

44
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

В.Л.Ауслендер, С.В.Кузьмин, Р.М.Лапик,
В.П.Томилов, А.А.Тувик

**СИСТЕМА ПИТАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПРОТОННО-
ИОННОГО СИНХРОТРОНА Б-5**

ПРЕПРИНТ 80-134



Новосибирск

В.Л.Ауслендер, С.В.Кузьмин, Р.М.Лапик, В.П.Томилов,
А.А.Тувик

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПРОТОННО-
-ИОННОГО СИНХРОТРОНА Б-5

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается резонансная система питания с подмагничиванием магнита ускорителя постоянным током. Возбуждение колебательного контура осуществляется от однотактного инверторного преобразователя. Рассматриваются способы стабилизации магнитного поля на уровнях инжекции и выпуска заряженных частиц, а также способ синхронизации частоты работы системы с частотой питающей сети. Основные параметры системы питания: 1) частота циклов ускорения 50 имп/сек, 2) Максимальная энергоемкость магнита 50 кДж, 3) Максимальный ток магнита 12 кА, 4) Активные потери в элементах системы 400 кВт.

В в е д е н и е

В 1970 году в Институте ядерной физики СО АН СССР начата разработка комплекса аппаратуры протонно-ионного синхротрона Б-5, предназначенного для медико-биологических, радиационно-химических и других исследований [1]. Основные характеристики синхротрона приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Энергия ускоренных частиц (для протонов)	МэВ	200
Интенсивность выпущенных частиц	част/сек	10^{11}
Радиус равновесной орбиты	м	1,4
Энергия инжектируемых частиц	МэВ	1,5
Частота циклов ускорения	Гц	50
Магнитное поле инжекции	Тл	0,12
Магнитное поле выпуска	Тл	1,6
Число витков обмотки магнита	шт.	4
Максимальное значение тока обмотки	кА	12
Число поворотных магнитов	шт.	4
Максимальная энергия, запасенная в магнитах	кДж	50
Суммарные потери в элементах системы питания магнитов	кВт	400

Для реализации заданных выходных параметров ускорителя система питания электромагнита должна обеспечивать периодическое изменение тока с временной зависимостью близкой к выражению;

$$i_m = I_j + I_0(1 - \cos \omega t) \quad , \text{ где}$$

I_j - ток магнита, соответствующий инжекции;
 $I_0 = 5,5$ кА при энергии ускоренных протонов до 200 МэВ.

Указанная временная зависимость облегчает захват частиц в синхротронный режим и перестройку частоты ускоряющей системы в начале цикла ускорения. Необходимая частота

та повторения циклов ускорения определяется заданной средней интенсивностью ускоренных частиц. В свою очередь, временная зависимость магнитного поля и необходимая частота циклов ускорения определяют выбор варианта системы питания электромагнита ускорителя.

В качестве основы для проектирования системы питания была выбрана схема со смещенным резонансом. В процессе разработки системы питания был использован опыт построения действующих систем питания синхротронов, работающих в непрерывном режиме с частотой в десятки герц [2+10].

Сооружение системы питания потребовало целого ряда новых технических решений в вопросах возбуждения колебательного контура, стабилизации тока электромагнита и синхронизации частоты контура с частотой питающей сети.

В работе рассмотрены принципы построения резонансных систем питания, описана принципиальная схема системы питания, даны рекомендации по расчету и выбору наиболее важных элементов схемы, а также рассмотрены вопросы стабилизации магнитного поля и синхронизации частоты колебаний контура с частотой питающей сети.

1. Принципы построения резонансных систем питания электромагнитов синхротронов

Все существующие системы питания электромагнитов могут быть разделены на импульсные и резонансные. Как уже отмечалось, выбор частоты повторения циклов ускорения в первую очередь зависит от заданной средней интенсивности ускоренных частиц. Анализ существующих систем питания показывает, что при частоте повторения циклов ускорения близких к частоте питающей сети, разработчики отдадут предпочтение резонансным системам питания [2+10]. В то же время, при частоте повторения существенно меньшей частоты сети, используется импульсный вариант системы питания [11+13]. Указанное подразделение объясняется в первую очередь

энергетическими соображениями, т.к. при работе с большой скважностью импульсные системы энергетически более выгодны, но они теряют указанное преимущество при работе с малой скважностью, уступая место резонансным системам, в которых батареи конденсаторов, включенные параллельно или последовательно с обмоткой электромагнита, создают резонансный контур с большой реактивной мощностью, активные потери в этом контуре компенсируются от внешнего источника питания.

Все известные резонансные системы питания используют подмагничивание электромагнита ускорителя постоянным током, т.е. системы питания выполняются по так называемой схеме со смещенным резонансом, предложенной Вестендорпом для бетатронов [14].

Подмагничивание магнита дает два основных преимущества: уменьшение активных потерь в магните ускорителя и уменьшение требуемой реактивной мощности системы питания. Можно показать, что при амплитуде переменной составляющей тока электромагнита равной постоянному току подмагничивания, что приблизительно имеет место в системах питания, уменьшение активных потерь в электромагните выражает коэффициент

$$k = \frac{2 + \alpha}{4\alpha}$$

, где

$$\alpha = \frac{R_{\sim}}{R_0}$$

— коэффициент увеличения сопротивления обмотки на переменном токе.

Поскольку указанный коэффициент увеличения сопротивления обычно достаточно велик, то можно достичь значительного уменьшения активных потерь в электромагните при использовании подмагничивания. Что касается второго преимущества, то уменьшение реактивной мощности системы питания, приводит к уменьшению ее габаритов и стоимости. При равенстве амплитуды переменного тока постоянному, реактивная мощность в схеме с подмагничиванием в 4 раза меньше, чем в схеме без него.

Следует также отметить, что подмагничивание уменьша-

ет производную магнитного поля в начале цикла ускорения, что в свою очередь улучшает качественные характеристики магнитного поля на уровне слабых полей и снижает требования, предъявляемые к ускоряющей ВЧ-системе, а это обстоятельство особенно важно для протонно-ионных синхротронов.

Указанные преимущества схем со смещенным резонансом определяют их широкое применение в системах питания. Несмотря на разнообразие конкретных схем известных систем питания находит отражение главным образом в способах компенсации активных потерь в элементах колебательного контура, способах получения постоянной составляющей тока подмагничивания электромагнита и методах стабилизации магнитного поля.

В качестве источника питания переменного тока может использоваться генератор переменного тока, инверторный преобразователь или импульсная схема [2÷10]. Создание постоянной составляющей тока в обмотке электромагнита может осуществляться двумя способами: включением последовательно с обмоткой вентилей или питанием обмотки от источника постоянного тока. Постоянный и переменный токи могут протекать по одним и тем же обмоткам или иметь независимые отдельные обмотки. Вторая схема применяется реже. В обоих вариантах необходимо применять реакторы для разделения цепей постоянного и переменного тока.

Простейшие схемы систем питания электромагнитов синхротронов приведены на рис. 1 и 2. Кривые токов электромагнита соответствуют случаю равенства амплитуды переменной составляющей тока постоянному току подмагничивания. При подмагничивании электромагнита путем включения последовательно с обмоткой вентиля Д (рис. 2), в кривой тока электромагнита присутствует пауза (Δt), величина которой зависит от добротности колебательного контура.

Большинство известных систем питания выполнены с распределенными по кольцевой схеме элементами, включающими сектор поворотного магнита, конденсаторную батарею и разделительный реактор [8]. Эта схема находит применение в средних и больших ускорителях, когда требуется суммарное

напряжение на магните может составлять десятки и сотни киловольт. В этом случае распределенная кольцевая схема позволяет снизить напряжение относительно "земли" на каждом секторе электромагнита и позволяет обеспечить распределенное возбуждение системы питания через разделительные реакторы, которые выполняются двухобмоточными и играют в этом случае роль трансформатора. В отдельных случаях средних машин, при распределенной схеме может использоваться один многообмоточный реактор, что позволяет уменьшить габариты и стоимость устройства.

Схема со смещенным резонансом может быть также реализована при использовании только одного источника питания постоянного тока. В этом случае напряжение источника должно следовать синусоидальной волне тока электромагнита, что достигается фазовым управлением вентилей источника питания. Однако указанная схема применима только при резонансной частоте системы питания много меньшей частоты питающей сети.

Существует также ряд модификаций резонансных схем, имеющих целью сформировать специальную форму тока электромагнита, например, создание плоской вершины импульса [15,22].

