

46  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

Р.М.Лапик

ИМПУЛЬСНЫЙ ВАРИАНТ СИСТЕМЫ  
ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА  
СИНХРОТРОНА Б-5

ПРЕПРИНТ 82-60



Р.М.Лапик

ИМПУЛЬСНЫЙ ВАРИАНТ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТА СИНХРОТРОНА Б-5

АННОТАЦИЯ

Описывается ряд импульсных устройств питания электромагнитов с применением индуктивных накопителей энергии. Анализируются наиболее приемлемые варианты для использования их в качестве основы для разработки импульсной системы питания магнита синхротрона.

Оглавление

Введение ..... 4

I. Система питания электромагнита протонно-  
-ионного синхротрона Б-5 ..... 6

II. Импульсные системы питания магнитов с применением  
индуктивных накопителей энергии ..... 7

III. Импульсная система питания магнита  
синхротрона Б-5 ..... 16

IV. Импульсная система питания магнита синхротрона Б-5  
с формированием плоской вершины импульса тока ..... 18

## Введение

Известные системы питания электромагнитов синхротронов можно разделить на две большие группы: импульсные и резонансные. Указанное подразделение связано в первую очередь с заданной частотой следования циклов ускорения. Анализ известных устройств питания магнитов показывает, что при частоте циклов близкой частоте питающей сети, разработчики отдадут предпочтение резонансным системам питания [1+7], в то время как при частоте много меньшей частоты сети, используется импульсный вариант системы питания [8+11].

Известные устройства импульсного питания магнитов обычно содержат источник постоянного тока, емкостной накопитель энергии и коммутирующие элементы. Величина запасаемой в емкостном накопителе энергии, без учета потерь в элементах схемы импульсного устройства, соответствует максимальной энергоемкости магнита нагрузки. Разумеется, что в реальном устройстве величина запасенной в накопителе энергии может значительно превосходить максимальную энергоемкость индуктивной нагрузки.

Разделение известных систем питания магнитов на импульсные и резонансные объясняется также энергетическими соображениями, т.к. при работе с большой скважностью импульсные системы энергетически более выгодны, но они теряют это преимущество при работе с малой скважностью, уступая место резонансным системам питания, в которых батареи конденсаторов, включенные параллельно или последовательно с обмоткой электромагнита, образуют резонансный контур, активные потери в этом контуре компенсируются от специального источника возбуждения. Все известные резонансные системы питания выполняются по так называемым схемам со "смещенным резонансом", т.е. используют подмагничивание магнита ускорителя постоянным током [12]. В результате использования подмагничивания резонансная система питания приобретает одно из своих главных преимуществ: уменьшение реактивной мощности конденсаторной батареи в несколько раз в сравнении с резонансной системой без подмагничивания. Максимальная энергоемкость конденсаторной батареи также в несколько раз меньше энергоемкости индуктивной нагрузки.

Поскольку все системы синхротрона (инжектор, устройства впуска и выпуска, ускоряющая ВЧ-система) являются импульсными,

или могут работать в импульсном режиме, то обеспечение импульсного режима работы резонансной системы питания магнита может оказаться полезным для наладки различных систем ускорителя.

Импульсный режим работы системы питания магнита с частотой следования импульсов много меньшей частоты питающей сети обеспечивает значительную экономию энергии при работе ускорителя с пониженной (по условиям физического эксперимента) средней интенсивностью ускоренного пучка. Указанное обстоятельство становится очевидным, если принять во внимание значительную активную мощность, потребляемую резонансными системами питания электромагнитов, например, для синхротрона Б-5 потребляемая мощность составляет 400 кВт.

Некоторые известные резонансные системы питания магнитов выполняются с устройствами формирования плоской вершины импульса тока магнита, что необходимо для медленного выпуска ускоренных частиц [13+16]. В этом случае длительность плоской вершины ограничена величиной порядка 20% периода колебаний. Работа системы питания магнита в импульсном режиме дает возможность формировать в магните ускорителя импульсы тока с большой длительностью плоской вершины, которая может достигать длительности периода колебаний и даже превосходить его.

Поскольку система питания магнита синхротрона (как импульсная, так и резонансная) во многом определяет габариты и стоимость всего ускорителя, то наличие двух независимых систем питания едва ли оправдано экономически. При наличии резонансной системы питания, сооружение импульсной системы может быть оправдано только в случае использования основных элементов оборудования резонансной системы, в первую очередь конденсаторной батареи и при условии сохранения ее величины. Очевидно, что дополнительным условием является возможность быстрого перехода с одного режима работы системы на другой.

Ускоряющая ВЧ-система синхротрона также налагает требование сохранения временной зависимости магнитного поля в режиме ускорения, т.е. обеспечение нулевой производной магнитного поля в начале цикла ускорения с последующим медленным подъемом.

Т.о. импульсная система питания должна быть выполнена из основных элементов резонансной системы питания и обеспечивать формирование импульсов тока с временной зависимостью, характерной для резонансных систем питания, т.е.  $i_m = I_m(1 - \cos \omega t)$ ,

где  $I_m$  - амплитуда переменной составляющей тока резонансной системы питания,  
 $\omega$  - круговая частота резонансной системы питания.

### I. Система питания электромагнита протонно-ионного синхротрона Б-5.

Система питания магнита синхротрона Б-5 [17] является резонансной [1+7] и выполнена с подмагничиванием магнита ускорителя постоянным током, возбуждение колебательного контура осуществляется от однотактного инверторного преобразователя [18]. Поскольку напряжение на магните невелико (около 1 кВ), то распределения конденсаторной батареи и секций магнита по кольцевой схеме [7,19] не требуется, поэтому система питания магнита выполнена сосредоточенной. Подмагничивание магнита ускорителя постоянным током осуществляется без применения специального источника питания (пассивное подмагничивание).

Колебательный контур системы питания (рис. I.) включает конденсаторную батарею С, разделительный реактор  $L_p$  и электромагнит 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  $V_2$ . Для регулирования выходного напряжения источника питания  $U_d$  и, как следствие, - величины магнитного поля в зазоре электромагнита ускорителя, этот источник питания выполнен на управляемых вентилях. При возбуждении колебательного контура, в цепи  $L_m - L_p$  возникает постоянная составляющая тока, которая приблизительно равна амплитуде переменной составляющей. Во временной зависимости тока электромагнита присутствует характерная пауза:  $\Delta \tau = \frac{T}{2\pi} \arccos(1 - T/\tau)$ , где

$T$  - период колебаний в контуре,  
 $\tau = L_m / (r_p + r_m)$  активные сопротивления разделительного реактора и магнита нагрузки.

Связь между напряжением на колебательном контуре ( $U_c$ ) и напряжением источника питания инверторного преобразователя ( $U_d$ ) находится из выражения:  $U_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_c \cos \varphi$ , где  $\varphi$  - углы коммутации вентиля инверторного преобразователя. Временная зависимость магнитного поля, соответствующая режиму ускорения, имеет вид:  $H_m = H_{max}(1 - \cos \omega t)$ ,

где

$H_{max}$  - амплитуда переменной составляющей магнитного поля,  
 $\omega$  - круговая частота колебаний в контуре.

Стабилизация магнитного поля на заданных уровнях инжекции и выпуска заряженных частиц осуществляется путем формирования "плато" во временной зависимости тока магнита (на рис. I. устройства формирования "плато" не показаны).

Система питания магнита включает в себя также устройство синхронизации частоты циклов работы с частотой питающей сети (на рис. I. не показано). Синхронизация указанных частот осуществляется методом изменения эквивалентной индуктивности контура.

На рис. I. приведены временные зависимости напряжения на конденсаторной батарее ( $U_c$ ), тока магнита ( $I_m$ ) и тока реактора ( $I_p$ ) в режиме работы системы питания без формирования "плато".

Основные параметры системы питания магнита синхротрона Б-5 следующие:

Частота циклов ускорения	50 Гц
Максимальное значение тока магнита	11 кА
Максимальная энергоемкость магнита	50 кДж
Максимальная энергоемкость конденсаторной батареи	20 кДж
Длительность паузы тока ( $\Delta \tau$ )	1,8 мс
Индуктивность магнита	0,7 мГ
Индуктивность разделительного реактора	1,4 мГ
Емкость конденсаторной батареи	0,024 Ф
Потребляемая мощность	400 кВт.

### II. Импульсные системы питания магнитов с применением индуктивных накопителей энергии.

Создание импульсной системы питания магнита синхротрона, отвечающей всем требованиям, которые изложены во введении, является непростой задачей. Эта задача не может быть решена обычными методами, т.к., например, использование известных импульсных устройств питания с емкостными накопителями энергии потребует значительного увеличения конденсаторной батареи, причем вре-

менная зависимость тока магнита будет чисто синусоидальной, т.е. без наличия характерного "смещенного резонанса", что является уже неприемлемым по двум пунктам.

Импульсная система питания, удовлетворяющая главному требованию (сохранение величины конденсаторной батареи), должна содержать дополнительный накопитель энергии, т.к. уже отмечалось, что энергоемкость конденсаторной батареи резонансной системы питания в несколько раз меньше энергоемкости магнита нагрузки.

Представляет интерес рассмотреть несколько вариантов импульсных генераторов с индуктивными накопителями энергии, т.к. электромагнитные процессы в резонансной системе питания с подмагничиванием, по-существу, являются процессами обмена энергией между разделительным реактором (индуктивный накопитель) и индуктивной нагрузкой (магнит ускорителя). Из рис.1. видно, что кривые токов магнита ( $i_M$ ) и разделительного реактора ( $i_P$ ) находятся в противофазе, т.е. подъем тока магнита соответствует спаду тока разделительного реактора.

