

К-142

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



2346/2-74

12/11-74

P9 - 7631

Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, А.А.Смирнов

К ВОПРОСУ ФОРСИРОВКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В РЕЖИМЕ ДВУХЭТАПНОГО УСКОРЕНИЯ ЯДЕР
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

P9 - 7631

Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, А.А.Смирнов

К ВОПРОСУ ФОРСИРОВКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В РЕЖИМЕ ДВУХЭТАПНОГО УСКОРЕНИЯ ЯДЕР
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Направлено в ЖТФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Для уменьшения потерь ускоряемых в синхροфазотроне ядер из-за изменения их заряда при взаимодействии с атомами газа, в работе /1/ был предложен метод, основанный на форсировании скорости нарастания магнитного поля на первом этапе в режиме двухэтапного синхротронного ускорения.

В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с возможностями осуществления форсирования скорости нарастания магнитного поля и обеспечения синхротронного ускорения в этом режиме при использовании существующей ускоряющей системы.

1. Высокочастотная ускоряющая система

Увеличение скорости нарастания магнитного поля автоматически требует пропорционального увеличения амплитуды ускоряющего напряжения в соответствии с известным соотношением /2/

$$eV_0 \cos \phi_0 = \frac{(2\pi R_0 + L)eR_0}{c} \dot{H}, \quad /1/$$

где V_0 - амплитуда ускоряющего напряжения; ϕ_0 - равновесная фаза; L - суммарная длина прямолинейных промежутков; R_0 - радиус центральной орбиты; c - скорость света; \dot{H} - скорость изменения магнитного поля.

Для ускорения частиц в синхροфазотроне ОИЯИ используется двухзазорный ускоряющий электрод, разме-

щаемый в одном из прямолинейных промежутков и являющийся электрической емкостью резонансного контура мощного выходного каскада ^{3/} восьмикаскадного широкополосного усилителя. При пролете через электрод частицы приобретают энергию, определяемую разностью между мгновенными значениями напряженности электрического поля в моменты пролета частицами входного и выходного зазоров. Связь между эффективной амплитудой ускоряющего напряжения "V₀", непосредственно обеспечивающей максимальную энергию, которую может приобрести ускоряемая частица за один оборот, и амплитудой высокочастотного напряжения на ускоряющем электроде "V_э" выражается через так называемый коэффициент использования амплитуды "α", характеризующий эффективность ускоряющего электрода и определяемый соотношением ^{4/}.

$$\alpha = \frac{V_0}{V_{\text{э}}} = 2 \frac{\sin \pi q \frac{l_{\text{э}}}{(2\pi R_0 + L)}}{\cos \pi \frac{l_{\text{э}}}{\lambda}}, \quad /2/$$

где q - кратность ускорения; l_э - длина электрода по ходу пучка /для синхротрона ОИЯИ l_э = 6,1 м/; λ - длина волны ускоряющего напряжения. Так как λ ≫ l_э, то из /2/ имеем

$$V_0 \approx 2 V_{\text{э}} \sin \pi q \frac{l_{\text{э}}}{(2\pi R_0 + L)}. \quad /3/$$

Из /3/ следует, что увеличение амплитуды ускоряющего напряжения можно получить не только за счет роста V_э, которое ограничено электрической прочностью зазоров, но также и за счет увеличения кратности ускорения "q". На рис. 1 представлена зависимость α = Ф(q), указывающая на то, что сравнительно низкая эффективность электрода при ускорении на первой кратности /α₁ = 0,18/ могла бы быть, в принципе, значительно повышена, если бы имелась возможность ускорения на /14 ÷ 20/ кратностях, так как в этом случае эффективная амплитуда ускоряющего напряжения в ~2 раза превышала бы амплитуду напряжения на электроде.

