуждения, что активно подавляет волновой процесс. Отсюда следует, что одним из методов подавления волнового процесса является включение индуктивности в цепь вентиля устройства формирования "плато" [14].

Ввиду значительной величины волнового сопротивления колебательного процесса, хорошие результаты дает шунтирование секций магнита активными сопротивлениями, что эффективно подавляет колебательный процесс в обмотке даже при незначительной мощности этих сопротивлений [34, 35].

Активное демпфирующее действие оказывает утечки тока на "землю", в первую очередь, по шлангам водяного охлаждения обмотки магнита. Однако эти утечки не должны быть значительными, т.к. они сами являются возможной причиной появления азимутальной неоднородности магнитного поля. Можно показать, что для синхротрона Б-5, исходя из допустимого искажения орбиты $\Delta r/R_0 = 10^{-3}$, распределенное активное сопротивление обмотки на "землю" должно быть не менее 1 кОм на метр длины обмотки.

Л и т е р а т у р а

- I. В.Р.Карасик. Физика и техника сильных магнитных полей. М., "Наука", 1964, 176, 181.
2. О.А.Гусев, А.Г.Нечаев и Н.С.Резчикова. Формирование импульсов с плоской вершиной в электромагнитах. "Электричество", № II, 1971, 80.
3. О.А.Гусев и А.Г.Нечаев. Устройство для формирования импульсов тока в электромагнитах. А.С. № 210276, Бюллетень № 6, 1968.
4. Л.Д.Бутаков и др. Усовершенствование синхротрона "Сириус" ТПИ. Труды Четвертого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I, "Наука", 1975, 391.
5. Н.П.Ларина, Л.И.Миненко. Схема формирования импульсов тока с плоской вершиной в индуктивной нагрузке. ПТЭ, 1972, № 4, 123-124.
6. В.В.Каплан и др. Методы компенсации потерь в нагрузке при формировании плоских импульсов тока на экспериментальной установке. "Электричество", 1965, № 9, 55.
7. W.R. Baker, W.L. Gagnon and F. Voelker. Flat-topping magnet current for the Berkeley Electron-ring-accelerator experiment. IEEE trans. on NS, 1969, NS-16, N3, 1047.
8. N. Marks. A pulsed magnet power supply for fast cycling synchrotrons. Part. Acc., 1972, vol. 3, 69.
9. D. Huttar and J. Riedel. Flat topping the PPA synchrotron magnet. IEEE trans. on NS, 1967, NS-14, N3, 503.
10. D. Huttar. Further engineering details for flat-topping the Princeton-Pennsylvania accelerator. USA PPA, PPA D-597 D, 1966.
11. О.А.Гусев и др. Некоторые возможности формирования плоской вершины во временной зависимости магнитного поля синхротрона. Известия АН Армянской ССР, Физика, 6, 402-408.
12. В.Л.Ауслендер, С.В.Кузьмин, Р.М.Лапик, В.П.Томилов, А.А.Тувик. Система питания электромагнита протонно-ионного синхротрона Б-5. Препринт ИЯФ № 80-134, 1980, Новосибирск.
13. Б.А.Вартанян и др. Реконструкция системы питания электромагнита Ереванского синхротрона. Труды 5 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1977, "Наука", т.2, 234.
14. Г.А.Мартirosян. Формирование плоской вершины магнитного поля электронного синхротрона. Автореферат диссертации. НИИЭФА, Ленинград, 1979.
15. В.П.Гончаренко, О.А.Гусев, Н.С.Резчикова. Вопросы формирования плоской вершины магнитного поля электронного синхротрона. Труды Шестого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I, 1979, Дубна, 206.
16. Р.С.Бобовиков, Б.В.Плетенев, Ф.М.Спевакова, А.М.Столов. Принципы построения резонансных систем питания электромагнитов синхротронов. "Электрофизическая аппаратура", вып. I, 1963.
17. M.G. White, F.C. Shoemaker and K.O'Neill. A 3-Bev high intensity proton synchrotron. CERN Symposium on high energy accelerators and pion physics, Geneva, 1956, Proceedings, vol. 1, 525.
18. S. Waxen. Synchrotron magnet power circuit with a distributed capacitor bank. Nucl. instr. and Meth., 1960, 9, 78.
19. В.Л.Ауслендер, Р.М.Лапик, А.А.Тувик. Устройство питания магнита синхротрона. А.С. № 577876.
20. В.Л.Ауслендер, С.В.Кузьмин, Р.М.Лапик, В.П.Томилов, А.А.Тувик. Система питания магнита протонно-ионного синхротрона Б-5. Доклад на Седьмом всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1980.
21. В.Г.Абдульманов, И.И.Авербух, В.Л.Ауслендер, Г.Б.Глаголев, Р.М.Лапик, А.А.Лившиц, В.Н.Лазарев, Ю.В.Маклаков, А.Д.Панфилов, О.Я.Савченко, А.А.Тувик, Б.Л.Факторович, В.И.Юрченко. Протонно-ионный синхротрон Б-5. Доклад на X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц, том I, 1977, Серпухов, 345-349.

22. И.И.Авербух. Разработка и исследование ускоряющей системы, перестраиваемой с большой скоростью в широком диапазоне частот, для протонно-ионного синхротрона Б-5. Диссертация. Новосибирск. 1981.
23. G. Ghigo, I.F. Quereia. Reverse field stabilization in d.c.-a.c. excited magnet of an electron synchrotron. CERN Symposium on high energy accelerator and pion physics. Geneva, 1956, vol.1, 475.
24. Э.Г.Фурман. Стабилизация энергии колебательного контура ускорителя. ПТЭ, 1971, № 5, 35.
25. К.М.Козлов и др. Система стабилизации магнитного поля Бреванского синхротрона. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.1, 1968, М., 207.
26. И.В.Мозин, В.П.Смирнов, Л.Б.Сотников. Пермаллоевые датчики магнитного поля. Сборник "Электрофизическая аппаратура", вып.1, 1963, Госатомиздат, 76.
27. С.С.Курочкин. Магнитные измерения с пермаллоевыми датчиками на синхрофазотроне. ПТЭ, № 1, 1958, 53.
28. М.А.Розенблат. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости. ЖТФ, т.ХХIV, вып.4, 1954, 637.
29. И.А.Радкевич, А.Н.Талызин. Метод отжига пермаллоевых датчиков. ПТЭ, № 4, 1961, 169.
30. К.Н.Шорин и др. Применение пермаллоевых датчиков при магнитных измерениях в ускорителях. ПТЭ, № 4, 1958, 25-29.
31. В.Д.Гусаков, Л.А.Фукс, Н.Н.Трофимова. О коэрцитивной силе пермаллоевых датчиков ПТЭ, № 1, 1966, 207.
32. Е.Лекоргийе. Управляемые электрические вентили и их применение, 1971, М., Энергия, 85.
33. Я.С.Ицхоки. Импульсная техника, 1949, М., Советское радио, 92.
34. В.А.Титов. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.1, М., 1970, 184.
35. Н.А.Моносзон, А.М.Столб, Ф.М.Спевакова. ПТЭ, № 4, 1962, 168.
36. Я.Э.Цыпкин. Теория линейных импульсных систем, 1963, Физматиздат, М., 130 + 133, 178 + 180.