В работе [20] описана простейшая схема импульсного генератора с индуктивным накопителем энергии. Описанное устройство формирует на индуктивной нагрузке синусоидальный импульс напряжения, который в результате интегрирования на индуктивности магнита обеспечивает в нем заданную временную зависимость тока:

$i_M = I_m(1 - \cos \omega t)$ , причем величина энергоемкости, используемой конденсаторной батареи, может быть существенно меньше энергоемкости магнита нагрузки. Т.к. описанное устройство удовлетворяет главным требованиям, предъявляемым к импульсной системе питания магнита, то представляет интерес провести более подробный анализ известной схемы.

Принципиальная схема импульсного устройства питания, выполненного по известной схеме, и осциллограммы, поясняющие его работу, приведены на рис.2.

Устройство содержит индуктивный накопитель  $L_H$ , коммутатор К, конденсаторную батарею С и магнит нагрузки  $L_M$ . Источник питания, обеспечивающий начальное значение тока индуктивного накопителя, не показан. В исходном состоянии ток индуктивного накопителя замыкается через коммутатор К.

В момент времени  $t_0$  коммутатор К размыкается и ток индуктивного накопителя ( $i_H$ ) замыкается через конден-

саторную батарею. По истечении периода колебаний в контуре:  $T = 2\pi \sqrt{L_3 C}$ , где  $L_3 = \frac{L_H \cdot L_M}{L_H + L_M}$ , включается коммутатор К, возвращая схему в исходное состояние.

После размыкания коммутатора, процессы в схеме, без учета активных потерь, описываются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L_H \frac{di_H}{dt} + \frac{1}{C} \int i_C dt &= 0 \\ L_H \frac{di_H}{dt} + L_M \frac{di_M}{dt} &= 0 \\ i_H &= i_C + i_M \end{aligned} \right\} (2-1)$$

В результате решения этих уравнений находятся временные зависимости для токов и напряжений в схеме:

$$\left. \begin{aligned} i_C &= I_{H0} \cos \omega t \\ i_C &= I_{H0} \sqrt{\frac{L_3}{C}} \sin \omega t \\ i_M &= I_{H0} \frac{n}{n+1} (1 - \cos \omega t) \\ i_H &= \frac{I_{H0}}{n+1} (n + \cos \omega t) \end{aligned} \right\} (2-2),$$

где

$I_{H0}$  - начальное значение тока индуктивного накопителя,

$L_3$  - эквивалентная индуктивность колебательного контура,

$$n = L_H / L_M$$

$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_3 C}}$  - круговая частота колебаний в контуре.

Для дальнейшего анализа рассматриваемой схемы введем коэффициент передачи энергии, определяемый отношением переданной в индуктивную нагрузку энергии к начальной энергоемкости индуктивного накопителя:  $\sigma = \frac{W_M}{W_{H0}}$  и коэффициент умножения по энергии, определяемый отношением переданной в нагрузку энергии к максимальной энергоемкости используемой конденсаторной батареи:  $\gamma = \frac{W_M}{W_C}$ . Можно показать, что выражения для введенных коэффициентов имеют вид:  $\sigma = \frac{4n}{(n+1)^2}$ ,  $\gamma = \frac{4n}{n+1}$ .

Первый коэффициент характеризует эффективность передачи энергии индуктивного накопителя в индуктивную нагрузку, а второй - выигрыш в энергоемкости используемой конденсаторной батареи. Графическая зависимость этих коэффициентов от соотношения

индуктивностей накопителя и нагрузки приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что своего максимального значения коэффициент  $\beta$  достигает при  $n=1$ , т.е. при равенстве индуктивностей нагрузки и накопителя в нагрузку передается вся запасенная энергия индуктивного накопителя. Однако при этом коэффициент умножения по энергии  $\beta = 2$ , т.е. энергоемкость используемой конденсаторной батареи только в два раза меньше энергоемкости магнита нагрузки.

Коэффициент умножения по энергии достигает своего максимального значения  $\beta = 4$  при  $n = \infty$ , однако при этом коэффициент передачи энергии  $\beta = 0$ .

При обычно заданных значениях индуктивности нагрузки и времени подъема магнитного поля, необходимая величина индуктивности накопителя и емкости конденсаторной батареи должна находиться из условия их общей минимальной стоимости, с учетом стоимости коммутатора и источника питания. На рис. 4. приведена примерная зависимость стоимости конденсаторной батареи ( $S_C$ ), стоимости накопителя ( $S_H$ ) и их суммарной стоимости ( $S_{\Sigma}$ ). Смещение минимума суммарной стоимости в сторону  $n > 1$ , т.е. в сторону уменьшения коэффициента передачи энергии, объясняется более высокой удельной стоимостью конденсаторов в сравнении с удельной стоимостью индуктивного накопителя. Следует заметить, что приведенный анализ работы импульсного генератора (рис. 2.) производился пренебрегая активными потерями в его элементах. Можно показать, что с учетом активных потерь, временная зависимость тока магнита нагрузки имеет вид:

$$i_M = \frac{I_{H0}}{C L_M} \left[ \frac{e^{-\delta t}}{(\alpha - \delta)^2 + \omega^2} + \frac{e^{-\alpha t}}{\omega \sqrt{(\delta - \alpha)^2 + \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi) \right], \quad (2-3)$$

$$\text{где } \varphi = \arctg \frac{\omega}{\delta - \alpha} \quad (2-4),$$

$I_{H0}$  - начальное значение тока накопителя,

$C$  - емкость конденсаторной батареи,

$-\delta$  - вещественный корень характеристического уравнения колебательной системы:

$$p^3 + \frac{L_M \gamma_H + L_H \gamma_M}{L_H L_M} p^2 + \left( \frac{L_M + L_H}{L_H L_M C} + \frac{\gamma_H \cdot \gamma_M}{L_H L_M} \right) p + \frac{\gamma_H + \gamma_M}{L_H L_M C} = 0, \quad (2-5)$$

$\gamma_H, \gamma_M$  - активные сопротивления накопителя и магнита,  
 $L_H, L_M$  - индуктивности накопителя и магнита,  
 $-\alpha$  - вещественная часть комплексных корней характеристического уравнения (2-5).

Для практической реализации описываемого устройства (рис. 2) необходимо разработать коммутатор К. Рассмотрим возможность выполнения этого коммутатора на управляемых вентилях (тиристорах), которые, как известно, требуют создания специальных условий для их выключения.

На рис. 5 представлены некоторые возможные варианты выключения управляемого вентиля  $V_K$ , шунтирующего индуктивный накопитель  $L_H$ .

В варианте "а" вентиль  $V_K$  выключается импульсом напряжения на вторичной обмотке  $W_2$  импульсного трансформатора ИГ [23+25]. Импульсный генератор ИГ обеспечивает необходимые параметры выключающего импульса напряжения.

В варианте "б" необходимое обратное напряжение на вентиле  $V_K$  формируется путем резонансного заряда емкости  $C$  от специальной пусковой емкости  $C_P$  через вентиль  $V_P$  и индуктивность  $L_P$ . Пренебрегая временем заряда емкости  $C$ , время присутствия обратного напряжения на вентиле  $V_K$

$$\Delta t_{обр} = C U_{co} / I_{H0}, \quad (2-6)$$

где  $U_{co}$  - напряжение на емкости  $C$ , получаемое в результате ее резонансного заряда,

$I_{H0}$  - начальный ток индуктивного накопителя.

В варианте "в" после включения вентиля  $V_P$  к вентилю  $V_K$  прикладывается обратное напряжение, равное начальному напряжению на емкости  $C$ , которое обеспечивает специальный источник питания  $U_P$ . Время присутствия обратного напряжения на вентиле  $V_K$  может быть найдено также из (2-6). Очевидно, что в этом варианте необходим вентиль в цепи индуктивной нагрузки /Д/.

В варианте "г" в качестве управляемого вентиля используется управляемый выпрямитель  $U_H$ , обеспечивающий начальный ток накопителя. Очевидно, что для нормальной работы этого устройства необходимо выполнить условие:  $U_P > U_H$ , что обес-

печить нетрудно. В остальном это устройство аналогично предыдущему.

В самом общем виде схема импульсного генератора с индуктивным накопителем энергии представлена на рис.5-д. Преобразователь П обеспечивает передачу энергии индуктивного накопителя  $L_H$  в индуктивную нагрузку  $L_M$ . Некоторые простейшие варианты этого преобразователя представлены на рис.5-а,б,в,г.

Современный уровень технологии силовых полупроводниковых приборов позволяет серийно производить управляемые вентили с импульсной коммутируемой мощностью порядка  $10^7$  Вт в единице, поэтому создание импульсных преобразователей мощностью порядка  $10^9$  Вт не является трудновыполнимой задачей. Из изложенного выше следует, что главной проблемой, возникающей при разработке импульсного генератора с индуктивным накопителем энергии, является не размыкание накопителя, а оптимальное построение импульсного преобразователя. Следует однако отметить, что это относится к устройствам с длительностью выходного импульса миллисекундного диапазона:  $\sim (1+100)$  мс. Создание более быстродействующих устройств ограничивается частотными характеристиками управляемых вентилях, а при более значительной длительности импульса целесообразнее использовать источник питания с квазинепрерывным режимом работы.