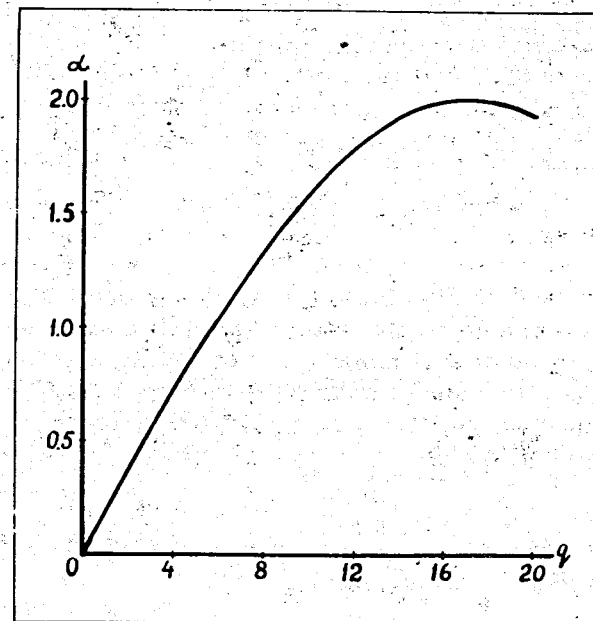


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования амплитуды от кратности ускорения.

Амплитуда ускоряющего напряжения выбирается из условия, чтобы в момент захвата пучка в синхротронный режим наибольшая часть радиальной магнитной апертуры охватывалась областью фазовой устойчивости, максимальный радиальный полуразмер которой "ρ_{max}" определяется известным соотношением ^{2/}

$$\frac{\rho_{\text{max}}}{R_0} = \sqrt{\frac{2eV_0 \cos \phi_0 (\text{tg} \phi_0 - \phi_0)}{\pi q E_A K F (1-n)^2 \beta^4}} \cdot \frac{Z}{A}, \quad /4/$$

где E_A - полная энергия частицы, приходящаяся на один нуклон; Z - заряд частицы в единицах элементарного заряда; A - массовое число частицы:

$$K = 1 + \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{\beta^2}; \quad F = 1 - \frac{L}{(2\pi R_0 + L) [n + \beta^2(1-n)]};$$

n - показатель спада магнитного поля по радиусу;
 β - относительная скорость частицы.

На основании соотношения /4/ с учетом /3/ имеем:

$$\frac{\rho_{\max}}{R_0} = \sqrt{\frac{4eV_0 \cos \phi_0 (\operatorname{tg} \phi_0 - \phi_0)}{\pi E_A K F (1-n)^2 \beta^4} \cdot \frac{Z}{A} \cdot \sqrt{\frac{\sin \pi q \frac{l_0}{2\pi R_0 + L}}{q}}} \quad /5/$$

откуда следует, что максимальный полуразмер области устойчивости при $q < 10$ очень слабо зависит от "q", вследствие чего нормальный режим ускорения обеспечивается, практически, одним и тем же напряжением на ускоряющем электроде независимо от кратности.

Соотношение /4/ с учетом /1/ может быть представлено и в другом виде

$$\operatorname{tg} \phi_0 - \phi_0 = \left(\frac{\rho_{\max}}{R_0}\right)^2 \frac{\pi E_A K F (1-n)^2 \beta^4 c}{2eR_0 (2\pi R_0 + L)} \cdot \frac{A}{Z} \frac{q}{H} \quad /6/$$

откуда ясно, что влияние возрастающей скорости изменения магнитного поля на размеры области устойчивости (ϕ_0, ρ_{\max}) можно скомпенсировать пропорциональным увеличением кратности ускорения, не прибегая к увеличению напряжения на электроде. Таким образом, нормальный режим ускорения на первом этапе в условиях повышенной скорости нарастания поля может быть обеспечен выбором соответствующей кратности ускорения на этом этапе.