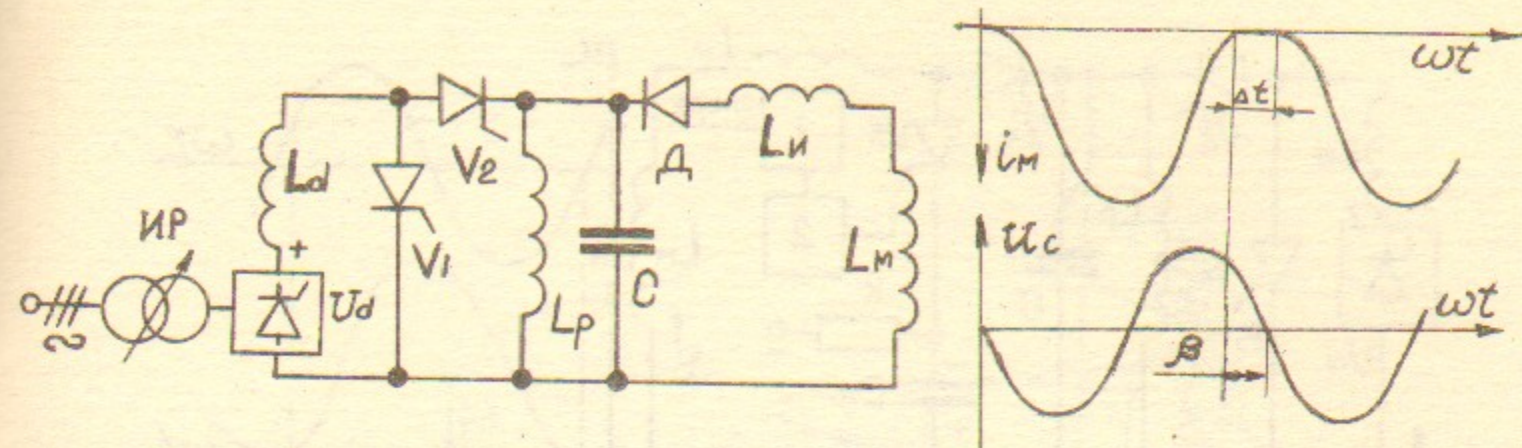


Рис.1-1. Схема основных цепей системы питания магнита синхротрона Б-5, диаграммы тока магнита i_m и напряжения на конденсаторной батарее U_c .

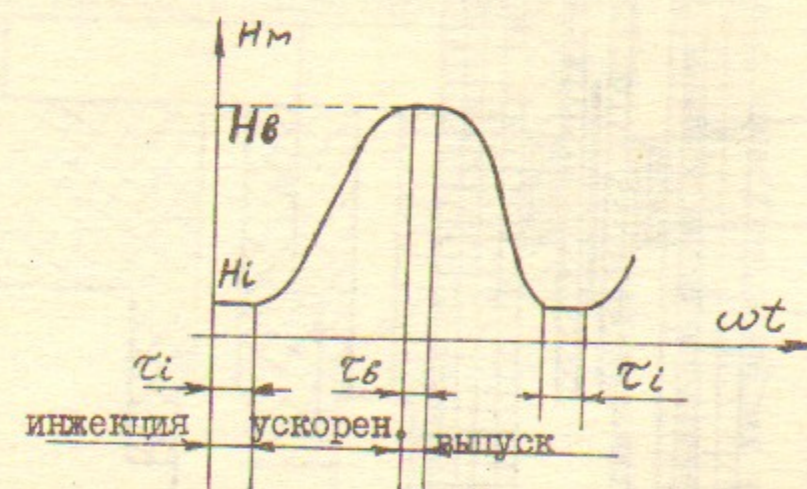


Рис.1-2. Временная зависимость магнитного поля в синхротроне Б-5.

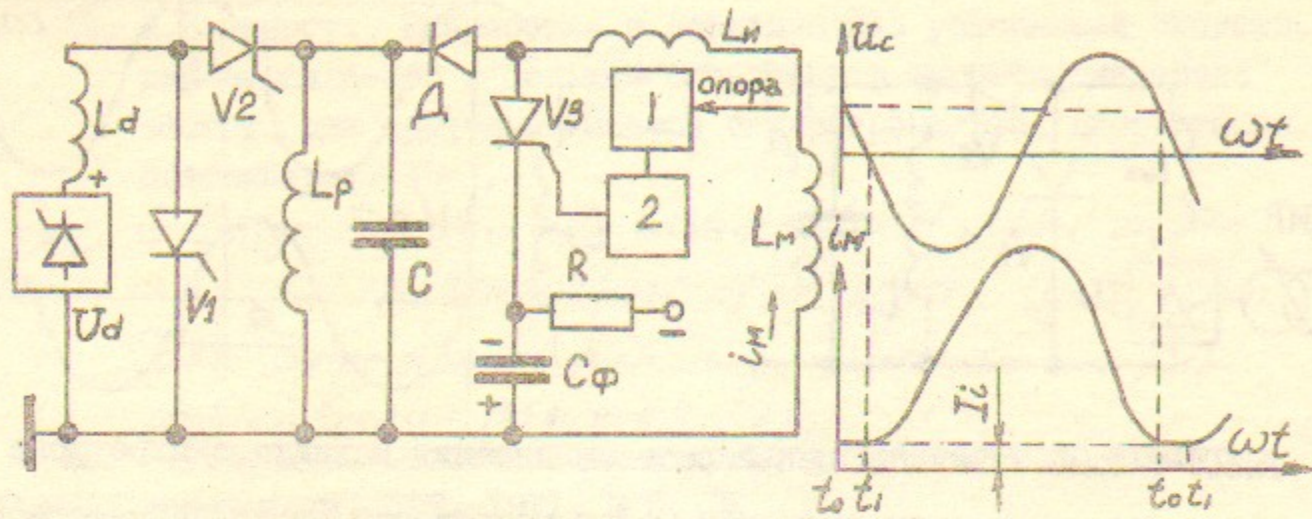


Рис.2-1. Схема основных цепей системы питания магнита с устройством формирования "плато" инжекции.