К недостаткам импульсных генераторов с использованием рассмотренных простейших преобразователей следует отнести низкое значение коэффициента умножения по энергии  $\gamma$ . Приняв для определенности  $n = L_H/L_M = 3$ , этот коэффициент  $\gamma = 3$ , при этом эффективность передачи энергии накопителя в нагрузку составит 75% ( $\sigma = 0,75$ ). Практически, эти показатели весьма близки к оптимальным для рассмотренного устройства.

Более значительного выигрыша в энергоемкости используемой конденсаторной батареи можно достичь при использовании более сложных преобразователей [21,22], у которых значение коэффициента  $\gamma$  практически неограничено. Однако эти преобразователи достаточно сложны и имеют еще целый ряд недостатков, например, они не обеспечивают рекуперации энергии индуктивной нагрузки в накопитель и питающую сеть.

В связи с этим представляет интерес рассмотреть возможность построения более простых генераторов импульсных токов с

индуктивными накопителями энергии, которые свободны от приведенных недостатков.

Управляемый ventиль  $V_K$  со схемой его искусственной коммутации (рис.5-а,б,в,г) можно рассматривать как полностью управляемый ventиль, имеющий "жесткую" характеристику, т.е. ventиль, который может быть включен и выключен в заданный момент времени. Это обстоятельство дает принципиально новые возможности построения импульсных преобразователей для генераторов импульсных токов с индуктивными накопителями энергии.

На рис.6 представлен генератор импульсных токов с индуктивным накопителем энергии  $L_H$ , работающий на индуктивную нагрузку  $L_M$ . Для определенности, в качестве аналога полностью управляемого вентиля взят вариант "в" на рис.5.

После включения вентиля  $V_{K2}$  к накопителю  $L_H$  присоединяется источник питания  $E_1$ , работающий в выпрямительном режиме. При достижении током накопителя  $L_H$  заданного уровня  $I_{HO}$  (момент времени  $t_0$ ), включается ventиль  $V_{K1}$ , а  $V_{K2}$  выключается положительным напряжением на емкости, которое обеспечивает вспомогательный источник питания  $E_2$ . Ток накопителя замыкается через емкость  $C$ , перезаряжая ее, при напряжении на емкости  $-U_{cm}$  включается ventиль  $V_{K2}$ , а ventиль  $V_{K1}$  выключается и батарея разряжается на магнитную нагрузку  $L_M$ . При напряжении на конденсаторной батарее  $+U_K$  вновь включается  $V_{K1}$ , а  $V_{K2}$  выключается и т.д.

В результате на конденсаторной батарее формируется квазипеременное напряжение, ограниченное значениями  $-U_{cm}$  и  $+U_K$ , это напряжение приложено к магниту нагрузки, обеспечивая возрастание в нем тока.

Величина напряжения  $+U_K$  выбирается исходя из обеспечения надежного выключения вентиля  $V_{K2}$ . Регулируя во время импульса тока нагрузки величину напряжения  $-U_{cm}$ , представляется возможным формировать фронт импульса тока нагрузки с заданной временной зависимостью, в частности, осуществляя включение вентиля  $V_{K2}$  при напряжении на батарее  $U_{nl}$ , начиная с момента времени  $t_1$  устройство работает в режиме формирования "плато" тока нагрузки (на рисунке  $-U_{cm} = const$ , что соответствует линейной зависимости тока нагрузки). Величина напряжения  $U_{nl}$  выбирается исходя из равенства напряже-



ния на батарее падению напряжения на активном сопротивлении обмотки магнита, что является условием формирования "плато". Устройство работает до выравнивания токов накопителя и нагрузки (момент времени  $t_2$ ), начиная с которого коммутация вентиля  $V_{k1}$  и  $V_{k2}$  осуществляется при напряжении на батарее  $+U_{cm}$  и  $-U_k$ , что приводит к спаду тока нагрузки до нуля (момент времени  $t_3$ ).

Начиная с момента времени  $t_2$  источник питания  $E_1$  переводится в инверторный режим и энергия накопителя возвращается в питающую сеть.

Из принципа работы устройства следует, что при большом числе циклов величина максимальной энергоемкости конденсаторной батареи  $W_c = C |U_{cm}|^2 / 2$  будет много меньше энергоемкости магнита нагрузки  $W_M = L_M I_{mm}^2 / 2$ , т.е. значение коэффициента умножения по энергии  $\gamma' = W_M / W_c$  практически неограничено.

Можно показать, что для рассматриваемого устройства эффективность передачи энергии накопителя в индуктивную нагрузку определяется коэффициентом передачи энергии

$$\sigma' = \frac{1}{n+1} \quad (2-7),$$

где  $n = L_H / L_M$ . Стремление увеличить коэффициент передачи энергии приводит к уменьшению индуктивности накопителя в сравнении с индуктивностью магнита нагрузки (2-7), что является существенным недостатком описываемого устройства, т.к. это приводит к большой токовой загрузке управляемых вентилях импульсного преобразователя.

Т.о. описанное устройство решает задачу передачи энергии индуктивного накопителя в индуктивную нагрузку с использованием конденсаторной батареи небольшой энергоемкости ( $\gamma \gg 1$ ), однако для эффективной передачи энергии это устройство требует использования сильноточного индуктивного накопителя энергии ( $n \ll 1$ ).

Указанный недостаток устраняется при использовании генератора импульсных токов, представленного на рис.7. После включения управляемого вентиля  $V_2$ , в индуктивном накопителе  $L_H$  начинает нарастать ток, обеспечиваемый источником питания  $E_1$ , работающим в режиме выпрямителя. При достижении током накопителя заданного уровня  $I_{nc}$ , включается управляемый вентиль  $V_1$ , а вентиль  $V_2$  выключается положительным напряжением

$+U_{cc}$  на конденсаторной батарее  $C$  (источник питания, обеспечивающий это начальное напряжение, на рисунке не показан). В результате ток накопителя замыкается через конденсаторную батарею, перезаряжая ее. При появлении на батарее отрицательного напряжения включается управляемый вентиль  $V_3$ , присоединяя магнит нагрузки  $L_M$  к устройству питания. При достижении на батарее заданного значения  $-U_{cm}$  включается вентиль  $V_2$ , а  $V_1$  запирается и конденсаторная батарея разряжается на индуктивность магнита нагрузки. При положительном напряжении на конденсаторной батарее  $+U_k$  вновь включается вентиль  $V_1$ , а  $V_2$  запирается и т.д. В результате на конденсаторной батарее формируется квазитреугольное напряжение, ограниченное значениями  $-U_{cm}$  и  $+U_k$ .

Это напряжение через открытый вентиль  $V_3$  прикладывается к магниту нагрузки, в котором формируется возрастающая часть импульса тока. Т.о. устройство работает до выравнивания токов накопителя и нагрузки, т.е. в этой части работа устройства аналогична рассмотренной ранее для варианта, приведенного на рис.5.

После выравнивания токов накопителя и нагрузки устройство работает следующим образом: при положительном напряжении на конденсаторной батарее  $+U_k$  одновременно с вентилем  $V_1$  включается вентиль  $V_4$ . В результате вентили  $V_2$  и  $V_3$  выключаются, ток нагрузки замыкается через вентиль  $V_4$ , а ток накопителя — через конденсаторную батарею, перезаряжая ее. При напряжении  $-U_{cm}$  включаются вентили  $V_2$  и  $V_3$ , а  $V_1$  и  $V_4$  выключаются и т.д. В результате на конденсаторной батарее формируется пилообразное напряжение. Это напряжение, соответствующее запертому состоянию вентиля  $V_4$ , прикладывается к магниту нагрузки, в котором продолжает формироваться фронт импульса тока.

После достижения максимума тока нагрузки и исчерпания энергии накопителя, коммутация управляемых вентилях  $V_1$  и  $V_4$  осуществляется при напряжении  $+U_{cm}$  и  $-U_k$  и энергия нагрузки возвращается в накопитель. Во время рекуперации энергии из нагрузки в накопитель источник питания  $E_1$ , выполненный на управляемых вентилях, переводится в инверторный режим и энергия накопителя возвращается в питающую сеть.

Описанное устройство обладает всеми достоинствами простейших многоциклических устройств: возможностью работы в режиме автоматического управления временной зависимостью фронта импульса тока нагрузки путем изменения напряжения  $U_{cm}$  по заданному закону; возможностью работы с формированием плоской вершины импульса тока, причем последний режим предпочтительнее, т.к. мощность, развиваемая устройством на нагрузке, падает с подъемом тока из-за наличия периодических пауз напряжения на нагрузке (см. рис. 7, зависимость  $U_M$ ). Дополнительными достоинствами описанного устройства являются возможность рекуперации энергии нагрузки и использование накопителя с индуктивностью много большей индуктивности нагрузки, что снижает токовую загрузку управляемых клапанов импульсного преобразователя.

### III. Импульсная система питания магнита синхротрона Б-5.

Принимая во внимание требования, предъявляемые к импульсной системе питания магнита синхротрона Б-5, учитывая, что максимальная энергоемкость магнита невелика (50 кДж), учитывая также, что резонансная система уже содержит конденсаторную батарею, а в цепи магнита уже присутствует неуправляемый клапан (см. рис. 1), для импульсной системы питания синхротрона Б-5 целесообразно использовать простейший вариант генератора импульсных токов с индуктивным накопителем энергии, взяв за основу вариант "г" на рис. 5.