Увеличение кратности в соответствии с законом связи между частотой ускоряющего напряжения "f" и напряженностью магнитного поля "H" /2/

$$f = \frac{qc}{(2\pi R_0 + L)} \cdot \frac{H}{\sqrt{\left(\frac{E_0 A}{eR_0} \frac{A}{Z}\right)^2 + H^2}} \quad /7/$$

сдвигает диапазон модуляции частоты в сторону верхних частот. Ограниченность частотного диапазона ускоряющей системы ($f_{\min} \div f_{\max}$) накладывает ограничение на предель-

ную кратность ускорения "q пред." на первом этапе, которая с точностью до целого равна отношению f_{\max}/f_{\min} /для ускоряющей системы синхрофазотрона ОИЯИ, у которой $f_{\min} = 0,2$ МГц, $f_{\max} = 1,44$ МГц, $q_{\text{пред.}} = 7/$. Увеличение кратности приводит также к уменьшению значения магнитного поля "H_{1 кон.}", при котором необходимо осуществить переход от первого этапа ускорения ко второму. Из соотношения /7/ нетрудно получить

$$H_{1 \text{ кон.}} = \frac{f_{1 \text{ кон.}}}{f_{\max}} \cdot \frac{E_0 A}{eR_0} \cdot \frac{A}{Z} \cdot \frac{1}{\sqrt{q^2 - \left(\frac{f_{1 \text{ кон.}}}{f_{\max}}\right)^2}} \quad /8/$$

где $f_{1 \text{ кон.}}$ - конечная частота ускоряющего напряжения на первом этапе.

Если использовать частотный диапазон полностью /т.е. $f_{1 \text{ кон.}} = f_{\max}$ /, то при ускорении ядер, у которых $A/Z = 2$, на синхрофазотроне ОИЯИ $R_0 = 28$ м, $H_{1 \text{ кон.}}$ можно определить по формуле

$$H_1 = \frac{2,24 \cdot 10^3}{\sqrt{q^2 - 1}} \quad /9/$$

Если ориентироваться на выводы работы /1/, где указывается, что при $H > 500$ э потери ядер из-за изменения заряда становятся практически независимыми от магнитного поля, то с учетом /9/ режим ускорения на первом этапе при $q = 4$ является, по-видимому, оптимальным. При этом допустимо увеличение скорости магнитного поля на первом этапе в 4 раза по сравнению с номинальным значением.

2. Система питания электромагнита

При выборе силовой схемы, обеспечивающей нарастание магнитного поля с повышенной скоростью, были рассмотрены возможности использования для этой цели проектной схемы устройства начальной форсировки "УНФ", разработанной НИИЭФА /г. Ленинград/, а также ряд других схем /см. рис. 2/.

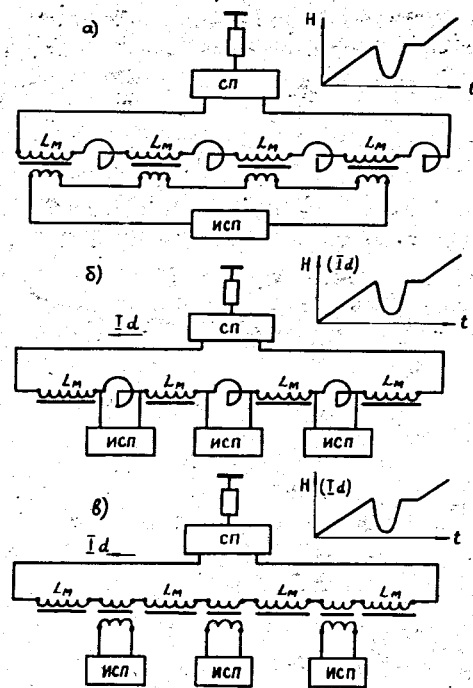


Рис. 2. Схемы импульсной форсировки скорости нарастания магнитного поля ускорителя /СП - основная система питания электромагнита ускорителя. ИСП - импульсная система питания, L_M - квадранты электромагнита ускорителя/. а/ схема форсировки с разделительными реакторами и форсировочными обмотками; б/ схема форсировки с разделительными реакторами; в/ схема форсировки с разделительными трансформаторами.

Реализация этих схем потребует наличия нестандартных мощных высоковольтных реакторов или трансформаторов, укладки новых форсировочных обмоток в электромагните ускорителя, значительно большей мощности импульсных источников питания и т.д. Импульсный характер изменения тока, получаемый в этих схемах, приводит к наличию участков с форсированным нарастанием и спаданием магнитного поля, что усложняет процесс ускорения. Пригодным для ускорения является характер изменения магнитного поля $H = F(t)$, показанный на графиках рис. 2, при котором инжекция частиц и последующее

их ускорение на первом этапе происходят на заднем фронте импульса тока /режим форсированного нарастания магнитного поля/.