П. Выбор варианта и работа системы

питания электромагнита ускорителя Б-5

Для обеспечения заданной средней интенсивности ускоренных частиц в ускорителе Б-5, частота следования циклов ускорения выбрана равной 50 Гц. Поскольку мгновенное напряжение на электромагните не превосходит 1300 В, то распределения секций электромагнита по кольцевой схеме не требуется и система питания выполнена сосредоточенной (рис. 3). Подмагничивание осуществлено путем включения вентиля Д последовательно с обмоткой электромагнита. Для размещения датчиков измерения поля последовательно с электромагнитом ускорителя включен измерительный магнит $L_{и}$. Постоян-

ная составляющая тока замыкается через разделительный реактор L_p . Конденсаторная батарея с разделительным реактором L_p и электромагнитом ускорителя L_m образует колебательный контур. Компенсация активных потерь в элементах схемы осуществляется от однотактного инверторного преобразователя. Однотактность работы инвертора достигается переводом инверторного реактора в режим индуктивного накопителя энергии в течении части цикла работы системы питания [16].

К основным преимуществам рассматриваемой системы питания следует отнести сравнительную простоту схемы, небольшие габариты, низкую стоимость инвертора и отсутствие электрической связи электромагнита ускорителя с питающей сетью в течении всего режима ускорения, что исключает нарушение процесса ускорения частиц из-за возможного влияния источника питания.

В установившемся режиме в колебательном контуре устанавливаются периодические незатухающие колебания. Компенсация активных потерь в элементах колебательного контура осуществляется однократно за период работы системы питания. Режим компенсации характеризуется включенным состоянием вентиля B_1 и выключенным B_2 , что соответствует положительной полуволне напряжения на конденсаторной батарее и спадающей части тока электромагнита (см. рис. 4). Режим ускорения, характеризующийся включенным состоянием B_2 и выключенным B_1 , соответствует отрицательной полуволне напряжения на конденсаторной батарее и возрастающей части тока электромагнита. Коммутация тока инвертора осуществляется за счет частичного разряда контурной конденсаторной батареи.

Рассмотрим указанные режимы в отдельности. В режиме ускорения вентиль B_1 выключен, поэтому схема системы питания подразделяется на две независимые схемы. Одна из этих схем представляет источник постоянного тока U_d , присоединенный к инверторному реактору L_d через вентиль B_2 , т.е. инверторный реактор в этом случае играет роль индуктивного накопителя. Вторая схема включает в себя колебательный контур, в котором устанавливаются свободные

колебания, при этом контур не имеет электрической связи с остальными элементами системы питания. Анализ этих схем (без учета активных потерь) показывает, что зависимости тока электромагнита i_m , напряжения на контуре U_c и тока инверторного реактора i_d имеют вид:

$$i_m = I_{p0} \frac{L_3}{L_m} (1 - \cos \omega_y t) \quad 1-a$$

$$U_c = -I_{p0} \sqrt{\frac{L_3}{C}} \sin \omega_y t \quad 1-b$$

$$i_d = \frac{U_d}{L_d} t + I_{dy0} \quad 1-b$$

где

$$L_3 = \frac{L_p(L_u + L_m)}{L_p + L_u + L_m} \quad ; \quad \omega_y = \frac{1}{\sqrt{L_3 C}}$$

I_{p0} - начальное значение тока реактора L_p в момент перехода схемы в режим ускорения.

I_{dy0} - начальное значение тока инверторного реактора.

Длительность режима ускорения T_y равна приблизительно половине периода работы системы питания.

В режиме компенсации инверторный реактор присоединен к контуру через управляемый вентиль B_1 . В течении режима компенсации в контур вводится энергия, необходимая для поддержания незатухающих колебаний. Можно показать, что в режиме компенсации величина средней мощности развиваемой инвертором определяется выражением:

$$P_{cp} = (U_k - U_d) \left(I_{dk0} - \frac{U_k - U_d}{2 L_d} T_k \right) + U_d I_{dk} \quad , \quad \text{где}$$

U_k - среднее значение напряжения на контуре за время компенсации

T_k - длительность режима компенсации

I_{dko} — начальное значение тока инверторного реактора
 I_{dk} — среднее значение тока инверторного реактора в режиме компенсации.

Длительность режима компенсации T_k равна приблизительно половине периода работы системы питания.

Необходимый для нормальной работы инвертора угол опережения включения управляемых вентилях инверторного преобразователя ψ задается системой управления инвертора. Величина угла ψ зависит от величины коммутируемого тока, напряжения на конденсаторной батарее ^(при) коммутации, индуктивности цепи коммутации и частотных характеристик используемых вентилях. В приближении первой гармоники угол опережения ψ определяет разность фаз тока инвертора и напряжения на контуре, т.е. коэффициент мощности установки есть $\cos\psi$, поэтому необходимо стремиться к уменьшению этого угла. Минимальное значение угла ψ определяется устойчивой работой инвертора при пуске и переходных режимах. Блок-схема системы управления приведена на рис. 5. В установившемся режиме величина угла опережения задается фазосдвигающим устройством, на вход которого подается напряжение с конденсаторной батареи. Импульсы запуска вентилях вырабатываются нуль-органами 2 и 3. Плавная регулировка угла осуществляется с помощью схем регулируемой задержки 4 и 5. Как показал эксперимент, инвертор работает устойчиво при углах опережения $\psi \geq 10^\circ$.

Так как коммутация тока инвертора осуществляется за счет частичного разряда емкости контура, то ввиду того, что в обесточенном контуре емкость не заряжена, коммутация тока инвертора невозможна. Чтобы обеспечить запуск инвертора на обесточенный резонансный контур, необходимо предварительное начальное возбуждение контура, обеспечивающее устойчивую коммутацию тока инвертора. Существуют различные способы пуска инверторов, нагруженных на резонансный контур [17]. Анализ известных методов, с учетом особенностей системы питания Б-5, показал, что наиболее простым способом пуска является возбуждение контура от самостоятельного источника питания небольшой мощности. В качестве такого источника ис-

пользуется одноконтурный импульсный преобразователь, схема которого приведена на рис. 6. Пусковой преобразователь содержит выпрямитель 1, зарядный реактор 2, емкостной накопитель 3, шунтирующий диод 4, коммутирующий вентиль 5 и разрядный реактор 6. Емкостной накопитель 3 заряжается от выпрямителя 1 через реактор 2. При включении коммутирующего вентиля 5 емкостной накопитель разряжается на колебательный контур через разрядный реактор. Частота следования разрядных импульсов соответствует частоте колебательного контура. За время импульса в колебательный контур вводится энергия, компенсирующая активные потери в элементах колебательной системы. Т.о. пусковой преобразователь обеспечивает начальное возбуждение колебательного контура системы питания, что значительно упрощает пуск основного преобразователя. Кроме того, режим работы системы питания от пускового преобразователя представляет большое удобство для наладки всех устройств системы питания в том числе и основного преобразователя.

При заданных значениях индуктивности электромагнита и частоты следования циклов ускорения, расчет схемы системы питания сводится к определению величины емкости контурной конденсаторной батареи, напряжения источника питания и индуктивностей L_p и L_d (см. рис. 3). Величина реактивной мощности и добротности контура определяют активные потери в элементах системы питания.

Выбор параметров схемы связан, в основном, с соображениями экономического характера. Так выбор коэффициента самоиндукции разделительного реактора L_p и величины емкости C зависит только от соотношения цен на реакторы и конденсаторы. Увеличение индуктивности разделительного реактора L_p приводит к уменьшению требуемой реактивной мощности конденсаторной батареи. Существует оптимальное соотношение емкости C и коэффициента самоиндукции L_p , при котором суммарная стоимость реактора и конденсаторной батареи оказывается минимальной. Реактивная мощность конденсаторной батареи $Q_c = U_c^2 \omega C$, где U_c — действующее значение напряжения на конденсаторной батарее. Типовая мощность реактора определяется следующим выражением:

$$P_{т.р} = \frac{\omega L_p \sqrt{I_{\sim m}^2 + \frac{T_2^2}{2n^2}}}{1,5\sqrt{2}} (n+1) \quad , \text{ где}$$

$n = \frac{L_p}{L_n + L_m}$ — отношение индуктивности реактора к суммарной индуктивности измерительного магнита и электромагнита ускорителя.

$I_{\sim m}$ — амплитуда переменной составляющей тока электромагнита.