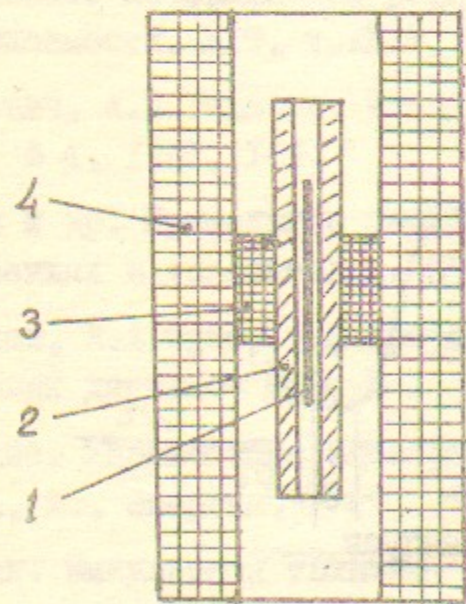
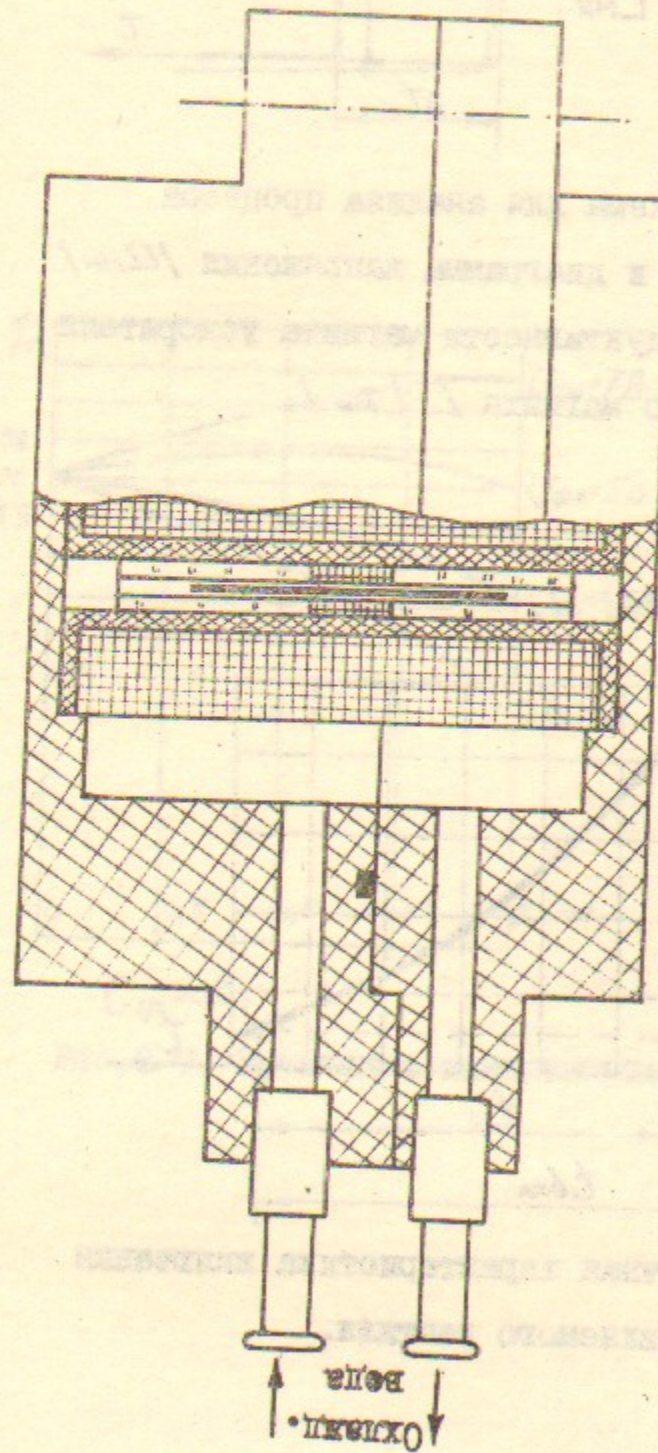
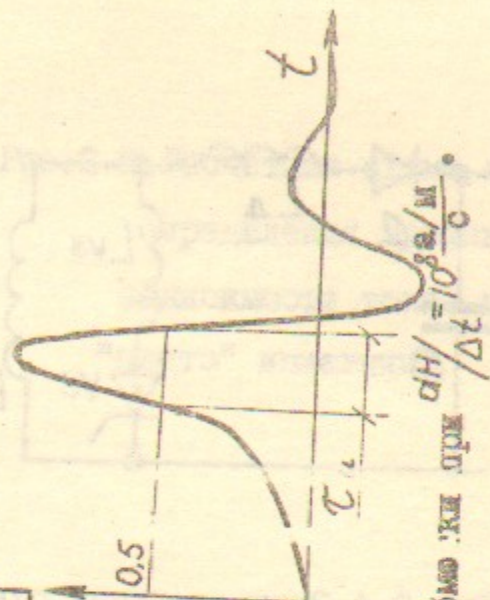


Рис.2-2. Устройство пермаллового датчика.



Оперное магнитное поле 0,15 Т.
 Потери в компенсационной обмотке 80 Вт.
 Длительность импульса на уровне 0,5 ~ 1 мкс.
 Амплитуда импульса ~ 1 В.

Рис. 2-3. Конструкция пермаллового датчика и тепловая осциллограмма импульса напряжения с сигнальной обмоткой при $\frac{dH}{dt} = 10^{22} \text{ а/м} \cdot \text{с}$.



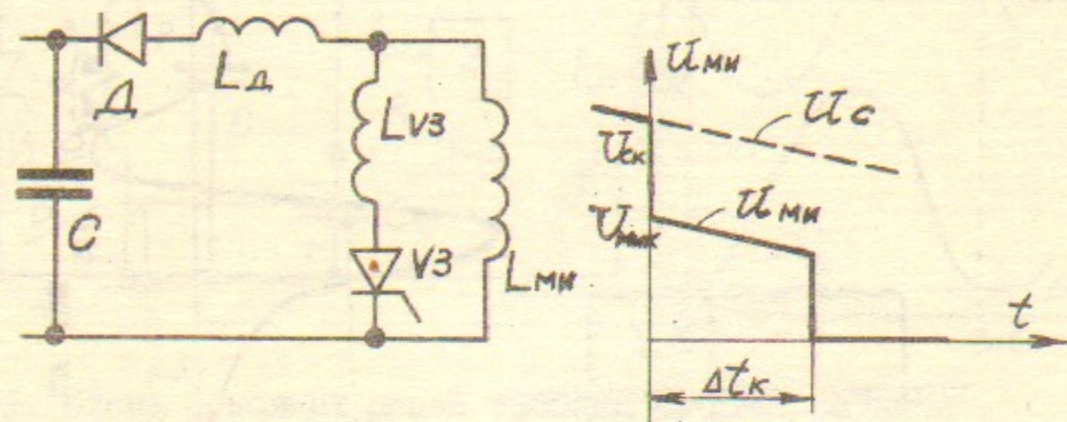


Рис.2-4. Эквивалентная схема для анализа процесса коммутации тока и диаграмма напряжения $|U_{ми}|$ на суммарной индуктивности магнита ускорителя и измерительного магнита $|L_{ми}|$.