Расчеты показали, что наиболее рациональной и технологичной, с точки зрения практического исполнения, является схема рис. 3.

В этой схеме между силовыми обмотками возбуждения квадрантов электромагнита ускорителя 1,2,3,4 включены основная система питания 5 и рассчитанные на полный ток возбуждения электромагнита диоды 6,7,8. Параллельно этим диодам подключены импульсные источники питания 9,10,11.

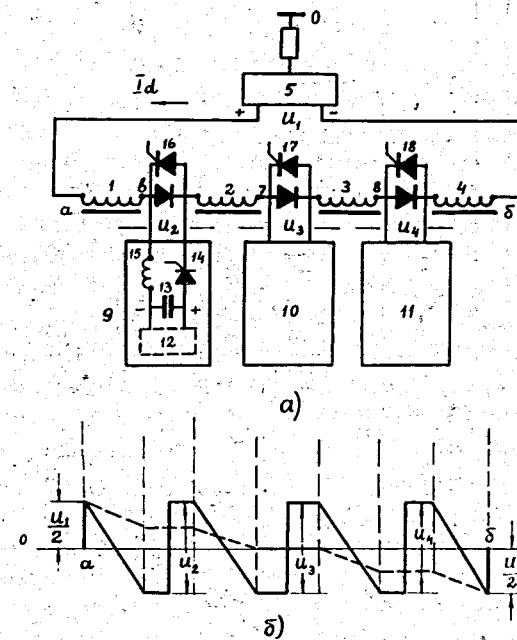


Рис. 3. Устройство импульсной форсировки скорости нарастания магнитного поля ускорителя с разделительными диодами. а/ функциональная схема; б/ кривая распределения потенциала по длине обмотки электромагнита ускорителя.

Так как при осуществлении форсированного режима не предъявляется особых требований на линейность нарастания поля, то в качестве импульсных источников питания для этой цели достаточно применить предварительно заряженные от вспомогательных выпрямителей 12 конденсаторные батареи 13.

На рис. 4 изображены временные диаграммы кривых выходных напряжений основной системы питания U_1 , импульсных источников U_2, U_3, U_4 и кривой тока возбуждения электромагнита ускорителя " I_d " в режиме форсировки. /Соответственно напряженности магнитного поля ускорителя H ./

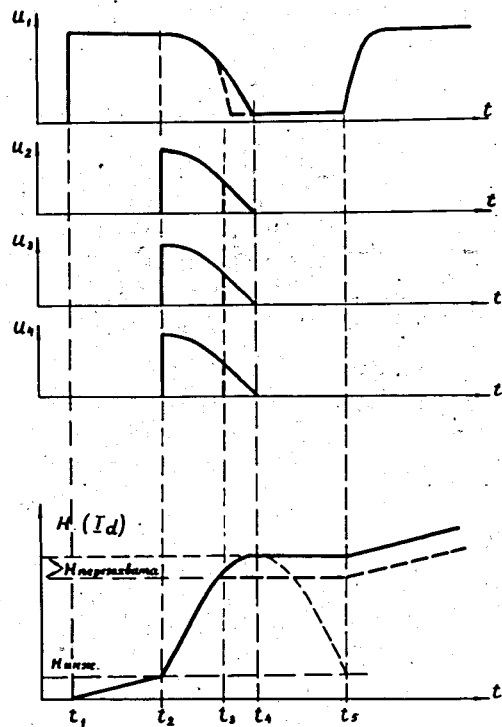


Рис. 4. Временные диаграммы выходных напряжений источников питания схемы форсировки U_1, U_2, U_3, U_4 и напряженности магнитного поля ускорителя " H ", пропорциональной току возбуждения электромагнита " I_d ".