На рис. 8 приведена схема основных цепей импульсной системы питания магнита синхротрона Б-5 [29]. В качестве индуктивного накопителя  $L_H$  используется разделительный реактор резонансной системы питания  $L_P$  (рис. 1). В качестве источника питания  $E_1$  используется источник питания инверторного преобразователя  $U_d$  (рис. 1). Дополнительными элементами являются управляемый клапан  $V$  и вспомогательная зарядная цепь конденсаторной батареи  $C$ , содержащая резистор  $R$  и источник питания  $E_2$ .

Из сравнения схем, приведенных на рисунках 1 и 8, следует, что переход с одной схемы на другую производится путем шунтирования цепи инверторного реактора  $L_d$  и клапана  $V_2$  (рис. 1) и подключения конденсаторной батареи  $C$  к накопителю через управляемый клапан  $V$  (рис. 8), что можно осуществить в течение нескольких минут.

Импульсное устройство питания магнита синхротрона Б-5 работает следующим образом: в момент времени  $t_0$  (см. рис. 8) включается управляемый выпрямитель  $E_1$ , выходное напряжение выпрямителя прикладывается к индуктивному накопителю  $L_H$ , в котором начинает нарастать ток с временной зависимостью:

$$i_H = \frac{E_1}{R_H} (1 - e^{-\frac{R_H}{L_H} t}), \quad (3-1)$$

где  $R_H$  — активное сопротивление накопителя. Можно показать, что КПД накопления энергии, определяемый отношением энергии накопителя к потребленной от источника питания энергии, находится из выражения:

$$\eta = 1 - \frac{2}{3} \frac{t_H}{\tau_H}, \quad (3-2)$$

где  $t_H$  — время накопления энергии,

$\tau_H$  — постоянная времени накопителя.

Приведенное выражение имеет достаточную точность при  $\frac{t_H}{\tau_H} < 0,25$ , что всегда должно иметь место для получения высокого КПД. При достижении током накопителя заданного уровня ( $I_{H0}$ ), включается клапан  $V$  (момент времени  $t_1$ ) и при  $E_2 > E_1$ , что необходимо для нормальной работы схемы, управляемый выпрямитель  $E_1$  запирается, а ток накопителя замыкается через конденсаторную батарею, перезаряжая ее. Отрицательная полуволна напряжения на конденсаторной батарее прикладывается через диод  $D$  к магниту нагрузки  $L_M$ , в котором формируется возрастающая часть импульса тока. Как уже было показано, пренебрегая потерями в элементах схемы, временная зависимость тока магнита определяется выражением:

$$i_M = I_{H0} \frac{n}{n+1} (1 - \cos \omega t) \quad \text{где } \omega = \frac{1}{\sqrt{L_3 C}}, \quad L_3 = \frac{L_H \cdot L_M}{L_H + L_M}.$$

После завершения формирования импульса тока, в момент прохождения напряжения на конденсаторной батарее через нуль (момент времени  $t_2$ ), вновь включается управляемый выпрямитель  $E_1$ . Выходное напряжение этого выпрямителя прикладывается к катоду клапана  $V$  и он выключается, а ток накопителя замыкается через  $E_1$ . По истечении небольшого промежутка времени  $\Delta t = t_3 - t_2$ , необходимого для надежного выключения клапана  $V$ , управляемый выпрямитель  $E_1$  переводится в инвертор-

ный режим и энергия накопителя возвращается в питающую сеть. После спада тока накопителя до нуля и последующего заряда конденсаторной батареи от вспомогательного источника питания  $E_2$  через резистор  $R$ , схема возвращается в исходное состояние.

Т.о. устройство формирует в магните ускорителя импульс тока с временной зависимостью, характерной для резонансных систем питания. Как уже указывалось, такая временная зависимость облегчает захват частиц в режим ускорения и снижает требования, предъявляемые к ускоряющей ВЧ-системе в части скорости перестройки частоты.

#### IV. Импульсная система питания магнита синхротрона Б-5 с формированием плоской вершины импульса тока.

В практике физического эксперимента, например, для медленного вывода ускоренных частиц, необходимо наличие плоской вершины импульса тока магнита. Как уже указывалось во введении, применяя известные способы формирования плоской вершины импульса тока в резонансных системах питания магнитов, длительность "плато" ограничивается величиной порядка 20% периода колебаний [16]. Одним из преимуществ импульсной системы питания магнита является возможность формирования "плато" значительно большей длительности.

Мощность активных потерь на вершине импульса тока в синхротроне Б-5 составляет около 500 кВт, при длительности "плато" равной периоду колебаний:  $t_{пл} = T = 20$  мс, энергия, рассеиваемая на "плато", составит 10 кДж. Компенсация активных потерь на "плато" от емкостного накопителя энергии [26,27] потребует наличия конденсаторной батареи энергоемкостью 10 кДж при напряжении около [40]В, т.е. необходимая емкость батареи составит 13 Ф. Исключить неприемлемый емкостной накопитель энергии с низким значением напряжения можно только путем значительного усложнения схемы устройства формирования "плато" [28].

Особенность импульсной системы питания магнита синхротрона Б-5 заключается в том, что стремление увеличить коэффициент умножения по энергии  $\gamma$  (см.гл. II) приводит к увеличению  $n = L_H/L_M$  (рис.3), а это обстоятельство приводит к тому, что при  $n > 1$  коэффициент передачи энергии накопителя меньше еди-

ницы. Оптимальное значение  $n$  (см.рис.4) находится около  $n = 2+3$ , поэтому легко видеть, что, в этом случае, при максимальном значении тока нагрузки остается нереализованной часть энергии индуктивного накопителя:

$$W_c = W_{H0} \left[ 1 - \frac{4n}{(n+1)^2} \right], \quad (4-1)$$

где  $W_{H0}$  - начальное значение энергии накопителя.

Остаточная энергия может быть затрачена на компенсацию активных потерь на вершине импульса тока магнита.

Анализ известных способов формирования "плато", с учетом особенностей импульсной системы питания магнита синхротрона Б-5, показал, что наиболее приемлемым в нашем случае является способ формирования "плато" с компенсацией потерь на вершине импульса тока за счет запаса энергии индуктивного накопителя [30] (рис.9).

Отличие работы этого устройства от рассмотренного (рис.8) заключается в следующем: отрицательная полуволна напряжения на конденсаторной батарее прикладывается к магниту ускорителя через управляемый клапан  $V_2$ . После формирования фронта импульса тока магнита, при напряжении на конденсаторной батарее  $+U_{пл}$ , включается клапан  $V_3$ , а клапан  $V_2$  запирается. При этом ток накопителя энергии  $L_H$  замыкается через конденсаторную батарею, перезаряжая ее. При напряжении на конденсаторной батарее  $-U_{пл}$  включается клапан  $V_2$ , а  $V_3$  запирается и т.д. В результате на конденсаторной батарее формируется квазипеременное напряжение с постоянной составляющей, величина которой определяется выбранными значениями  $+U_{пл}$  и  $-U_{пл}$ . Переменное напряжение, соответствующее закрытым состояниям клапана  $V_3$  прикладывается к магниту нагрузки, обеспечивая компенсацию активных потерь в течение длительности "плато".

Величина напряжения  $+U_{пл}$  выбирается минимальной, исходя из обеспечения надежного выключения клапана  $V_2$ . Уровень напряжения  $-U_{пл}$  выбирается из условия обеспечения равенства постоянной составляющей напряжения на конденсаторной батарее падению напряжения на активном сопротивлении обмотки магнита при максимальном значении тока, что является условием формирования плоской вершины импульса тока.

По истечении заданного времени длительности плоской вершины, система управления вентилями тиристорного переключателя (на рисунке не показана) прекращает вырабатывать запускающие импульсы вентиля  $V_3$  и дальнейшая работа схемы аналогична уже рассмотренной ранее (см. гл. III). Следует заметить, что переменная составляющая напряжения на конденсаторной батарее, соответствующая плоской вершине, вызывает появление пульсаций тока магнита на вершине импульса, но величина этих пульсаций незначительна из-за большой величины индуктивности магнита нагрузки, что обычно имеет место.

Представляет интерес получить выражение для длительности плоской вершины в зависимости от параметров схемы устройства питания. Как было показано ранее, выражение для коэффициента передачи энергии индуктивного накопителя имеет вид  $\sigma = \frac{4n}{(n+1)^2}$  поэтому, пренебрегая активными потерями во всех элементах схемы кроме магнита нагрузки, можно записать:

$$I_{пл}^2 R_M t_{пл} = W_{но} \left[ 1 - \frac{4n}{(n+1)^2} \right], \quad (4-2)$$

где  $I_{пл}$  - ток магнита на "плато",  
 $R_M$  - активное сопротивление магнита,  
 $t_{пл}$  - длительность "плато",  
 $W_{но}$  - начальное значение энергии накопителя.

Из (4-2): 
$$t_{пл} = \frac{W_{но}}{I_{пл}^2 R_M} \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (4-3)$$

Учитывая, что  $I_{пл} = \frac{2n}{n+1} I_{но}$  получаем:

$$t_{пл} = \tau_M \frac{(n-1)^2}{8n} \quad (4-4)$$

где  $\tau_M = L_M/R_M$  - постоянная времени магнита нагрузки.

Полученное выражение для длительности плоской вершины (4-4) определяет максимально возможную длительность "плато" в рассматриваемой схеме, т.к. при его выводе были учтены только активные потери на "плато" в индуктивной нагрузке, очевидно, что реальная длительность "плато" будет несколько меньше.