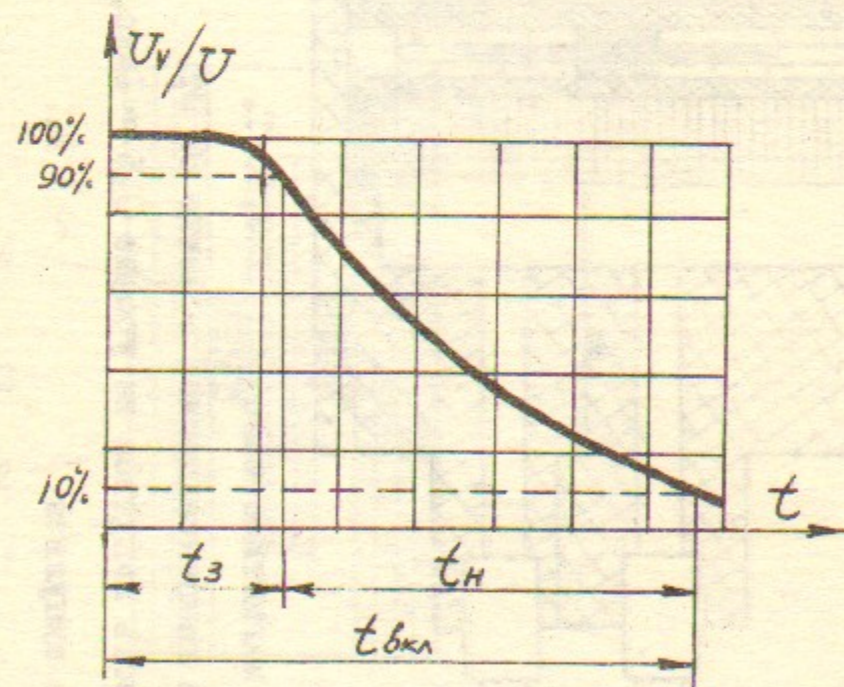


Рис.2-5. Типичная характеристика включения управляемого вентиля.

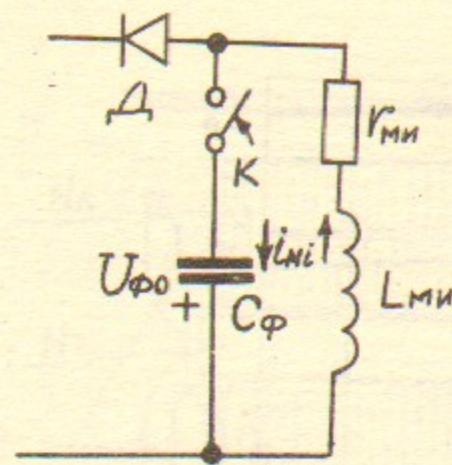


Рис.2-6. Расчетная схема для определения временной зависимости тока на "плато" инжекции.

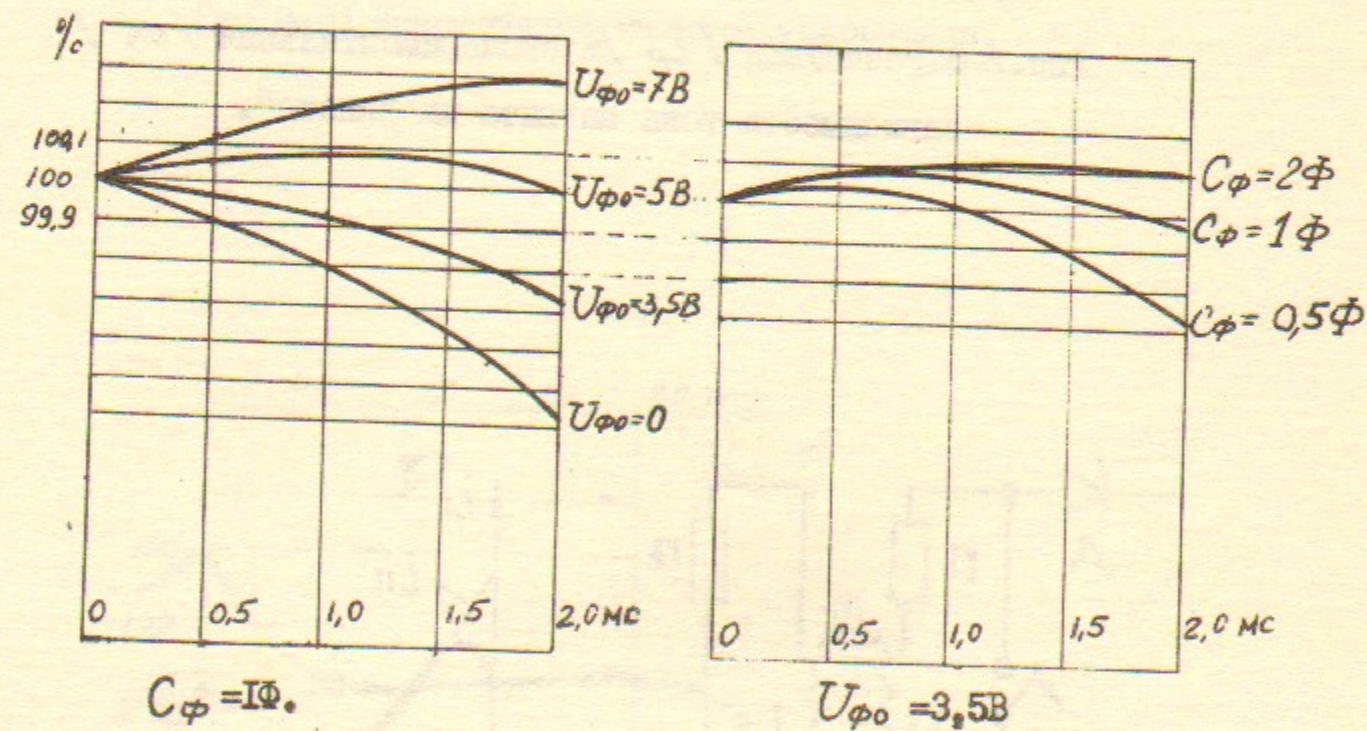


Рис.2-7. Временная зависимость тока магнита на "плато".