С момента t_1 начинает работать основная система питания - 5, и ток возбуждения электромагнита I_d протекает под действием напряжения U_1 через обмотки возбуждения и диоды 6,7,8, /см. рис. 3/, обеспечивая номинальную скорость изменения тока в обмотке электромагнита.

В необходимый момент времени, например, t_2 , включаются управляемые вентили 14 импульсных источников питания 9,10,11. Ток возбуждения электромагнита на время разряда конденсаторных батарей 13 коммутируется с диодов 6,7,8 в импульсные источники питания /в конденсаторную батарею/. Скорость нарастания тока в этом случае определяется действием суммарной э.д.с. контура тока возбуждения

$$\mathcal{E} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad /10/$$

Так как нагрузка носит чисто индуктивный характер, а изменение выпрямленного напряжения основной системы питания 5 с момента t_2 /перевод в режим работы "стола" тока/ можно запрограммировать по косинусоидальному закону, то ток возбуждения I_d при работе в форсированном режиме будет представлять собой четверть волны синусоиды, переходящей в "стол" тока.

С момента t_4 ток возбуждения электромагнита коммутируется обратно в диоды 6,7,8, и на время перехода с первого этапа ускорения на второй поддерживается с помощью основной системы питания 5 постоянным. В момент t_5 основная система переводится в обычный выпрямительный режим работы, и ток возбуждения начинает нарастать с номинальной скоростью.

Соответствующие этому сложному режиму работы кривые на рис. 4 изображены сплошными линиями.

Необходимость наличия разделительного реактора 15 в схеме импульсных источников питания диктуется следующими соображениями. В качестве управляющих вентилялей предполагается применить цепочку последовательно соединенных тиристоров, поэтому при включении импульсных источников и коммутации тока с диодов 6,7,8 в конденсаторные батареи необходимо ограничить скорость нарастания тока.

С другой стороны, для осуществления цикла размагничивания электромагнита ускорителя необходимо параллельно диодам 6,7,8 подключить управляемые вентили 16, 17, 18, которые пропускали бы ток размагничивания в соответствующие моменты времени.

Если эти вентили включать в момент t_3 /см. рис.4/, то переход в режим "стола" тока можно получить за более короткое время. Для ограничения тока конденсаторной батареи в этом случае также необходим разделительный реактор.

На время форсированного режима величина суммарной э.д.с. (при $U_1 = U_2 = U_3 = U_4$) в цепи тока возбуждения электромагнита в 4 раза превышает напряжение основной системы питания. Однако последовательно чередующееся соединение основной системы питания обмоток возбуждения отдельных квадрантов электромагнита ускорителя и импульсных источников питания позволяет получить такое распределение потенциала по длине обмотки магнита относительно "земли" /на рис. 3б кривая, изображенная сплошной линией/, при котором напряжение различных частей обмотки относительно "земли" не превышает проектной величины. Для сравнения на рис. 3б пунктирной линией изображена кривая распределения потенциала по длине той же обмотки при работе только одной основной системы питания.

Сравнение кривых рис. 3б показывает, что межвитковое напряжение во время форсировки увеличится по сравнению с обычным режимом работы в 4 раза. Но поскольку межвитковая и корпусная изоляция рассчитывались на одно и то же напряжение, то такое увеличение межвиткового напряжения не представляется опасным для обмотки магнита.

В соответствии с рассмотренной схемой в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ разработан рабочий проект устройства форсировки.

Заключение

Проведенные исследования показывают практическую возможность осуществления режима форсировки магнит-

ного поля и преимущество двухэтапного ускорения на синхрофазотроне ОИЯИ, что позволяет при сравнительно небольших затратах обеспечить ускорение ядер с более высоким атомным номером, чем ядра гелия.

Литература

1. Е.Д.Донец, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, А.А.Смирнов. ОИЯИ, 9-7043, Дубна, 1973.
2. М.С.Рабинович. Труды ФИАН СССР, т. X, 23 /1958/.
3. И.Х.Невяжский и др. Радиотехника и электроника, т. 1, 7, 954 /1956/.
4. Ю.М.Лебедев-Красин. Радиотехника и электроника, т. 1, 7 940 /1956/.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 декабря 1973 года.