Величина необходимой емкости конденсаторной батареи находится из выражения:

$$C = \frac{T_2}{4\pi^2 L_{эк}} \quad , \text{ где}$$

$$L_{эк} = \frac{(L_n + L_m)L_p}{L_n + L_m + L_p}$$

Величина напряжения источника питания U_d находится из условия равенства нулю среднего за период напряжения на инверторном реакторе, т.е. пренебрегая активными потерями:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^{T_k} u_{ск}(t) dt \quad , \text{ где}$$

$u_{ск}$ — напряжение на контуре в режиме компенсации активных потерь.

Относительно выбора коэффициента самоиндукции инверторного реактора L_d следует отметить, что в зависимости от его величины и соотношения длительностей включенного состояния вентиля B_1 и B_2 инвертор может работать в режиме прерывистого тока реактора и в режиме непрерывного тока. В режиме прерывистого тока вентиль B_1 выключается раньше, чем включается вентиль B_2 (см. рис. 7). В этом случае систему питания можно рассматривать как выполненную по одноконтурной импульсно-резонансной схеме с индуктивным накопителем энергии, по аналогии с импульсно-резонансными схемами с емкостным накопителем энергии [3,6]. Действительно, как следует из рис. 7, инверторный реактор можно рассматривать как индуктивный накопитель энергии, который

заряжается в течении времени накопления t_n и разряжается на контур в течении времени t_p . Если напряжение U_d существенно ниже среднего напряжения на контуре, то t_p , в течении которого происходит компенсация активных потерь в контуре, может быть много меньше периода колебаний, т.е. имеет место явно выраженный импульсный режим работы, который более удобно анализировать методами, принятыми в импульсной технике.

При увеличении L_d , длительности t_n и t_p выравниваются и система питания переходит в режим непрерывного тока реактора L_d . Этот режим удобно анализировать методами преобразовательной техники, т.к. в этом случае источник U_d , реактор L_d и вентили B_1 и B_2 образуют одноконтурный параллельный инвертор. Минимальное значение L_d ограничивается допустимыми пульсациями тока i_d . Стремление выравнять во времени потребляемую мощность от источника питания, приводит к увеличению коэффициента самоиндукции L_d , а следовательно к увеличению его габаритов и стоимости.

На основании вышеизложенного был произведен расчет параметров системы питания со следующими исходными данными:

Частота следования циклов ускорения	= 50 Гц
Индуктивность электромагнита ускорителя	= 680 мкГн
Индуктивность измерительного магнита	= 40 мкГн
Амплитуда переменной составляющей тока электромагнита	= 6,0 кА

Основные параметры системы питания приведены в таблице 2.

Таблица 2.

1. Напряжение источника постоянного тока	= 400В
2. Напряжение на контуре	= 900В
3. Индуктивность инверторного реактора	= 5,0 мГн
4. Индуктивность разделительного реактора	= 1,5 мГн
5. Реактивная мощность конденсаторной батареи	= 6,0 МВар

III. Стабилизация магнитного поля ускорителя на уровнях инжекции и выпуска заряженных частиц

Для поддержания постоянства энергии ускоренных частиц и их интенсивности требуется стабилизировать магнитное поле в моменты инжекции и выпуска с точностью не хуже $\pm 0,1\%$. В системах питания, использующих схемы со смещенным резонансом, требуемая точность поддержания магнитного поля может быть достигнута стабилизацией постоянной и переменной составляющей тока электромагнита в отдельности. Так как мощность источников питания синхротронов может составлять несколько МВт и более, то обеспечение требуемой точности представляет значительные трудности, особенно в случае использования электрических машин в качестве источника питания. Необходимая точность может быть также достигнута при отказе от стабилизации источников питания в отдельности, но при стабилизации некоторых параметров кривой тока электромагнита. Этим параметром, например, может являться величина амплитуды обратного тока электромагнита, если величина постоянной составляющей тока электромагнита несколько меньше амплитуды переменной составляющей [18]. В этом случае требуемая точность поддержания тока электромагнита достигается стабилизацией амплитуды обратного тока путем воздействия на источник подмагничивания. Стабилизация магнитного поля может также осуществляться путем стабилизации постоянной составляющей тока электромагнита и интервала времени присутствия обратного магнитного поля [19].

Анализ известных способов стабилизации магнитного поля, с учетом особенностей системы питания синхротрона Б-5, показал, что наиболее простым способом стабилизации является формирование "плато" в кривой тока электромагнита на заданных уровнях инжекции и выпуска ускоренных частиц с предварительной стабилизацией источника питания инверторного преобразователя. Указанная предварительная стабилизация осуществляется методом стабилизации выходного напряжения индукционного регулятора ИР путем воздействия системы авто-

матического регулирования на двигатель поворота ротора ИР с последующей стабилизацией выходного напряжения выпрямителя U_d , который выполнен на управляемых вентилях (см. рис. 3). Указанная система стабилизации обеспечивает поддержание выходного напряжения источника питания U_{dc} точностью $\pm 0,5\%$ при изменении напряжения питающей сети $\pm 10\%$.

Как уже отмечалось, дальнейшее повышение точности поддержания уровней магнитного поля инжекции и выпуска достигается формированием в кривой тока магнита "плато" инжекции и выпуска. Известны различные способы формирования "плато" [20+23]. Анализ известных способов, с учетом особенностей системы питания, показал, что наиболее простой схемой формирования "плато" инжекции является схема, представленная на рис. 8. На спадающей части тока электромагнита, при достижении магнитным полем заданного уровня инжекции, сигнал пермаллового датчика ПД через формирователь Φ_j запускает управляемый клапан V_3 , при этом диод Д запирается положительным напряжением на контурной конденсаторной батарее С, а ток магнита замыкается через клапан В и предварительно заряженную емкость C_ϕ , причем $C_\phi \gg C$. Закон изменения тока электромагнита на "плато" инжекции определяется выражением:

$$I_{mj} = \left\{ I_{j0} \cos \omega_j t - \left(\omega C U_{c10} + I_{j0} + \frac{\beta^2 C U_{c10}}{\omega} \right) \times \right. \\ \left. \times \sin \omega_j t \right\} e^{-\beta t}, \text{ где (4-1)}$$

$$\beta = \frac{R_n + R_m}{2(L_n + L_m)}, \quad \omega_j = \frac{1}{\sqrt{(L_n + L_m) \cdot C_1}}$$

I_{j0} - начальное значение тока электромагнита
 U_{c10} - начальное значение напряжения емкости C_ϕ .

Формирование "плато" инжекции заканчивается в момент появления на контурной конденсаторной батарее напряжения превышающего напряжение на емкости C_ϕ , при этом клапан В выключается, а ток магнита замыкается через контурную конденсаторную батарею. С этого момента времени начинает

формироваться возрастающее магнитное поле, соответствующее режиму ускорения. Длительность "плато" инъекции Δt_j определяется его уровнем и добротностью колебательного контура, в нашем случае типичное значение $\Delta t_j = 2$ мсек.

Как видно из работы схемы, точность формирования уровня "плато" зависит от точности индикации момента времени, при котором спадающее поле достигает заданного уровня инъекции. Указанный момент времени фиксируется с помощью пермаллового датчика ПД. Точность формирования уровня "плато" зависит также от частотных характеристик используемых клапанов V_3 . Точность поддержания магнитного поля на заданном уровне в течении Δt_j зависит от величины емкости C_ϕ и начального напряжения U_{c10} на ней. Анализ выражения (4-1) показывает, что при $\tau = (L_n + L_m) / (R_n + R_m) \gg \Delta t_j$, что обычно имеет место, требования предъявляемые к величине емкости C_ϕ и точности начального напряжения на ней невелики. В отдельных случаях, при высокой добротности контура, требуемая точность поддержания магнитного поля на "плато" может быть достигнута без компенсации активных потерь в течении Δt_j , т.е. наличия емкости C_ϕ не требуется.