Т.о. импульсное устройство, приведенное на рис. 9, обеспечивает формирование в магните нагрузки импульсов тока с плос-

кой вершиной, причем временная зависимость фронта импульса соответствует закону изменения тока, характерному для резонансных систем питания электромагнитов. Описанное устройство обладает достоинствами резонансных систем питания как в части временной зависимости тока нагрузки, так и возможности использования конденсаторной батареи значительно меньшей емкости в сравнении с емкостью магнита нагрузки.

Рассмотренное устройство выполняется из основных элементов резонансной системы питания: в качестве индуктивного накопителя используется разделительный реактор резонансной системы питания (рис. I), основной источник питания используется как в резонансном, так и в импульсном режимах работы. Дополнительными элементами являются управляемый вентиль  $V$  и вспомогательный источник питания  $E_2$  с резистором  $R$  (рис. 8). В случае работы импульсного устройства питания в режиме с плоской вершиной импульса тока нагрузки, дополнительным элементом является также тиристорный переключатель, выполненный на управляемых вентилях  $V_2$  и  $V_3$  (рис. 9).

Т.о. описанное устройство удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к импульсному варианту системы питания магнита, которые изложены во введении.

## Л и т е р а т у р а

1. В.П.Борисов, М.А.Гашев, О.А.Гусев, А.Н.Константинов, И.В.Лавров, Н.А.Моносзон, А.Г.Нечаев, Ф.М.Спевакова, А.М.Столлов. Основные параметры и опыт наладки системы питания электромагнита Ереванского синхротрона. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Т.1, 1970, М., 212.
2. В.Л.Ауслендер, С.В.Кузьмин, Р.М.Лапик, В.П.Томилов, А.А.Тувик. Система питания электромагнита протонного синхротрона Б-5. Препринт ИЯФ 80-134. Новосибирск, 1980.
3. 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).
4. D.E. Huttar and P.R. Cheeseman. A rapid cycling flat-topped synchrotron magnet system. *IEEE tr. on NS*, vol. NS-18, N3, 1971, 839.
5. R.R. Wilson. Cornell electron synchrotron, Laboratory of Nuclear Studies, Cornell University Ithaca, New York, 1967, 65-33.
6. M.S. Livingston. The Cambridge electron accelerator. *CERN Symposium on high energy accelerators and pion physics*, Geneva, 1956, *Proceedings*, vol. 1, 439.
7. S. Waaben. Synchrotron magnet power circuit with a distributed capacitor bank. *Nuclear Instr. and Meth.* 9 (1960), 78.
8. N. Marks. A pulsed magnet power supply for fast cycling synchrotrons. *Part. Acc.*, 1972, vol. 3, p. 69.
9. О.А.Гусев, А.Н.Константинов, А.Г.Рошаль, Ф.М.Спевакова, А.М.Столлов, А.А.Тункин. Особенности построения системы пи-

- тания электромагнита быстрого бустера протонного синхротрона. Труды Второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.1, М., "Наука", 1975, 156.
10. О.А.Гусев, А.П.Лебедев, В.А.Титов, В.Д.Федоров. Особенности схемных решений систем питания быстрых протонных синхротронов. Труды 4 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., "Наука", 1975, 151.
11. В.В.Ивашин и др. Питание электромагнита ускорителя однополярными импульсами тока различной формы от емкостного накопителя энергии. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Москва 1968), т.1, 1970, М., 266.
12. W.F. Westendorp. The use of direct current in induction electron accelerators. *J. of applied physics*, vol. 16, No. 11, 1945, 657.
13. D. Huttar and J. Riedel. Flat topping the PPA synchrotron magnet. *IEEE trans. on NS*, NS-14, N3, 1967, 503.
14. Л.Д.Бутаков, В.А.Визирь, И.В.Димов, З.Н.Есина, П.П.Красноносеньких, Н.А.Лашук, З.Ш.Фасхутдинов, М.Т.Шивырталов. Усовершенствование синхротрона "Сириус" Томского политехнического института. Труды Четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, М., "Наука", 1975, 391.
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, Дубна, 1979, т.1, 206.
16. Г.А.Мартиросян. Формирование плоской вершины магнитного поля электронного синхротрона. Автореферат диссертации. НИИЭФА, Ленинград, 1979.
17. 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. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, том I, 1979, Серпухов, 345-349.
18. В.Л.Ауслендер, Р.М.Лапик, А.А.Тувик. Устройство питания магнита синхротрона. А.С. № 577876.

19. M.G. White, F.C. Shoemaker and G. R. O'Neill.  
A 3-Bev high intensity proton synchrotron. CERN  
Symposium on high energy accelerators and pion  
physics, Geneva, 1956, Proceedings vol. 1, 525-529.
20. R. Carruthers. The storage and transfer of energy.  
High Magnetic Fields. Proceedings of the International  
Conference on high magnetic fields, Massa-  
chusetts, 1961, 307-318.
21. E. Simon, G. Bronner. An inductive energy storage  
system using ignitron switching.  
IEEE tr. on NS, NS-14, N. 5, 1967, 33-40.
22. Р.М.Лапик. Генератор импульсных токов с индуктивным накопи-  
телем энергии. А.С. № 457167, Бюллетень изобретений № 2,  
1975.
23. О.А.Гусев и др. Некоторые возможности формирования плоской  
вершины во временной зависимости магнитного поля синхротро-  
на. Изв. АН Армянской ССР, Физика, 6, 402.
24. О.А.Гусев. Способ синхронизации работы синхротрона.  
А.С. № 293563, Бюллетень изобретений № 27, 1972.
25. D. Huttar. Further engineering details for  
flat-topping the PPA. PPA 597D. 1966.
26. О.А.Гусев и А.Г.Нечаев. Устройство для формирования импуль-  
сов тока в электромагнитах. А.С. № 210276, Бюллетень изоб-  
ретений № 6, 1968.
27. Н.П. Дарина, Л.И.Имшенко. Схема формирования импульсов тока  
с плоской вершиной в индуктивной нагрузке. ПТЭ, № 4, 1972,  
123-124.
28. W. R. Baker, W. L. Gagnon, F. Voelker.  
Flat-topping magnet current for the  
Berkeley electron-ring-accelerator expe-  
riment. IEEE tr. on NS, NS-16, N. 3, 1969, 1042.
29. Авт. заявка 3283906. Устройство питания электромагнита усь-  
корителя /Р.М.Лапик/, Положительное решение от 27.01.1982.
30. Авт. заявка 3286489. Устройство питания электромагнита син-  
хротрона /Р.М.Лапик /, положительное решение от 15.10.1981.

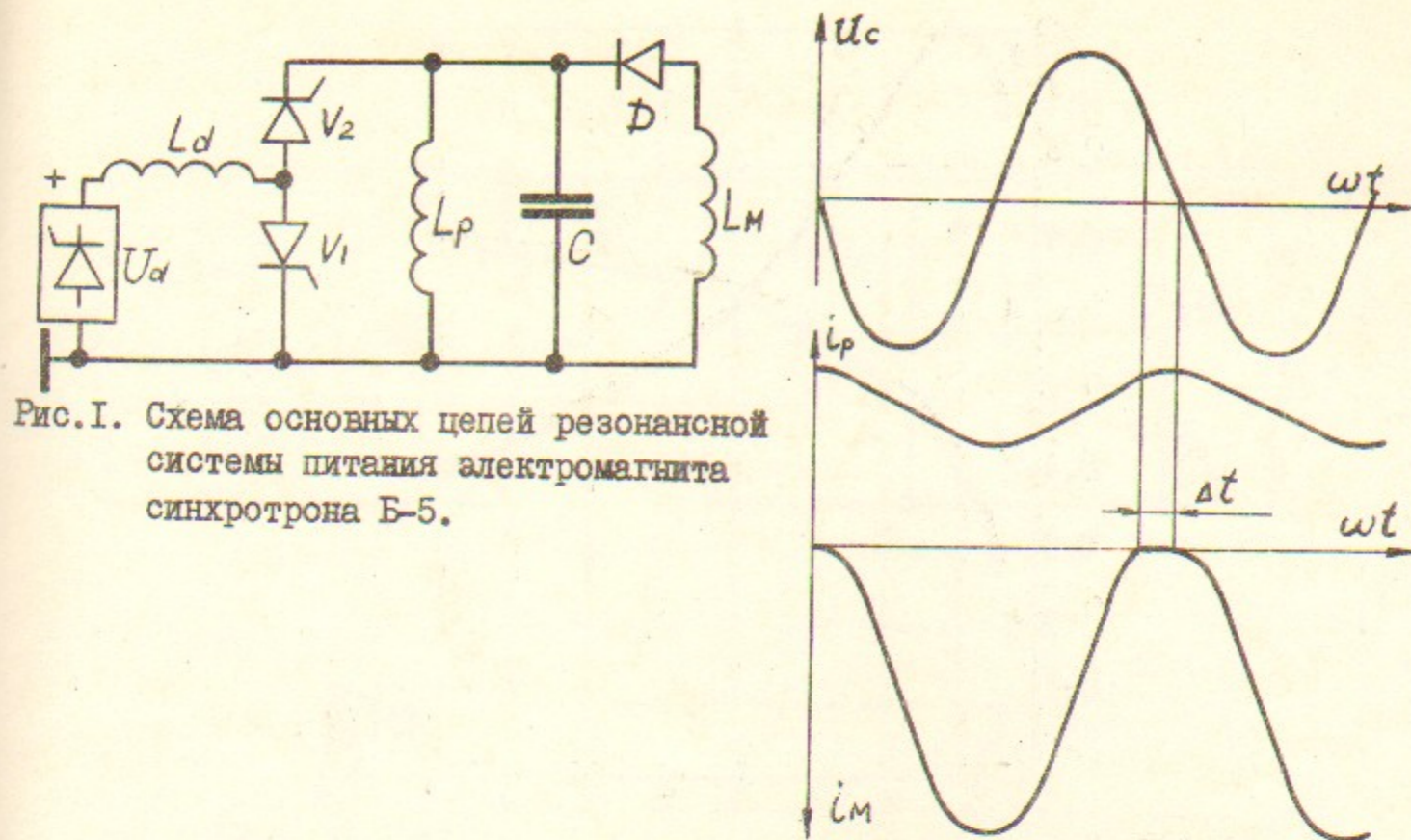


Рис.1. Схема основных цепей резонансной системы питания электромагнита синхротрона Б-5.