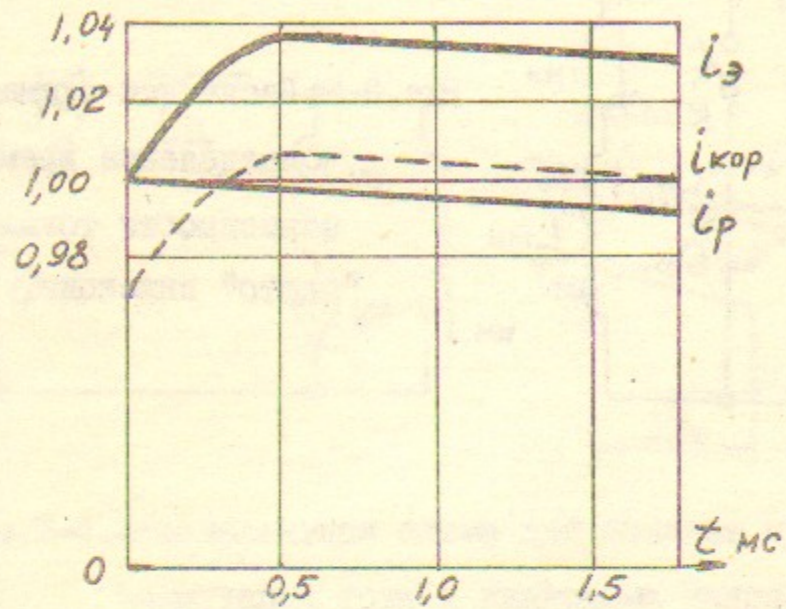


Рис. 2-8. Расчетная i_p и экспериментальная $i_э$ зависимости тока магнита на "плато".

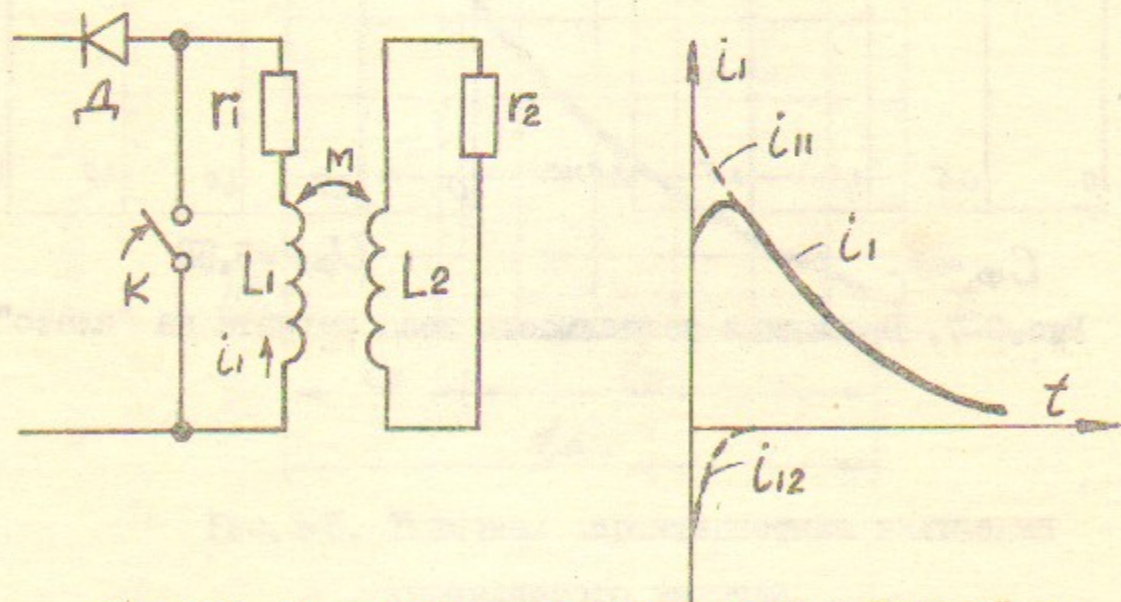


Рис. 2-9. Расчетная схема формирования "плато" с учетом нахревки токов в виде эквивалентного контура $L_2 r_2$.

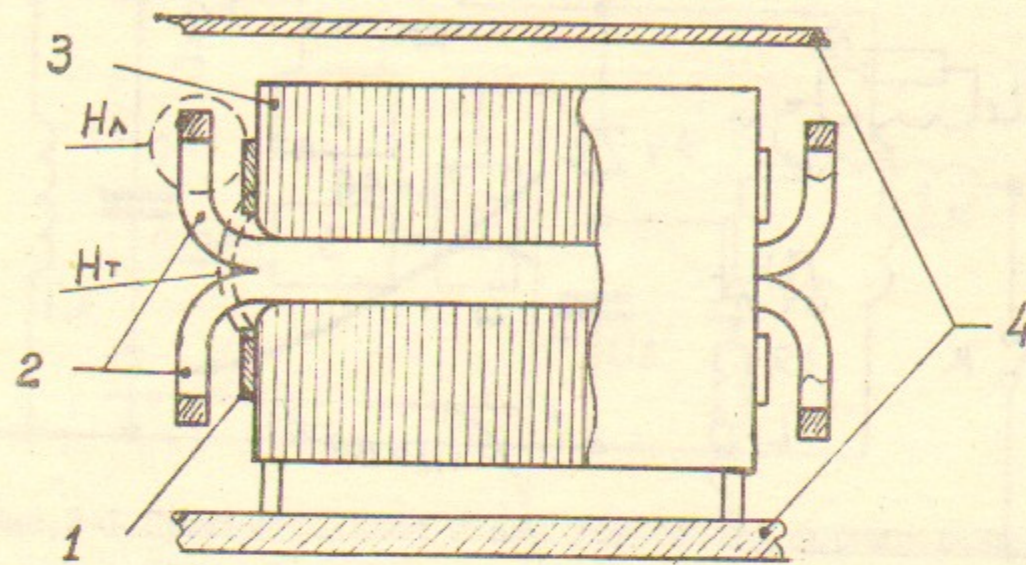


Рис. 2-10. Конструкция магнита ускорителя.