Известен ряд способов формирования "плато" на вершине импульса тока электромагнита [20÷23]. Указанное "плато" обычно необходимо по условиям физического эксперимента, например, для медленного вывода ускоренных частиц. В отличие от известных устройств, формирование "плато" выпуска в синхротроне Б-5 связано исключительно со стабилизацией амплитуды тока электромагнита. Указанная стабилизация осуществляется путем формирования "плато" на вершине кривой тока электромагнита при достижении магнитным полем заданного уровня. Схема формирования "плато" выпуска показана на рис. 9. Измерительное устройство, включающее индуктивный датчик ИД и формирователь Φ_B , формирует импульс при достижении магнитным полем заданного уровня. Указанный импульс включает управляемый клапан V_4 и предварительно заряженная емкость C_6 подключается параллельно электромагниту ускорителя. При условии равенства напряжения на емкости C_6 падению напряжения на активном сопротивлении обмотки электромагнита,

в кривой тока электромагнита формируется "плато" с нулевой производной магнитного поля. Длительность "плато" Δt_6 зависит от фазы включения клапана V_4 относительно напряжения на конденсаторной батарее и в рабочем режиме изменяется от 0 до 1,5 мсек.

Во время "плато" через емкость C_6 проходит импульс тока, который заряжает ее. В паузах между указанными импульсами тока избыточный заряд емкости C_6 сбрасывается через резистор R и тиристор V_5 , снабженный схемой искусственной коммутации.

Величина отклонения тока электромагнита от заданного уровня за время "плато" определяется величиной емкости C_6 и начальным напряжением на ней. Можно показать, что для обеспечения заданной точности поддержания тока электромагнита на выбранном уровне, требования, предъявляемые к величине C_6 и точности начального напряжения на ней, невелики. Как и в рассмотренном случае формирования "плато" инъекции, емкость C_6 можно исключить при значительной добротности контура.

Преимуществами используемой схемы формирования "плато" выпуска являются: отсутствие дополнительных источников питания и низкая токовая загрузка клапана V_4 , т.к. ток указанного клапана во много раз меньше тока электромагнита. Следует однако отметить, что применение рассмотренного способа формирования "плато" ограничивается небольшой длительностью "плато" в сравнении с периодом колебаний контура.

1У. Синхронизация частоты работы системы питания с частотой питающей сети

Опыт эксплуатации ускорителей с резонансными системами питания электромагнитов показывает, что во время работы ускорителя интенсивность выпущенных частиц изменяется с частотой соответствующей разнице между частотами сети и системы питания ускорителя [24]. Исследование указанного явления представляет большие сложности, поскольку практически все системы ускорителя могут быть ответственными за это в той

или иной степени. Указанная нестабильность интенсивности выпущенных частиц в первую очередь, по-видимому, является следствием нестабильности выходных параметров различных систем ускорителя от инжектора до системы выпуска ускоренных частиц. Поскольку выходные параметры этих систем могут зависеть от фазы питающей сети, то становится понятным, что устранение указанного явления представляет большие трудности. Более простым выходом является осуществление синхронизации частоты работы резонансной системы питания с частотой питающей сети, в результате чего исчезают биения интенсивности выпущенных частиц.

Известны различные способы синхронизации частоты работы систем питания быстрых синхротронов с частотой питающей сети. Одним из этих способов является изменение длительности паузы в напряжении на электромагните ускорителя [25]. Пауза напряжения обеспечивается шунтированием контурной конденсаторной батареи управляемым клапаном со схемой искусственной коммутации. Недостатками указанного способа является необходимость наличия управляемого клапана на полное напряжение и максимальный ток разделительного реактора, а также неизбежность выхода из строя этого клапана при ложном срабатывании и наличии высокого напряжения на конденсаторной батарее.

Синхронизация работы системы питания может осуществляться путем подстройки частоты колебательного контура методом регулирования эквивалентной индуктивности или емкости контура. Наиболее простым является регулирование эквивалентной индуктивности контура путем подключения к контуру дополнительной индуктивности [26]. Указанное подключение может осуществляться как при помощи тиристорного ключа, так и при помощи магнитного усилителя. В первом случае частота контура регулируется моментом открывания тиристорного ключа относительно напряжения на контуре, во втором — током подмагничивания магнитного усилителя.

В рассматриваемой системе питания используется метод синхронизации частоты ^{путем} изменения индуктивности разделительного реактора в течение части цикла работы системы, что яв-

ляется разновидностью рассмотренного выше способа.

Принципиальная схема, соответствующая указанному методу, приведена на рис.10. Управляемый клапан V_6 шунтирует часть витков обмотки разделительного реактора L_p . При включении клапана V_6 индуктивность реактора уменьшается до индуктивности рассеяния между свободной и шунтируемой секциями реактора, что приводит к уменьшению эквивалентной за период индуктивности контура. Как и в рассмотренном выше случае, регулирование частоты контура осуществляется управлением моментом включения V_6 относительно напряжения на конденсаторной батарее C . Преимуществами рассмотренного способа являются отсутствие дополнительной индуктивности и возможность использования тиристорного ключа на более низкое напряжение, чем напряжение на контуре.

Следует отметить, что при незначительном рассогласовании собственной частоты колебательного контура и частоты сети, а также небольшой добротности, в контуре можно возбудить вынужденные колебания с частотой питающей сети. В нашем случае синхронизацию указанным способом можно осуществить путем синхронизации с сетью момента включения клапана V_1 инверторного преобразователя. Однако, как показывает анализ, в этом случае возникает дополнительная нестабильность напряжения на контуре, зависящая от разности собственной частоты контура и сети. Для устранения указанной нестабильности, вызванной синхронизацией частоты, потребуется наличие системы авторегулирования с воздействием на выходное напряжение источника питания инверторного преобразователя. Ввиду известных технических трудностей, возникающих при использовании этого способа синхронизации частоты, в нашем случае используется описанный выше способ синхронизации частоты путем изменения эквивалентной индуктивности колебательного контура.

Полная электрическая схема основных цепей системы питания электромагнита протонно-ионного синхротрона Б-5 приведена на рис.11. Обозначения элементов схемы соответствуют предварительно принятым обозначениям при рассмотрении схем отдельных устройств системы питания.

Л и т е р а т у р а

1. 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 высоких энергий. Серпухов, 1977.
2. О.А.Гусев, А.П.Лебедев, В.А.Титов, В.Д.Федоров. Особенности схемных решений систем питания быстрых протонных синхротронов. Труды 1У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1974.
3. Р.С.Бобовиков, Б.В.Плетенев, Ф.М.Спевакова, А.М.Столлов. Особенности импульсного возбуждения резонансных систем питания электромагнитов синхротронов высоких энергий. "Электрофизическая аппаратура", вып.1, 1963.
4. Р.С.Бобовиков, Б.В.Плетенев, Ф.М.Спевакова, А.М.Столлов. Принципы построения резонансных систем питания электромагнитов синхротронов. "Электрофизическая аппаратура", вып.2., 1964.
5. В.П.Борисов, М.А.Гашев, О.А.Гусев, А.И.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, Москва, 1968.
6. M.S.Livingston, The cambridge electron accelerator, CERN Symposium on high energy accelerators and pion physics, Geneva, 1956, Proceedings, vol. 1.
7. R.R.Wilson, Cornell electron synchrotron, Laboratory of Nuclear Studies, Cornell University Ithaca, New York, 1967, CS-39.
8. Waaben, Synchrotron magnet power circuit with a distributed capacitor bank, Nuclear Instruments and Methods 9 (1960), 78.
9. I.A.Fox, Resonant magnet network and power supply the 4 GeV electron synchrotron NINA., Proceedings the institution of electrical engineers, vol. 112, No. 6, June 1965.
10. E.L.Hubbard (editor), Booster synchrotron, NAL, TM-405, January 1973.
11. В.В.Ивашин, Л.Н.Миненко, И.П.Чучалин, Питание электромагнита ускорителя однополярными импульсами тока различной формы от емкостного накопителя энергии. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1968.
12. N.Marks, A pulsed magnet power supply for fast cycling synchrotrons, Particle Accelerators, 1972, vol. 3.
13. О.А.Гусев и др. Особенности построения системы питания быстрого бустера протонного синхротрона. Труды 2-го всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1970, Том 1.
14. W.F.Westendorp, The use of direct current in induction electron accelerators, Journal of Applied Physics, vol. 16, 1945.
15. D.E.Huttar, P.R.Cheeseman, A rapid cycling flat-topped synchrotron magnet system IEE (tr. on NS) vol. 18, No 3, 1971.
16. В.Л.Ауслендер, Р.М.Лапик, А.А.Тувик, АС № 577876.
17. О.А.Гусев, А.Г.Нечаев, В.Г.Цветков. Запуск параллельного ионного инвертора на резонансный контур. "Электрофизическая аппаратура", вып.3, 1965.