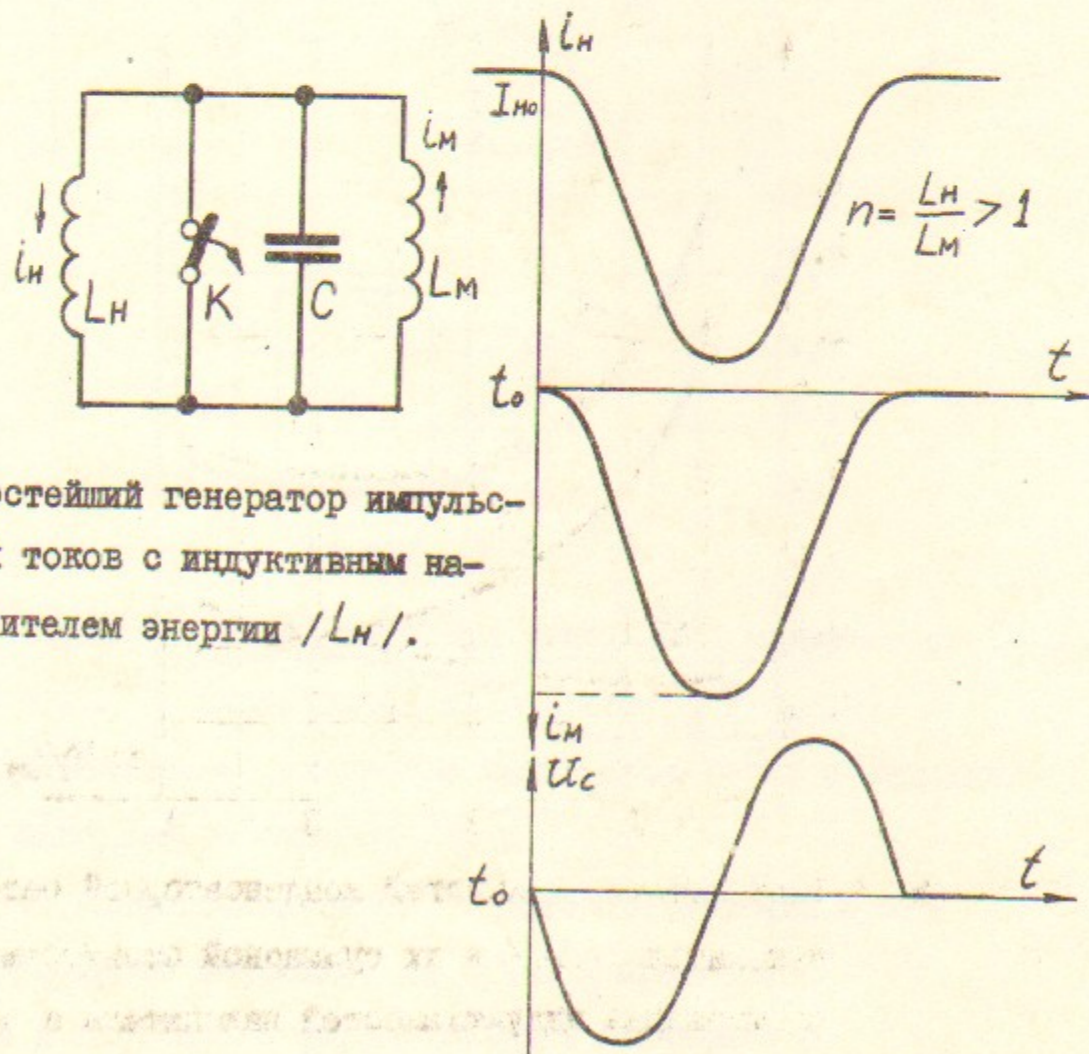


Рис.2. Простейший генератор импульсных токов с индуктивным накопителем энергии  $L_n$ .

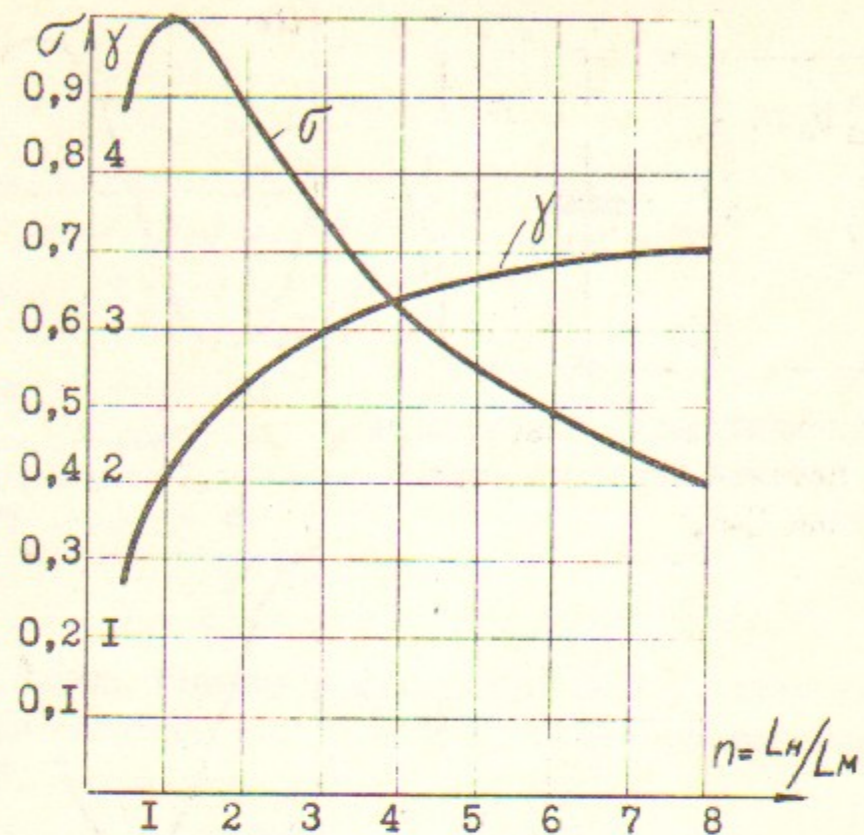


Рис.3. Зависимость коэффициента передачи энергии  $\sigma$  и коэффициента умножения по энергии  $\gamma$  от соотношения индуктивностей накопителя и нагрузки.

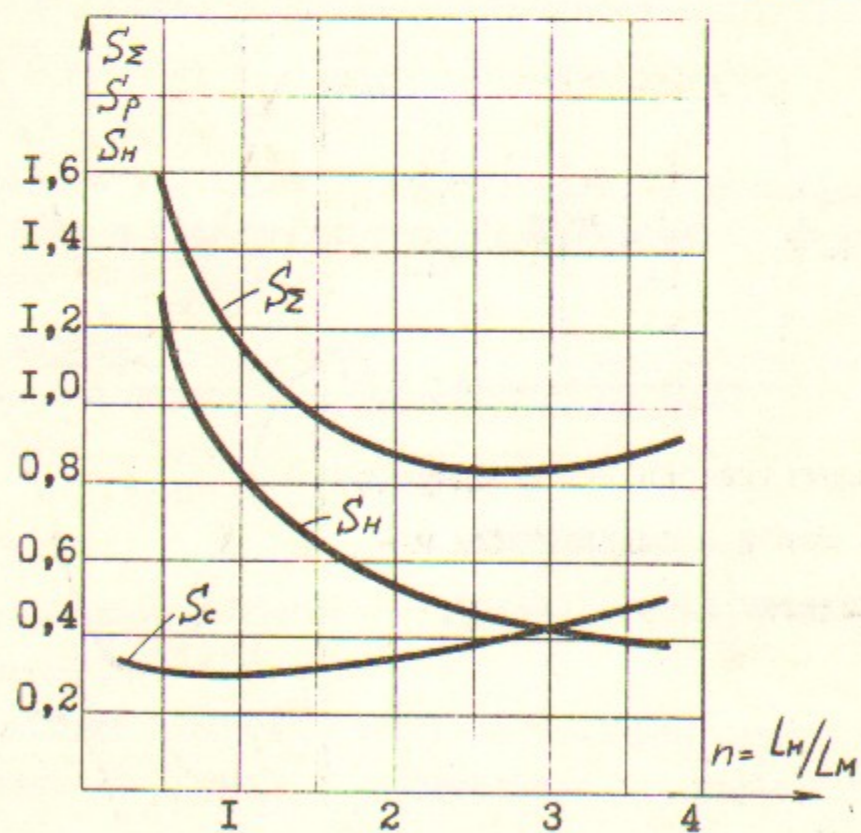


Рис.4 Зависимость стоимостей конденсаторной батареи  $S_c$ , накопителя  $S_n$  и их суммарной стоимости  $S_z$  от соотношения индуктивностей накопителя и нагрузки.