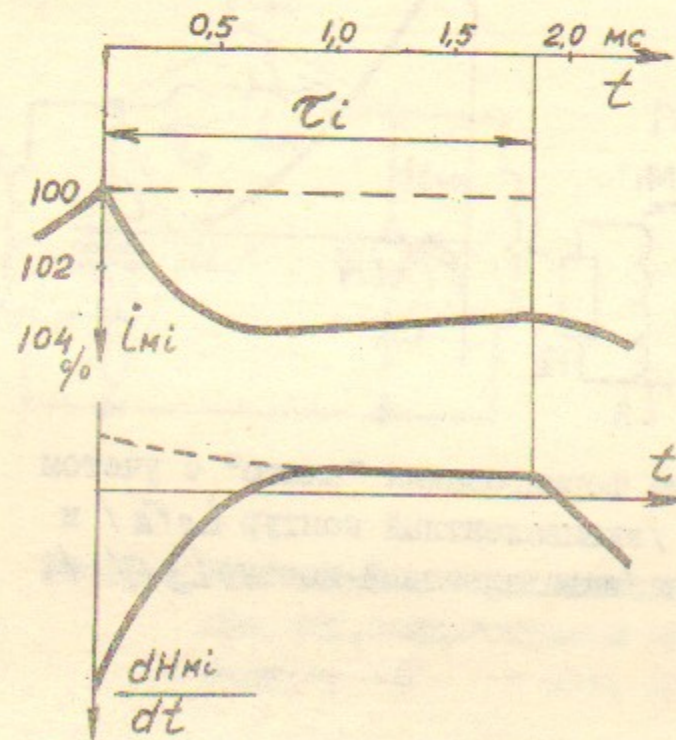


Рис. 2-11. Осциллограммы тока магнита на "плато" i_{mi} и производной магнитного поля $\frac{dH_{mi}}{dt}$.

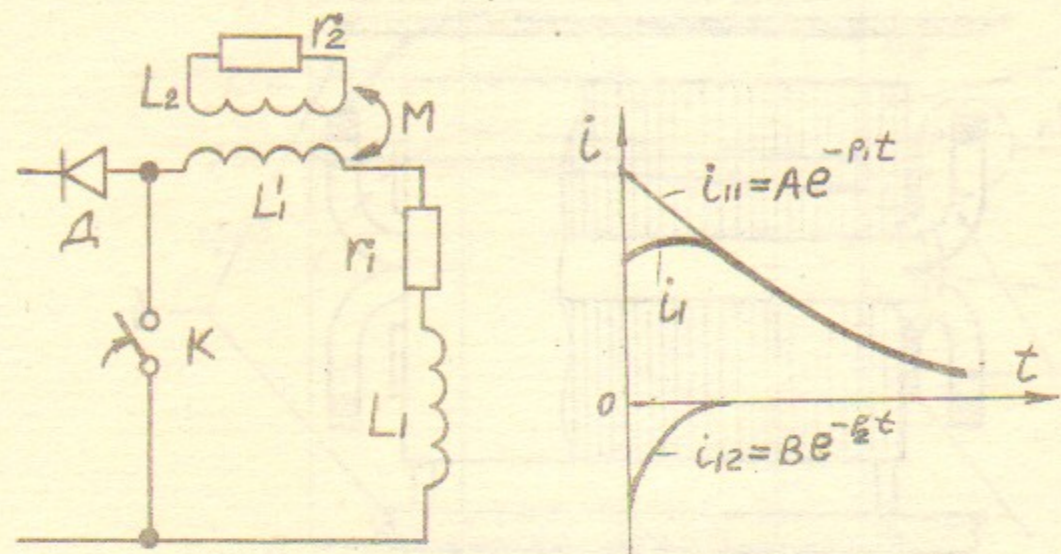


Рис. 2-12. Расчетная схема формирования "плато" с учетом поля рассеяния /эквивалентный контур $L_2 r_2$ /.

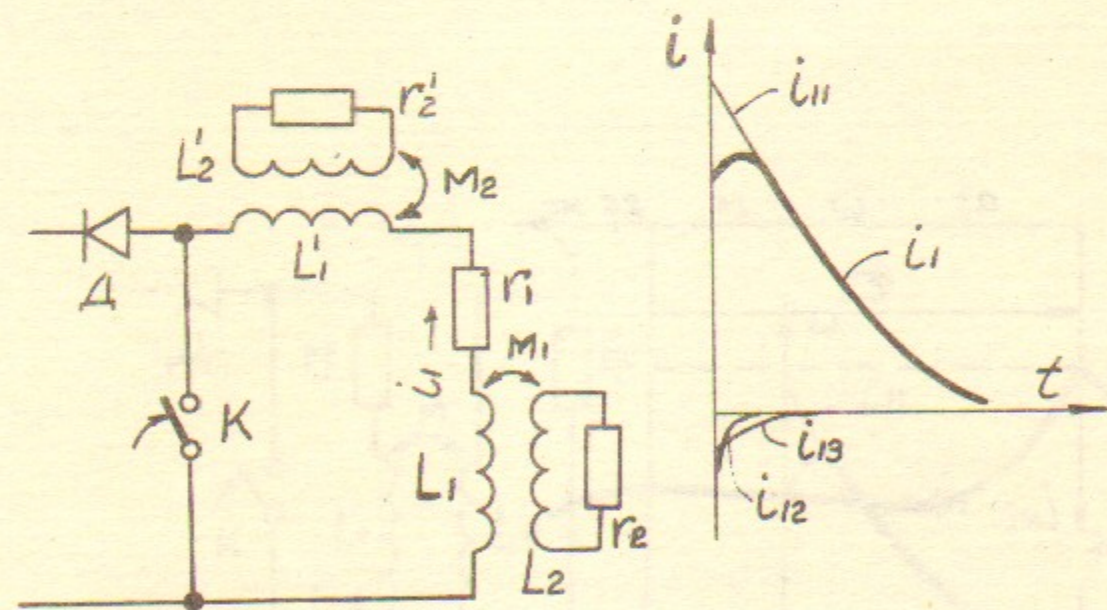


Рис. 2-13. Расчетная схема формирования "плато" с учетом краевого поля /эквивалентный контур $L_2 r_2$ / и поля рассеяния /эквивалентный контур $L_2' r_2'$ /.