18. G. Ghigo and I. F. Quercia, Reverse field stabilization in a d.c.-a.c. excited magnet of an electron-synchrotron. Cern symposium on high energy accelerators and pion physics, Geneva, 1956.
19. К.М. Козлов и др. Система стабилизации магнитного поля Ереванского синхротрона. Труды Совещания по ускорителям заряженных частиц, Т.1 Москва, 1968.
20. D. Huttar and J. Riedel Flat-topping the the PPA synchrotron magnet, IEEE tr. on NS, NS-14, No 3, 1967.
22. D. Huttar. Further engineering details for flat-topping the PPA, PPAD 597 D, 1966.
23. О.А. Гусев и др., Формирование импульсов с плоской вершиной в электромагнитах. "Электричество", № 1, 1971
24. С.К. Есин и др. Исследование периодических нестабильностей интенсивности ускоренного пучка на Ереванском электронном синхротроне и их устранение. Труды второго всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Том II, 1972.
25. О.А. Гусев. А.С. № 293563.
26. Б.А. Вартанян и др. Реконструкция системы питания электромагнита Ереванского синхротрона. Труды У всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. II, стр. 234.

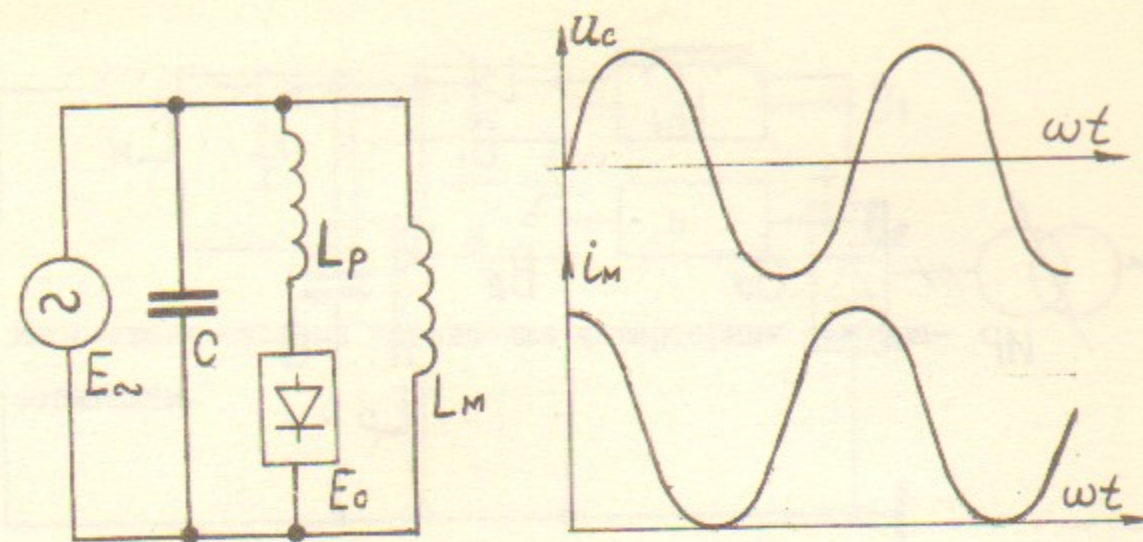


Рис.1. Простейшая резонансная система питания с подмагничиванием электромагнита ускорителя L_M постоянным током от источника питания E_0 .
 L_p - разделительный реактор
 C - контурная конденсаторная батарея
 U_c - напряжение на конденсаторной батарее
 i_m - ток магнита ускорителя

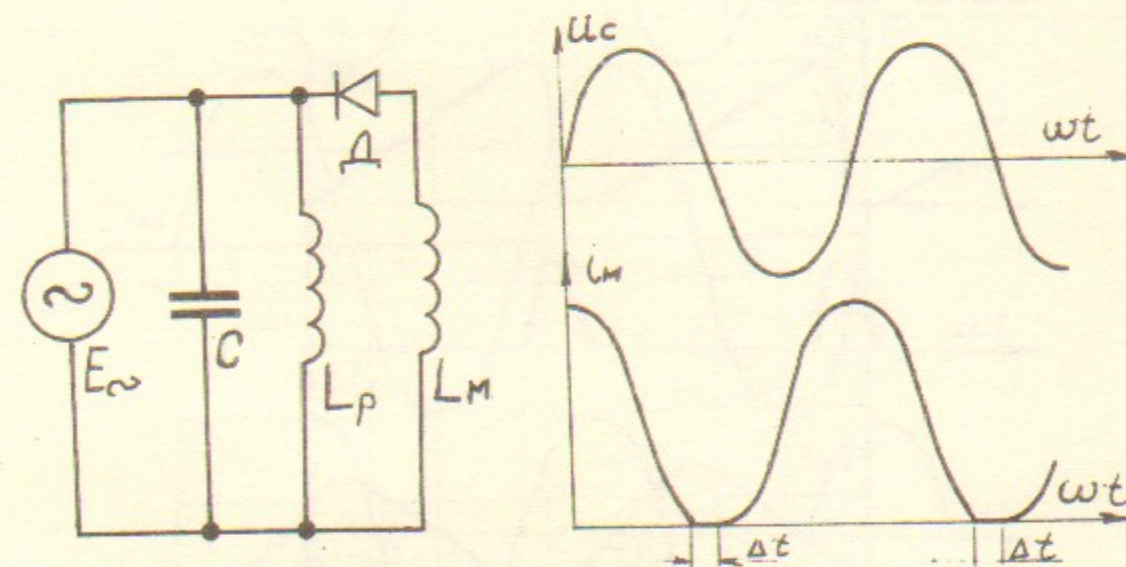


Рис.2. Резонансная система питания с подмагничиванием без использования источника постоянного тока.

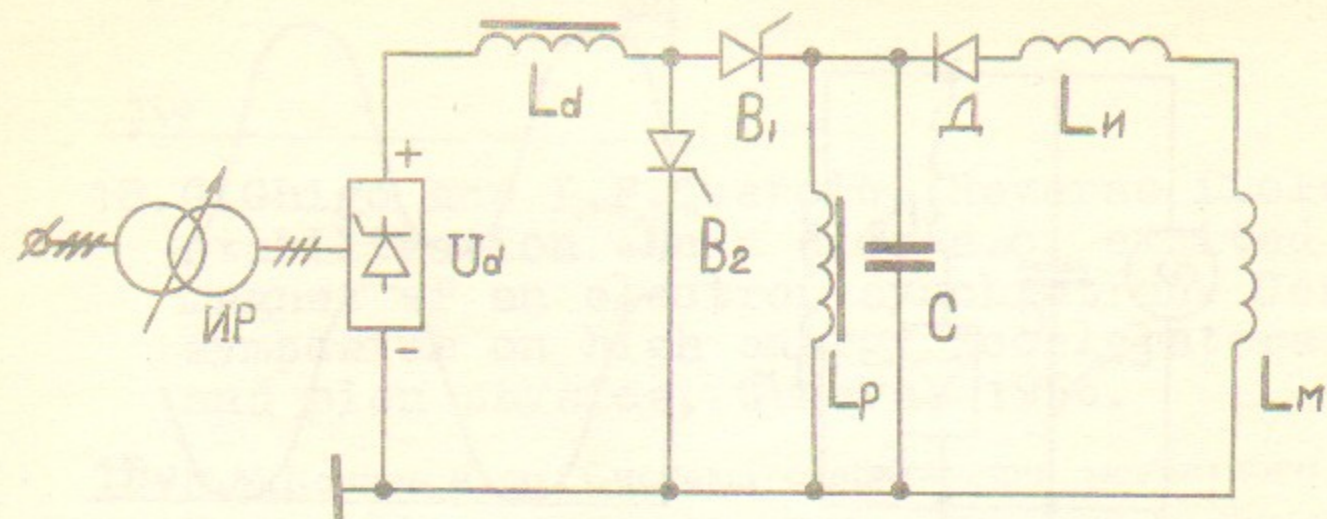


Рис.3. Схема основных цепей системы питания ускорителя Б-5.