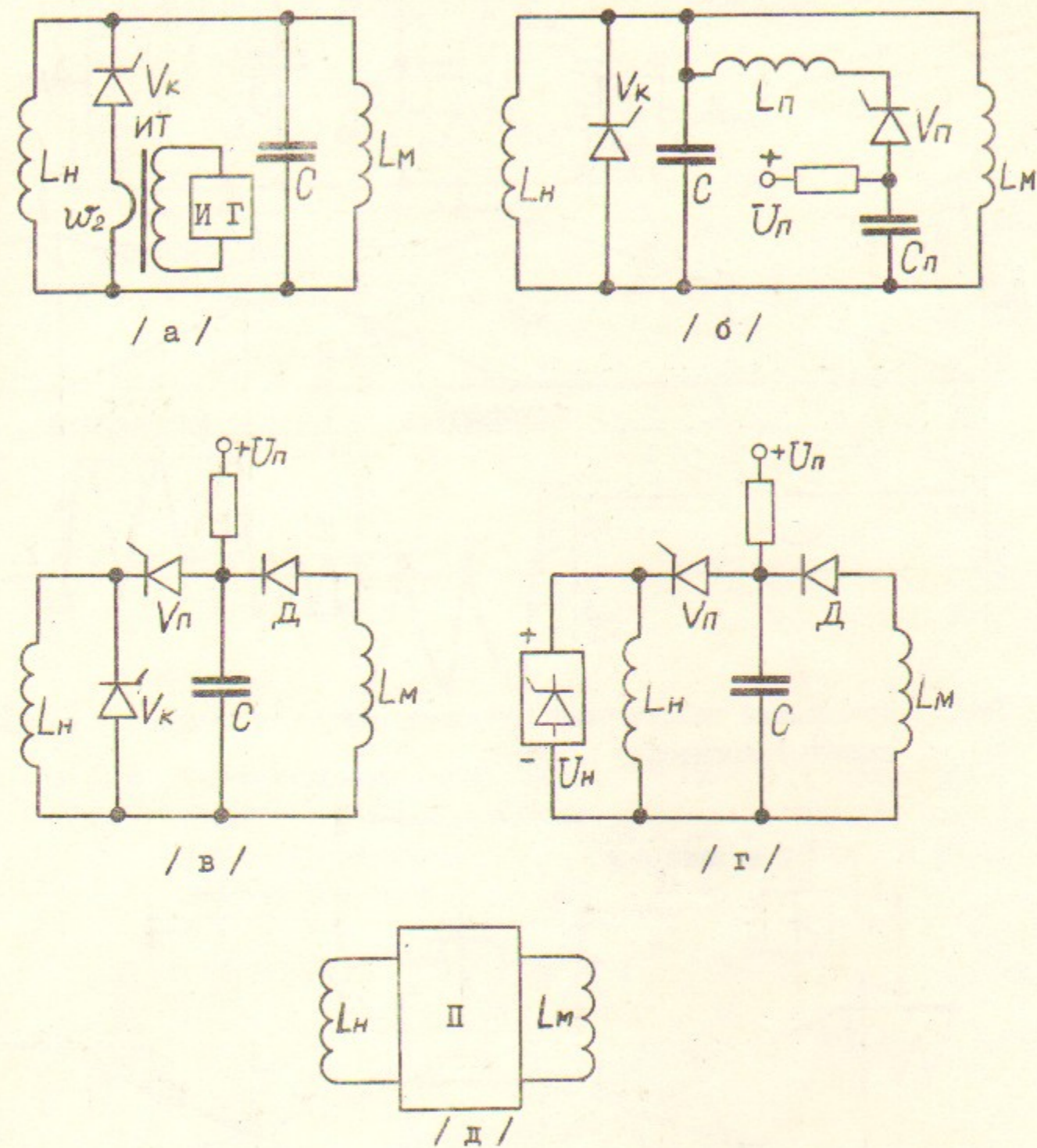


Рис.5. Некоторые возможные варианты выключения коммутатора  $V_k$ , шунтирующего индуктивный накопитель  $L_n$  / а, б, в, г /.  
Общий вид схемы генератора импульсных токов с индуктивным накопителем энергии / д /.

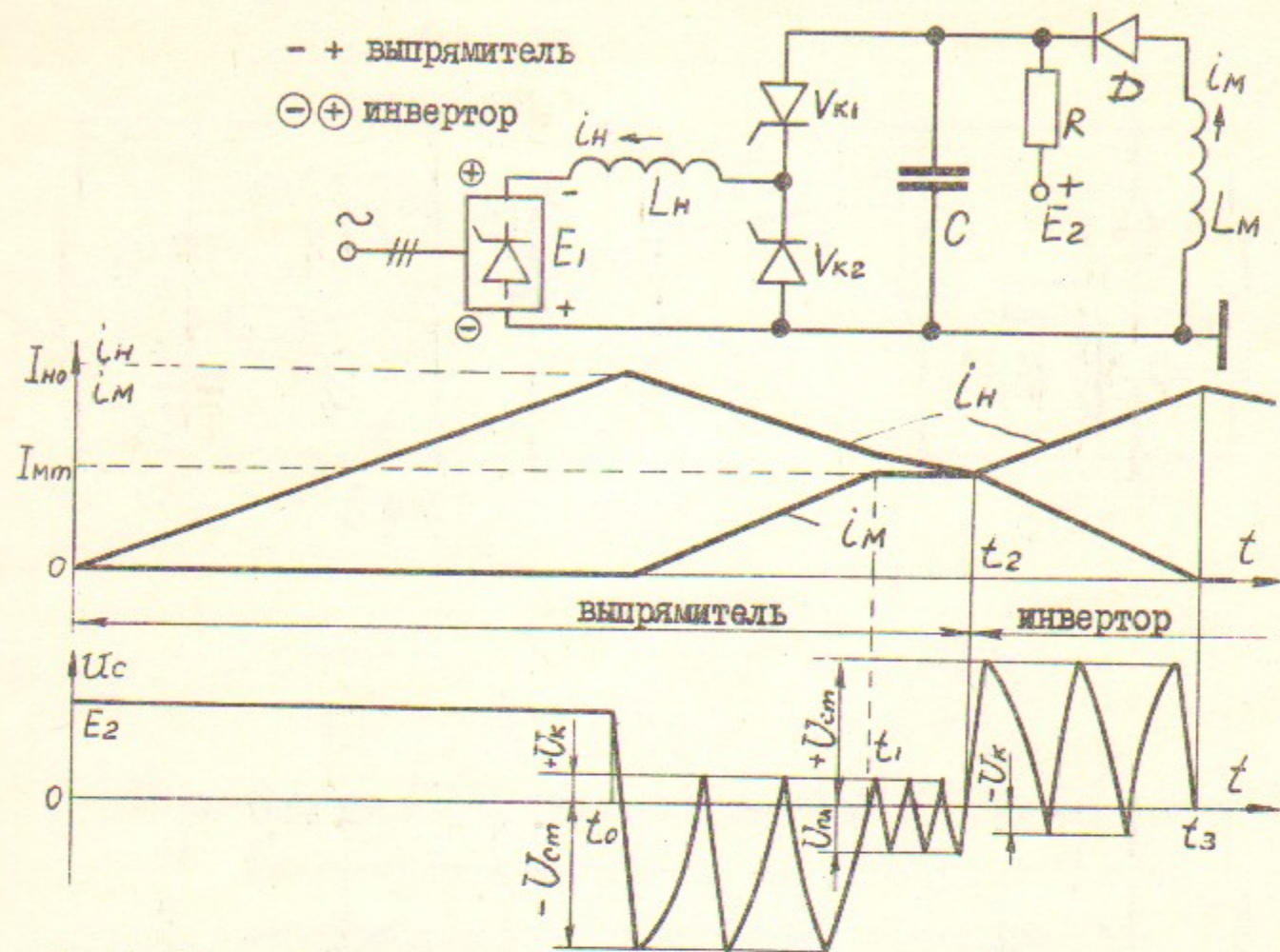


Рис. 6. Простейший циклический генератор импульсных токов с индуктивным накопителем энергии.