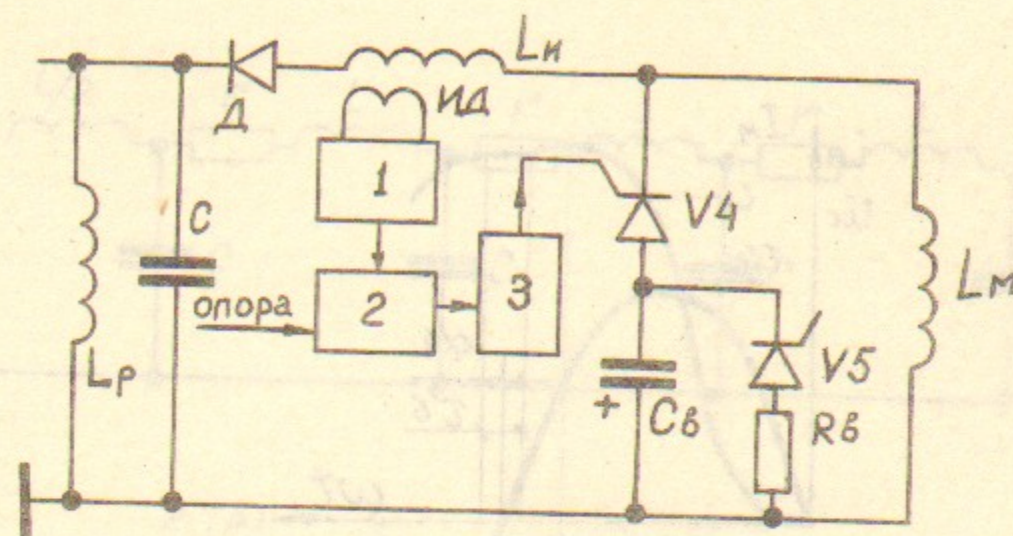


Рис. 3-1. Принципиальная схема устройства формирования "плато" выпуска.

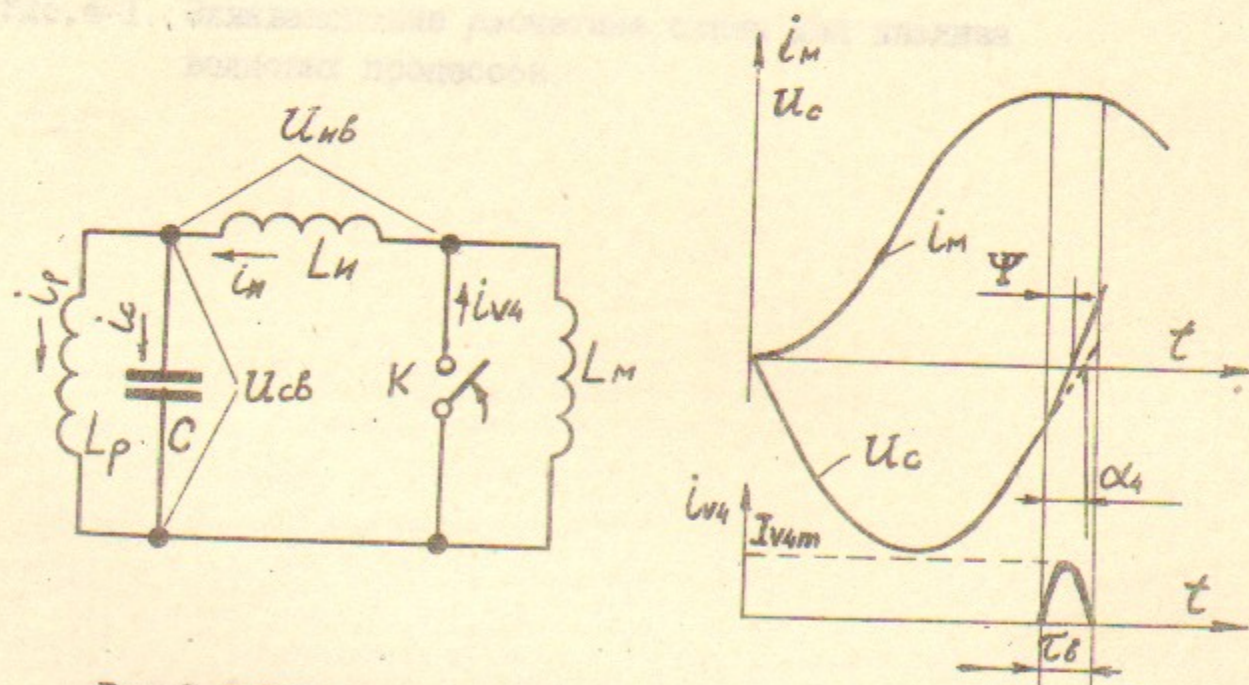


Рис. 3-2. Эквивалентная расчетная схема формирования "плато" выпуска, осциллограммы напряжения на конденсаторной батарее / U_c / и тока коммутатора К / i_{V4} /.

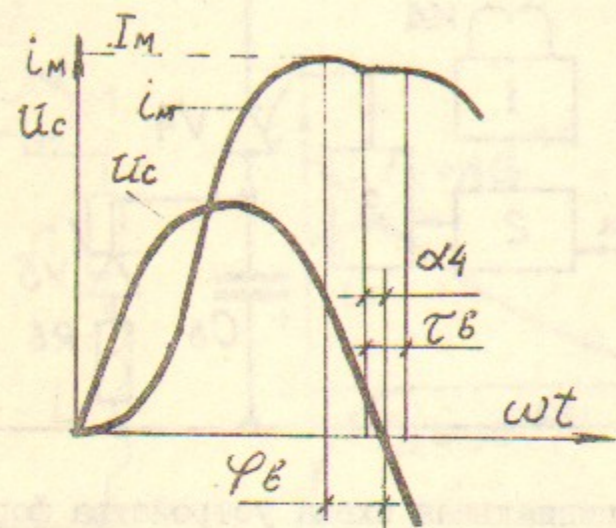


Рис.3-3. Кривые напряжения на батарее U_c и тока магнита i_m .