ИР - индукционный регулятор

U_d - источник питания инвертора

L_d - инверторный реактор

B_1, B_2 - вентили инверторного преобразователя

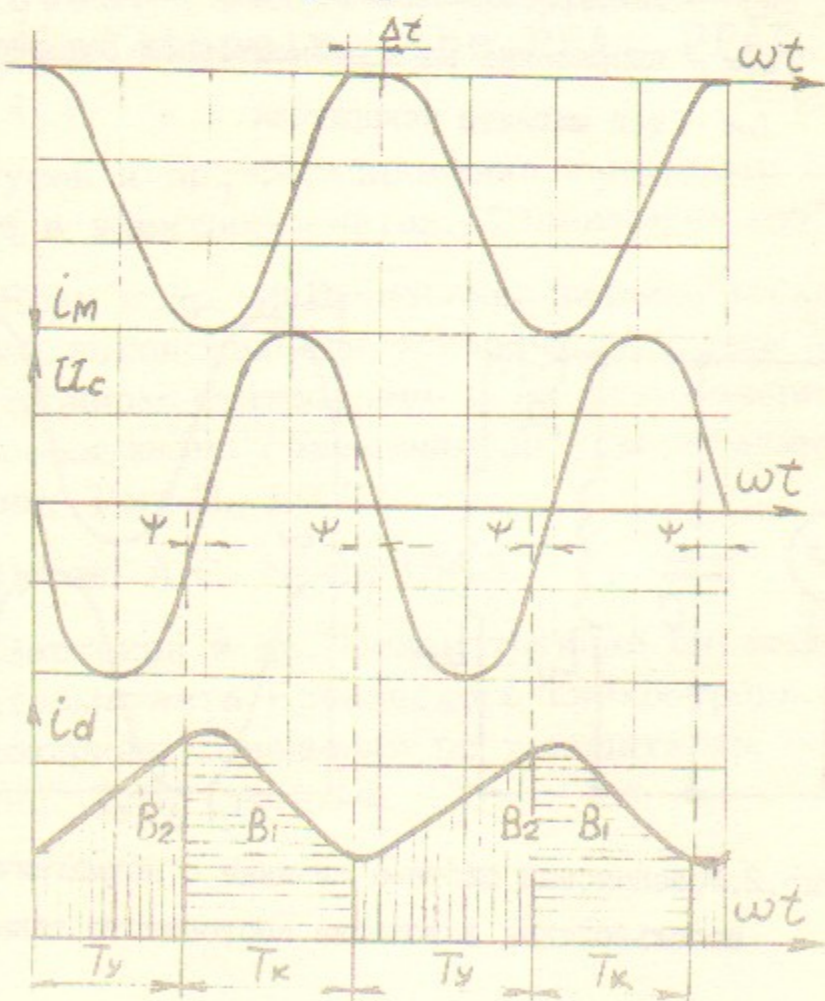


Рис.4. Осциллограмма тока магнита i_m , напряжения на конденсаторной батарее U_c и тока инверторного реактора i_d .

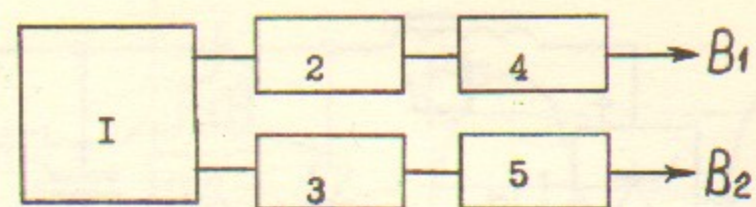


Рис.5. Блок-схема системы управления инверторным преобразователем.

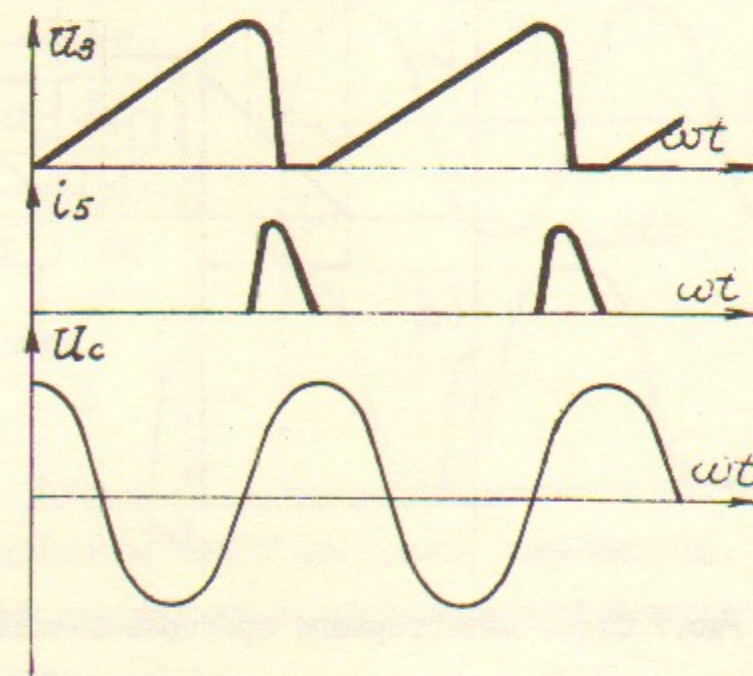
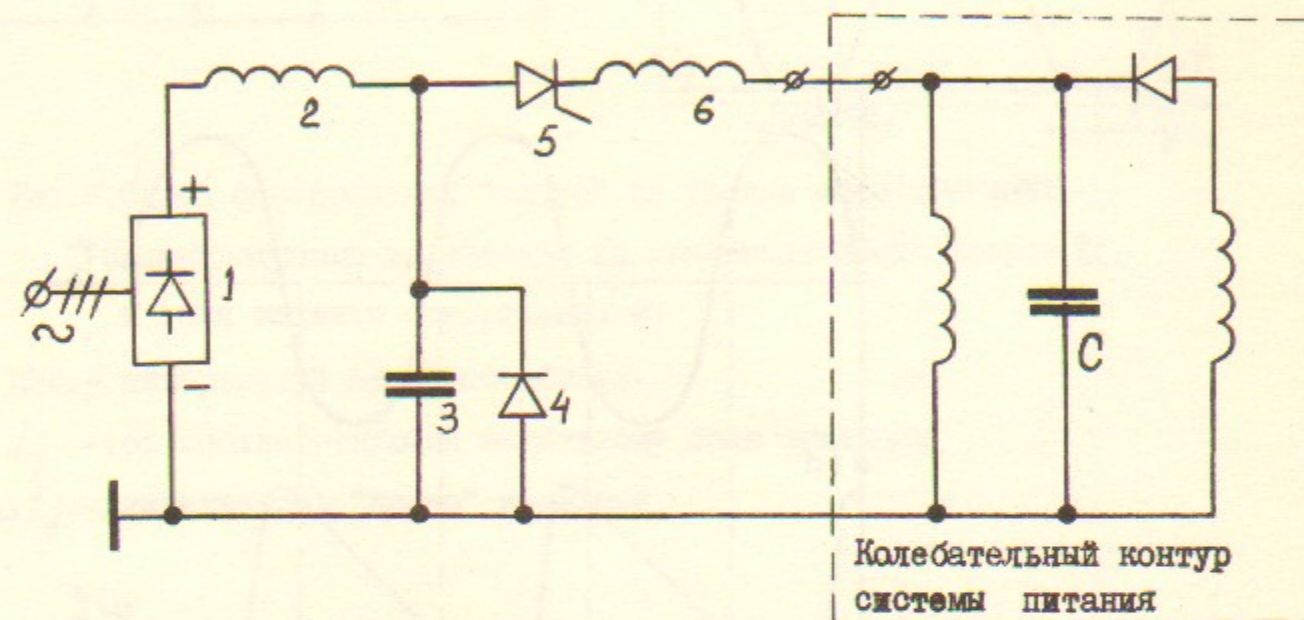


Рис.6. Схема пускового преобразователя и осциллограммы напряжения на ёмкости U_3 , тока вентилей i_s и напряжения на конденсаторной батарее системы питания U_c .