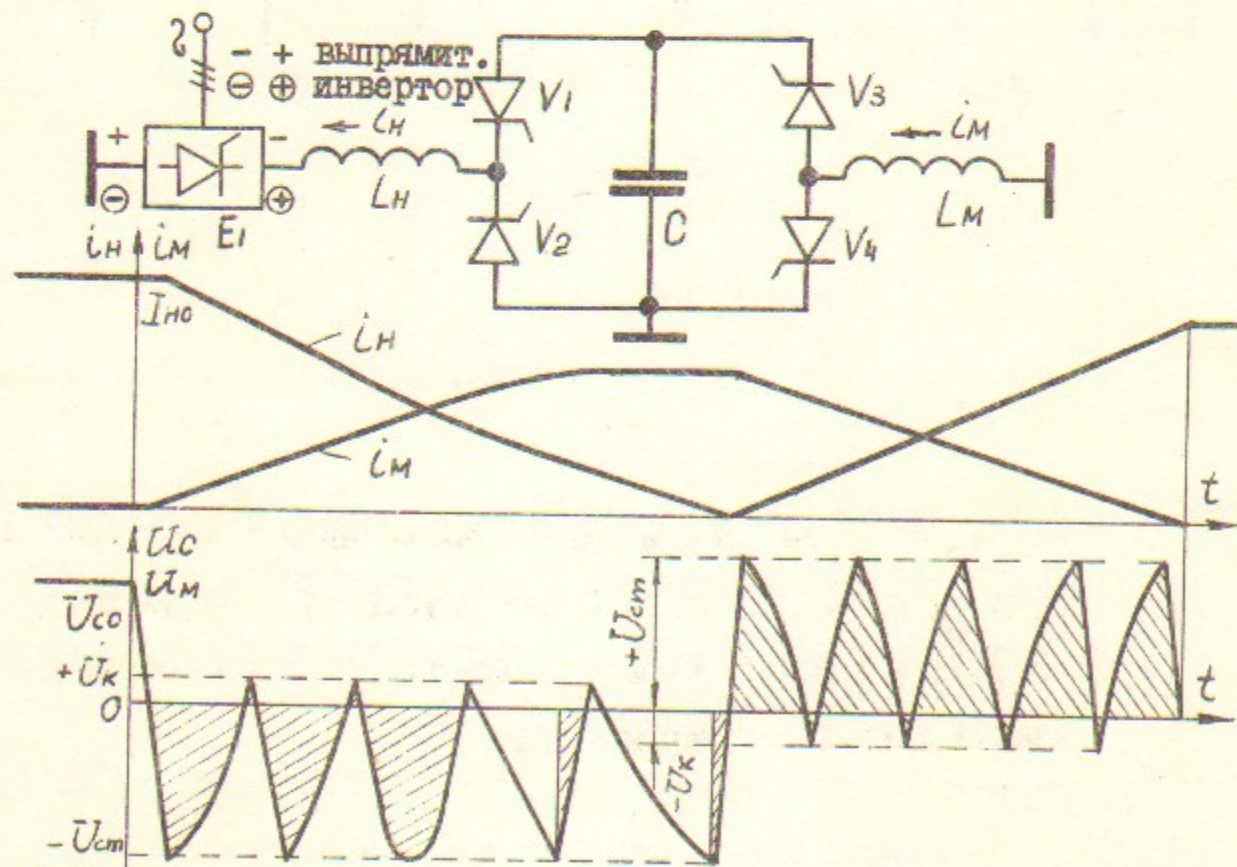


Рис. 7. Генератор импульсных токов с мостовым преобразователем.

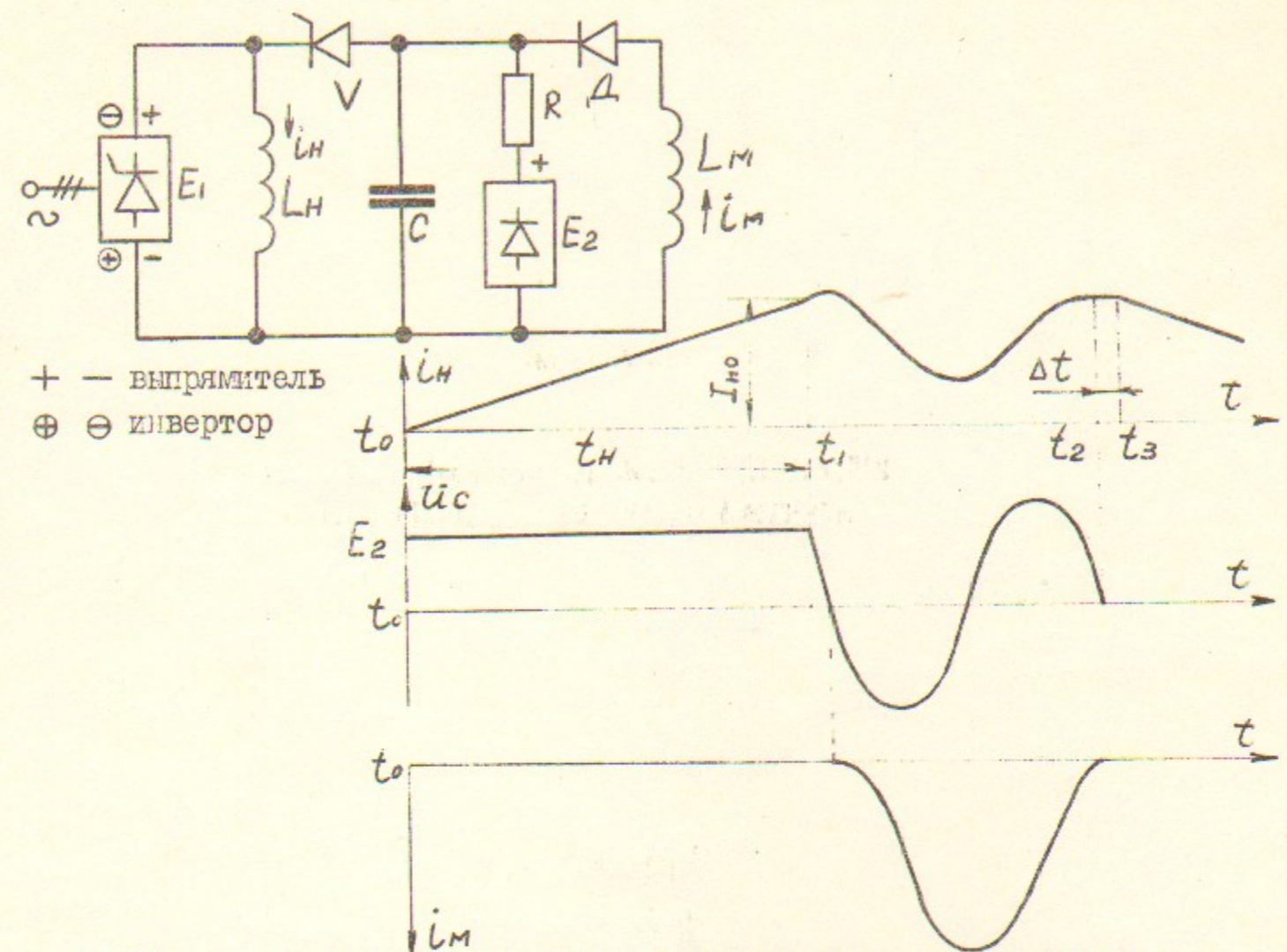


Рис. 8. Схема основных цепей импульсной системы питания магнита синхротрона Б-5, осциллограммы тока накопителя  $i_H$ , напряжения на конденсаторной батарее  $U_C$  и тока магнита нагрузки  $i_M$ .

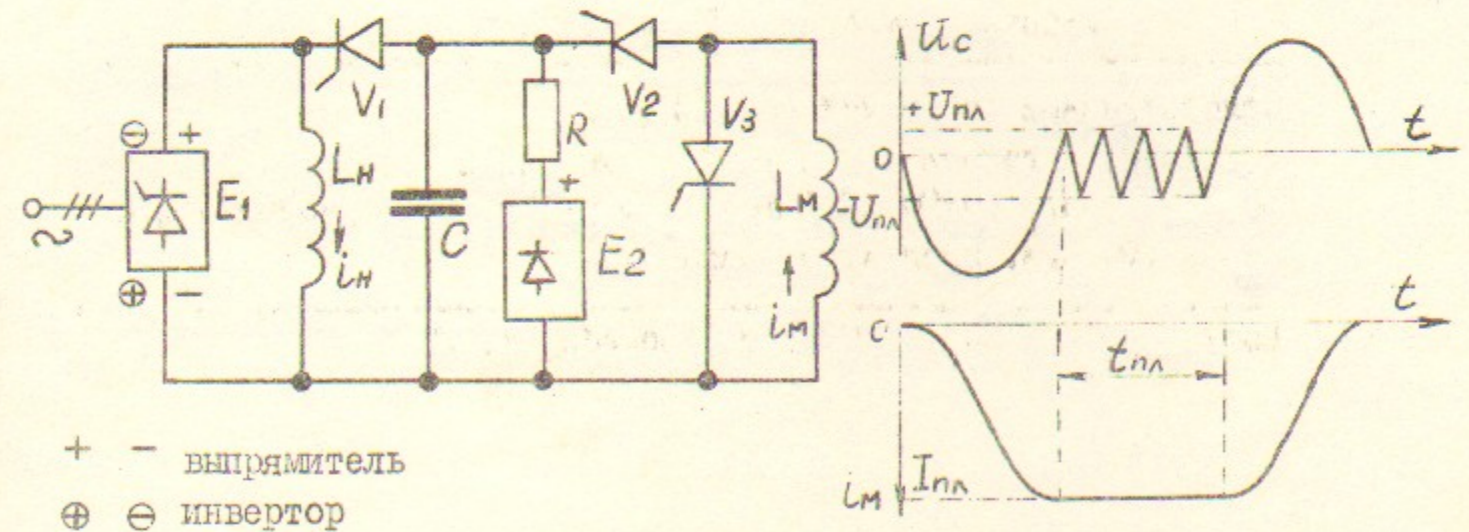


Рис. 9. Схема основных цепей импульсного устройства питания магнита с формированием "плато". Осциллограммы напряжения на конденсаторной батарее  $U_C$  и тока магнита нагрузки  $i_M$ .



Р.М.Лапик

ИМПУЛЬСНЫЙ ВАРИАНТ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТА СИНХРОТРОНА Б-5

Препринт

№ 82 - 60

Работа поступила - 5 мая 1982 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 12.5-1982 г. МН 03286

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл. 1,9 печ.л., 1,5 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ №60.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90