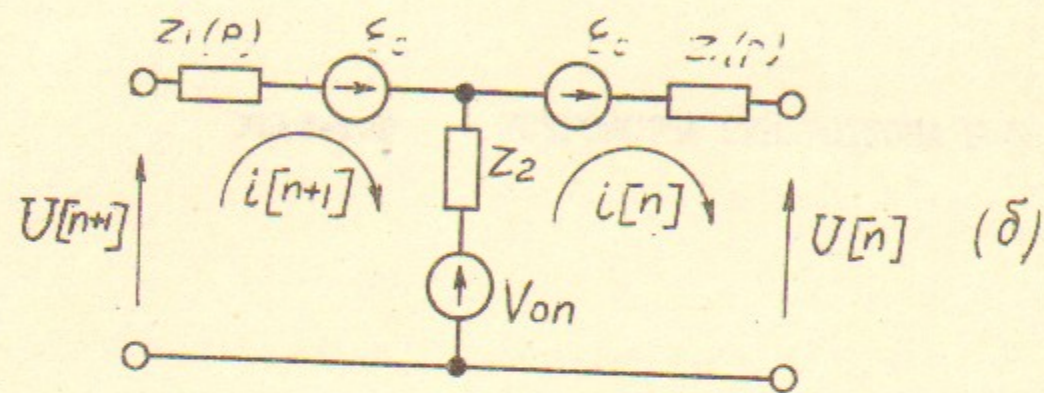
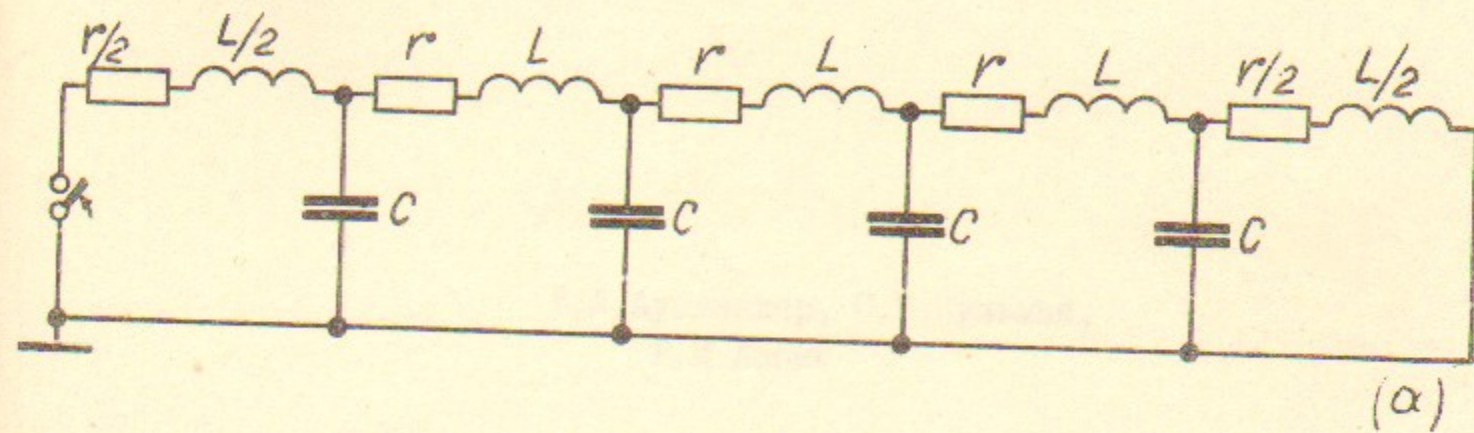


Рис.4-1. Эквивалентные расчетные схемы для анализа волновых процессов.

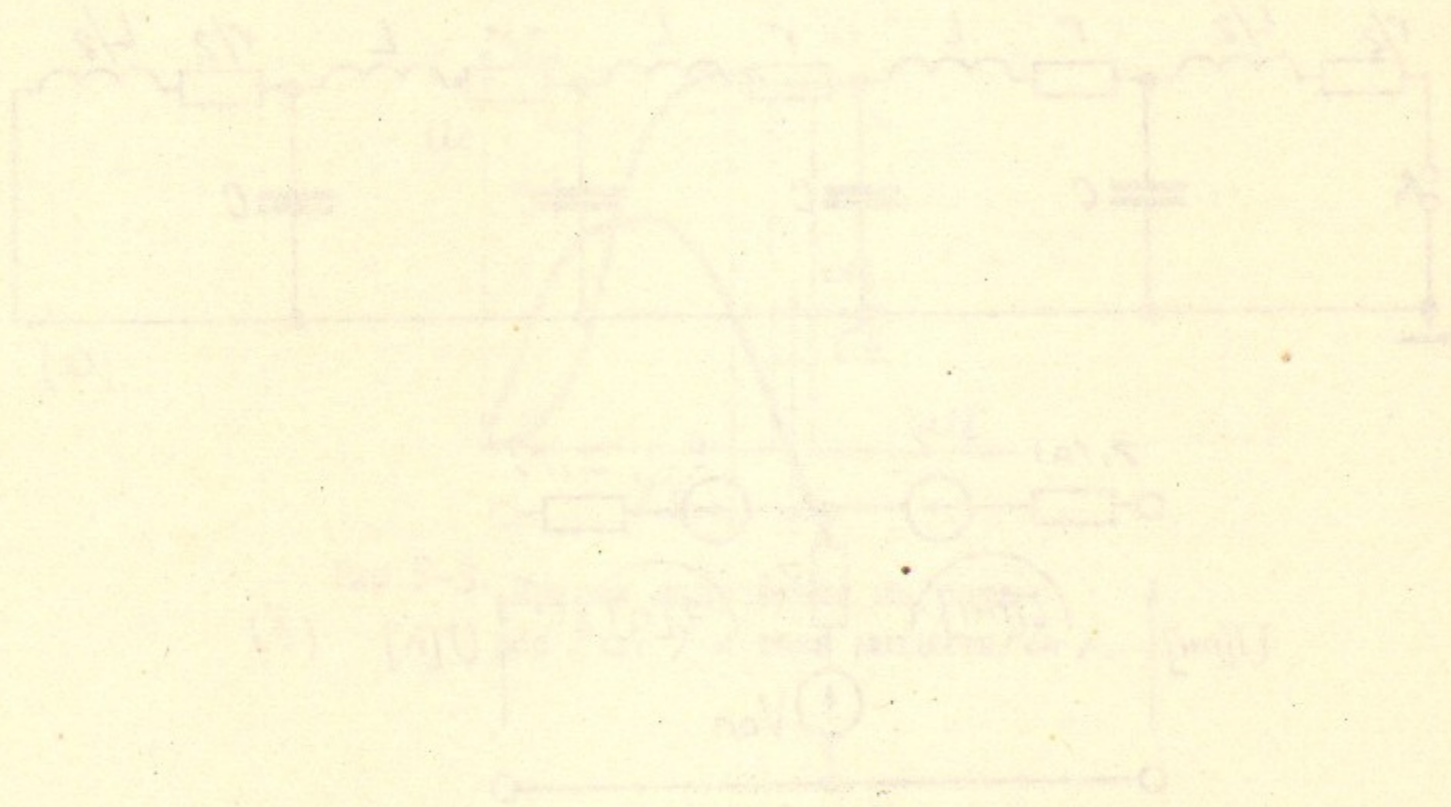


СХЕМА ДЛЯ МОДЕЛИ СИНХРОТРОНА Ф-5, ДЛ
ДЛЯ МОДЕЛИ СИНХРОТРОНА

В.Л.Ауслендер, С.В.Кузьмин,
Р.М.Лапик

FLAT-TOP - УСТРОЙСТВА СИНХРОТРОНА Ф-5

Препринт
№ 82-35

Работа поступила - 3 марта 1982 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 24.03-1982г. МН 03173
Формат бумаги 60x90 I/I6. Усл.2,3 печ.л., I,8 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 35.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90