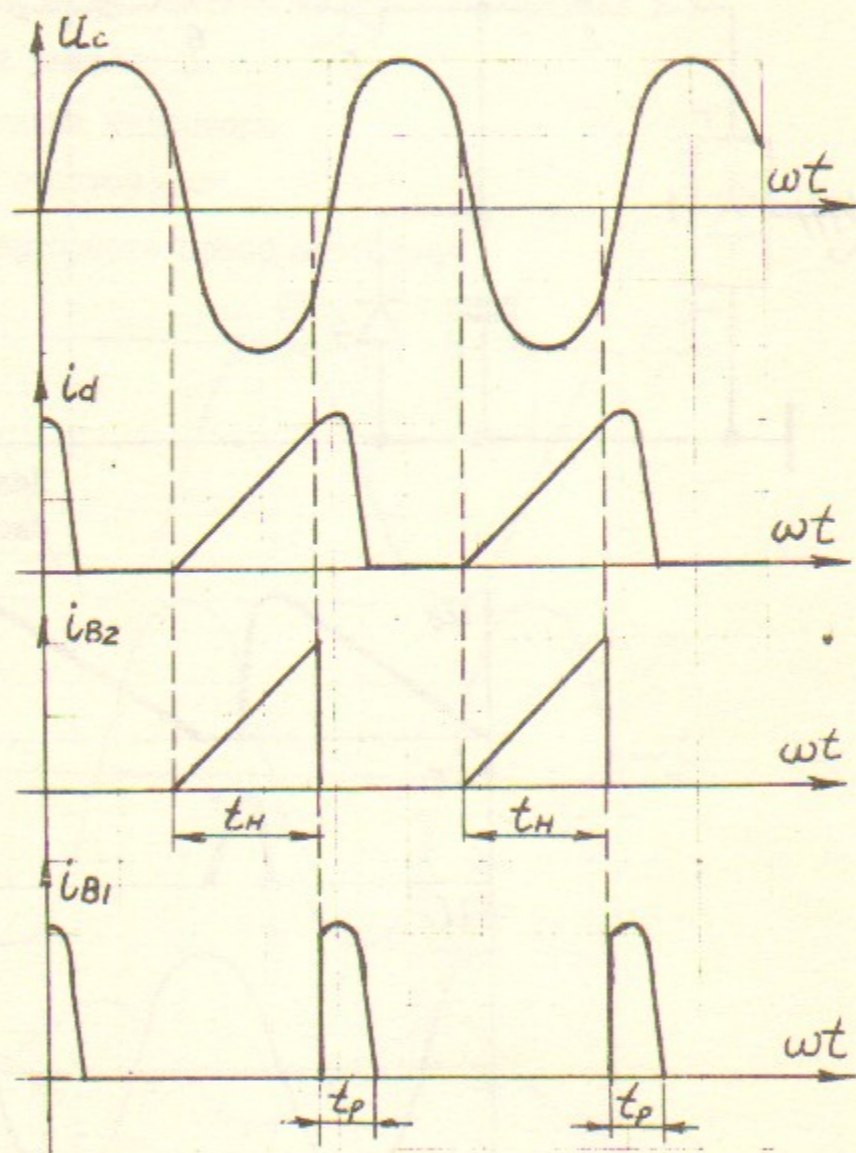
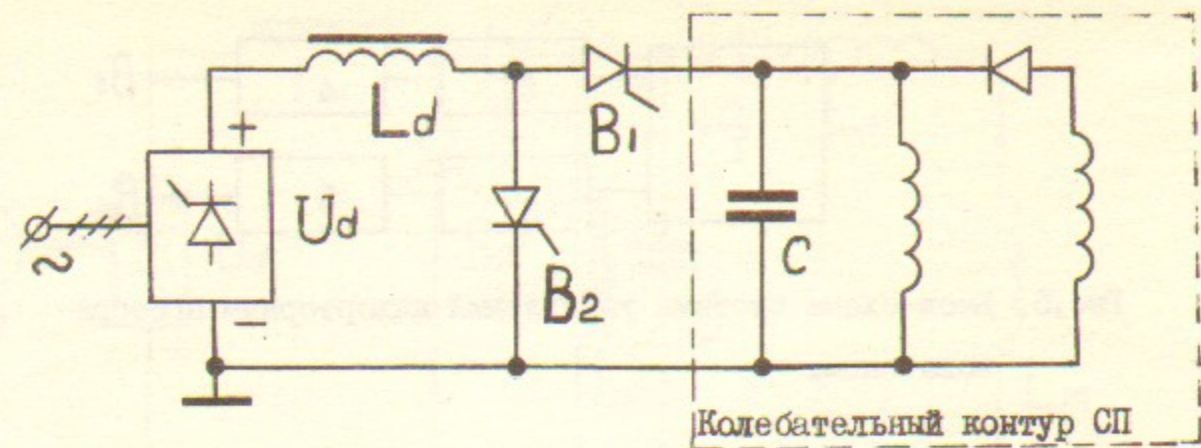


Рис.7. Схема инверторного преобразователя и осциллограммы, соответствующие его работе в режиме прерывистого тока.

U_c - напряжение на конденсаторной батарее

I_d - ток инверторного реактора

i_{B2}, i_{B1} - токи вентиля B_1 и B_2 .

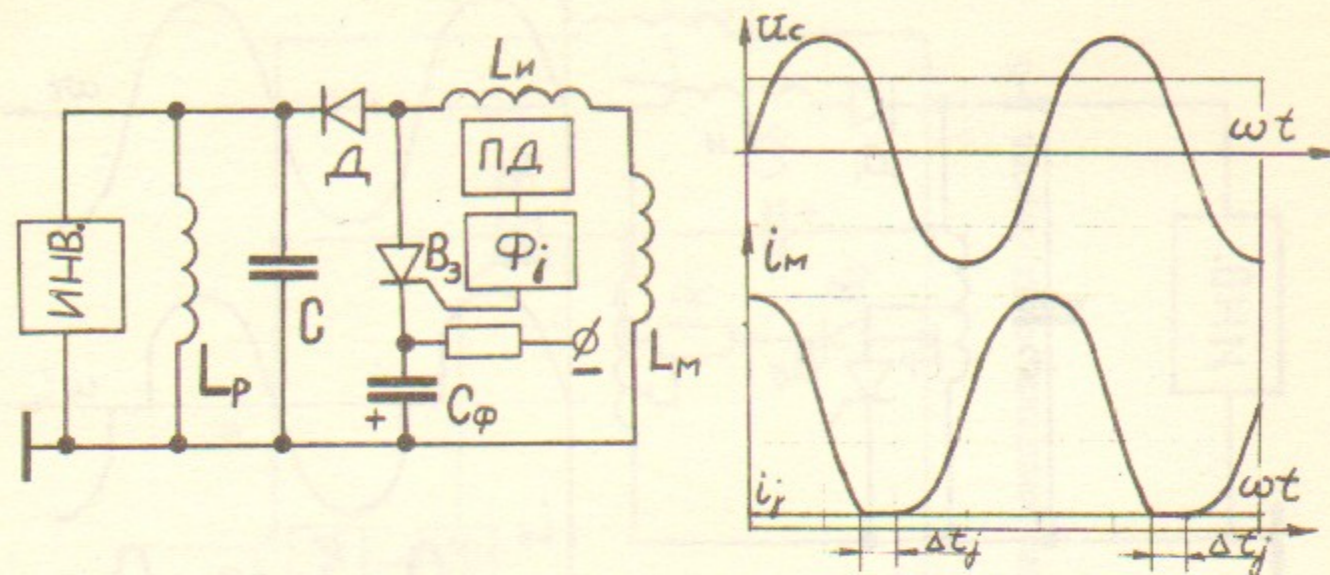


Рис.8. Схема формирования "плато" на уровне поля инжекции, осциллограммы напряжения на конденсаторной батарее U_c и тока магнита ускорителя I_m .

ИНВ. - инверторный преобразователь;

i_j - ток, соответствующий магнитному полю инжекции;

Δt_j - длительность "плато" инжекции.

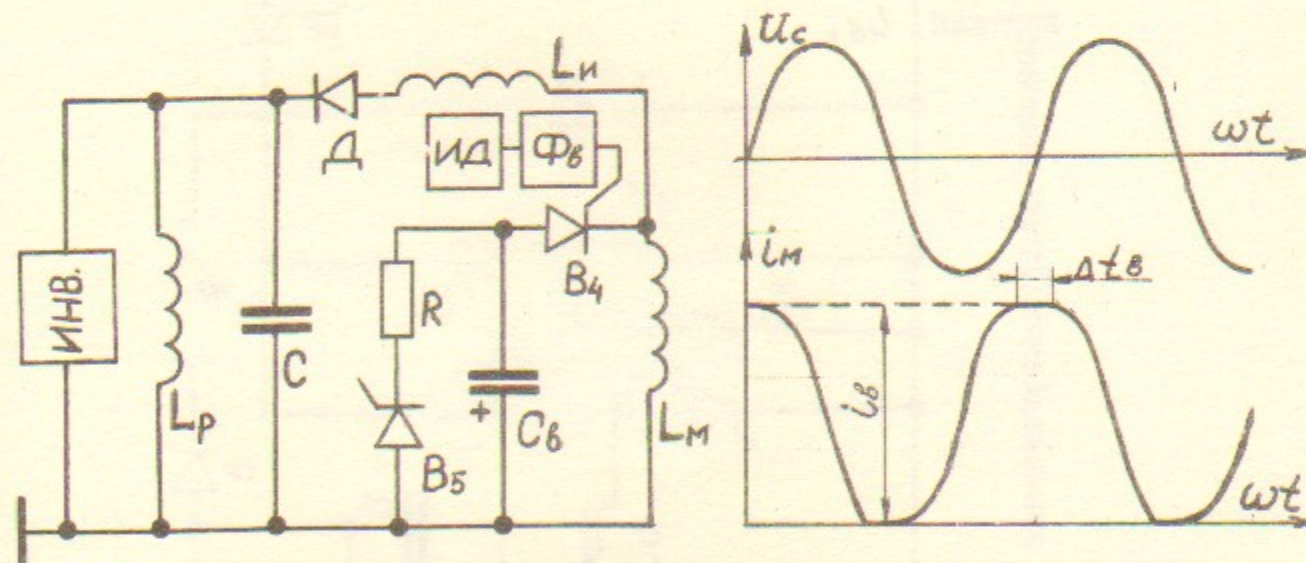


Рис.9. Схема формирования "плато" на уровне поля выпуска, осциллограммы напряжения на конденсаторной батарее U_c и тока магнита I_m .

Δt_b - длительность "плато" выпуска;

i_b - ток магнита, соответствующий уровню магнитного поля выпуска ускоренных частиц.

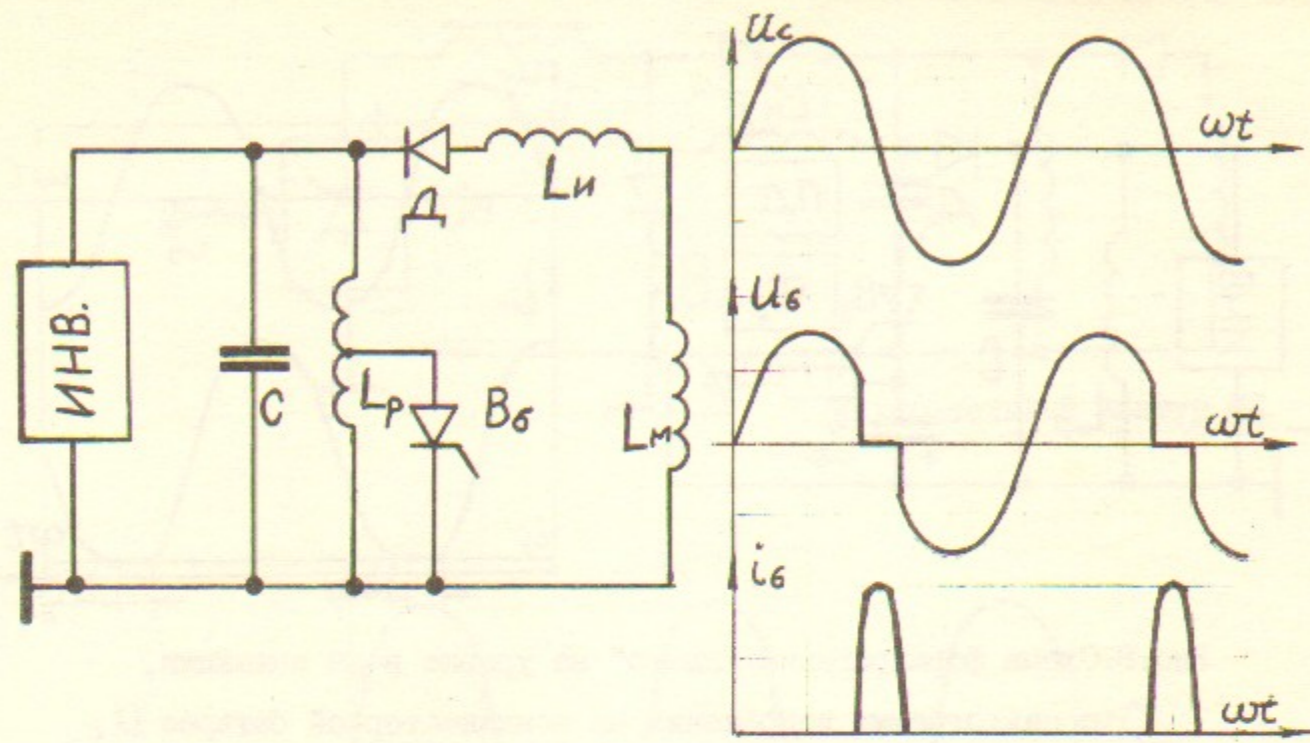


Рис. 10. Схема синхронизации частоты работы системы питания с частотой питающей сети, осциллограммы напряжения на колебательном контуре U_c , напряжения на вентиле синхронизации U_6 и тока вентиля i_6 .

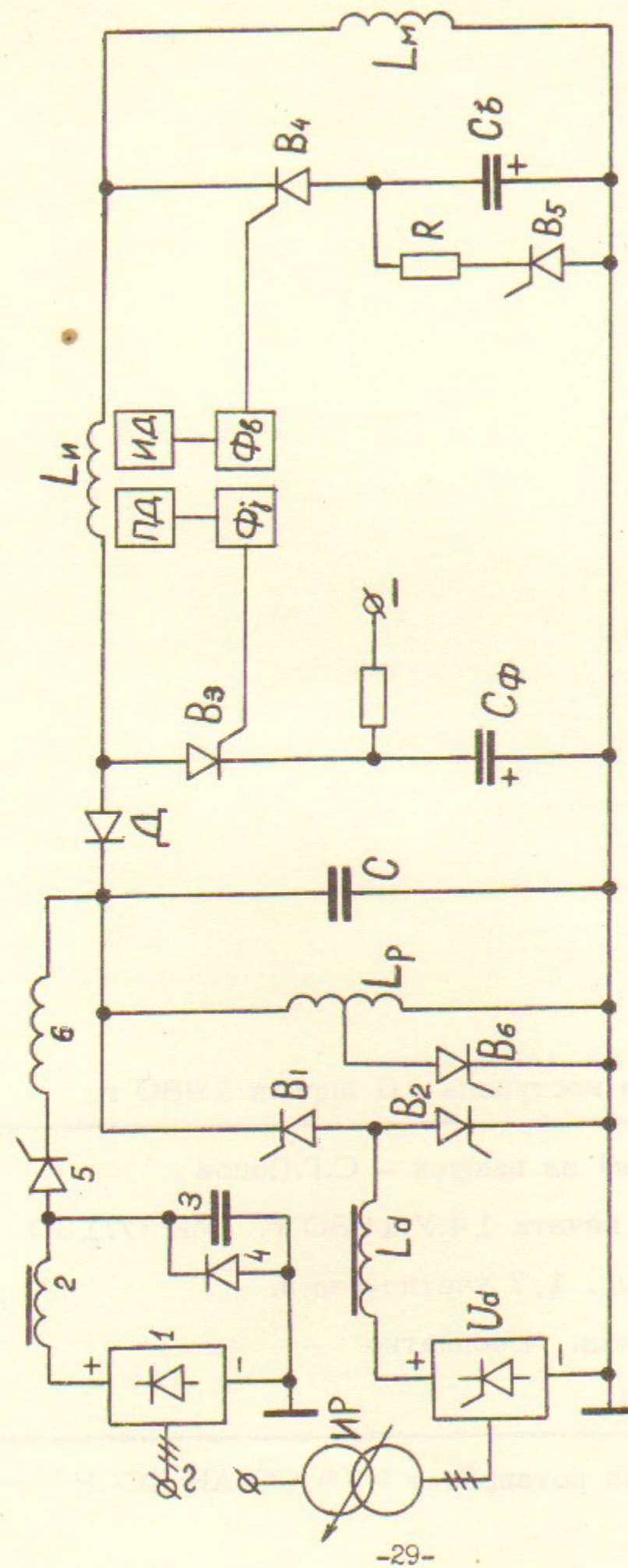


Рис. 11. Полная электрическая схема основных цепей системы питания электромагнита синхротрона Б-5