

C 345e5

M-69

19/II-73

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 6793

671/2-73



А.И.Михайлов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ОБ УПРАВЛЕНИИ ФАЗОЙ И АМПЛИТУДОЙ
УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ УСКОРЕНИИ
ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

1972

9 - 6793

А.И.Михайлов

ОБ УПРАВЛЕНИИ ФАЗОЙ И АМПЛИТУДОЙ
УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ УСКОРЕНИИ
ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Объединенный институт
ядерных исследований
ОИЯИ Дубна

В основу предложенного метода ускорения дейтронов, ядер гелия и других более тяжелых частиц на синхрофазотроне ОИЯИ положен принцип двухэтапного ускорения в синхротронном режиме сначала на второй, а затем на первой кратностях ^{/1/}. Переход со второй кратности на первую осуществляется при выключенном ускоряющем напряжении в режиме постоянного во времени магнитного поля ^{/1,2/}. После повторного захвата частиц во второй этап ускорения магнитное поле снова нарастает с прежней скоростью. При этом из-за особенностей схемы подавления пульсаций ^{/3/} системы питания электромагнита переходный режим магнитного поля от постоянного к растущему характеризуется наличием некоторого "провала" в поле ≈ 20 эрстед и появлением значительных пульсаций. Этот переходный режим вызывает раскачку синхротронных колебаний, что приводит к значительным потерям интенсивности пучка ^{/4/}.

Для устранения раскачки синхротронных колебаний, вызываемой различными возмущающими факторами, в том числе и пульсациями магнитного поля, обычно используют системы подавления когерентных синхротронных колебаний ^{/5+8/}. В этих системах сигнал, пропорциональный разности между равновесной фазой ускоряющего напряжения и фазой центра "тяжести" сгустка частиц, регистрируемого сигнальными электродами, модулирует либо частоту ^{/5+7/}, либо фазу ^{/8/} ускоряющего напряжения. Так как в переходном режиме магнитного поля колебания равновесной фазы достаточно велики, а когерентность во вновь сформированном пучке проявляется слабо, то эффективность действия указанных систем оказывается недостаточной.

В работе рассматривается возможность устранения указанных потерь интенсивности посредством модуляции фазы и амплитуды

ускоряющего напряжения с помощью информации о скорости изменения магнитного поля.

1. Динамика фазового движения в переходном режиме магнитного поля

При ускорении в синхротронном режиме энергия, приобретаемая равновесной частицей за один оборот, когда высокочастотное ускоряющее поле значительно превышает бетатронную ЭДС, определяется соотношением /9/

$$ZeV_0 \cos \phi_0 = \frac{(2\pi R_0 + L) \cdot ZeR_0}{c} \cdot \dot{H}, \quad /1/$$

где: V_0 - амплитуда ускоряющего напряжения; ϕ_0 - равновесная фаза /фаза ускоряющего напряжения, при которой равновесная частица пролетает ускоряющий промежуток/; R_0 - радиус орбиты; L - суммарная длина прямолинейных промежутков; c - скорость света; e - элементарный заряд; Z - заряд частицы в единицах элементарного заряда; \dot{H} - скорость изменения магнитного поля.

Из соотношения /1/ следует, что равновесная фаза, зависящая от амплитуды ускоряющего напряжения и скорости изменения магнитного поля, может иметь значения: а/ $0 < \phi_0 < \frac{\pi}{2}$ при растущем магнитном поле ($\dot{H} > 0$); б/ $\phi_0 = \frac{\pi}{2}$ при постоянном магнитном поле ($\dot{H} = 0$) в; в/ $\frac{\pi}{2} < \phi_0 < \pi$ при спадающем магнитном поле ($\dot{H} < 0$).

Изменение " \dot{H} " приводит не только к смещению равновесной фазы, но и к изменению размеров области фазовой устойчивости. На основании первого интеграла фазового уравнения /9/ можно получить уравнения для сепаратрисы в трех случаях:

$$\frac{p}{R_0} = \sqrt{\frac{eV_0}{\pi q E_A \cdot K F (1-n)^2 \beta^4}} \cdot \frac{Z}{A} (\sin \phi - \phi \cos \phi_{01} + \sin \phi_{01} - \phi_{01} \cos \phi_{01}),$$

при $\dot{H} > 0$

$$\frac{\rho}{R_0} = \sqrt{\frac{eV_0}{\pi q E_A K F (1-n)^2 \beta^4}} \cdot \frac{Z}{A} \cdot (1 + \sin \phi)$$

при $\dot{H} = 0$,

$$\frac{\rho}{R} = \sqrt{\frac{eV_0}{\pi q E_A K F (1-n)^2 \beta^4}} \cdot \frac{Z}{A} [\sin \phi - \phi \cos \phi_{03} + \sin \phi_{03} + (2\pi - \phi_{03}) \cos \phi_{03}]$$

/2/

при $\dot{H} < 0$

где: ρ - радиальное отклонение траектории частицы от R_0 ;
 E_A - полная энергия частицы, приходящаяся на один нуклон;

q - кратность ускорения; $K = 1 + \frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{\beta^2}$;

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

n - показатель спада магнитного поля по радиусу; β - относительная скорость частицы; ϕ - фаза ускоряющего поля; ϕ_{01} , ϕ_{03} - значения равновесной фазы.

На рис. 1 представлены области устойчивости в соответствии с уравнениями /2/ для некоторого частного случая, характерного для ускорения дейтронов в начале второго этапа / $V_0 = 4,2$ кв; $E_A = 1,07$ Гэв/нуклон; $n = 0,67$; $R_0 = 28$ м; $L = 32$ м; $\beta = 0,5$; $q = 1$, $\frac{Z}{A} = 0,5$ /, когда на "столе" магнитного поля появляются пульсации в " \dot{H} " с амплитудой $\approx 25\%$ от средней скорости нарастания поля / $\dot{H}_{ср} = 4 \cdot 10^3$ эрстед/сек/. Сепаратрисы соответствуют: 1 - при $\dot{H} = +1 \cdot 10^3$ э/сек; 2 - при $\dot{H} = 0$; 3 - при $\dot{H} = -1 \cdot 10^3$ э/сек.

Из рис. 1 следует, что пульсации на "столе" магнитного поля помимо смещений равновесной фазы приводят также к сокращению азимутальных и радиальных размеров области устойчивости. Вследствие этого частицы, оказавшиеся в заштрихованной области, будут потеряны в переходном режиме. Будут потеряны и частицы, попавшие в эту область вследствие раскачки синхротронных колебаний, в особенности, если частота этих колебаний сравнима с частотой одной из гармоник пульсаций магнитного поля. Очевидно, что для предотвращения указанных потерь необходимо подстраи-

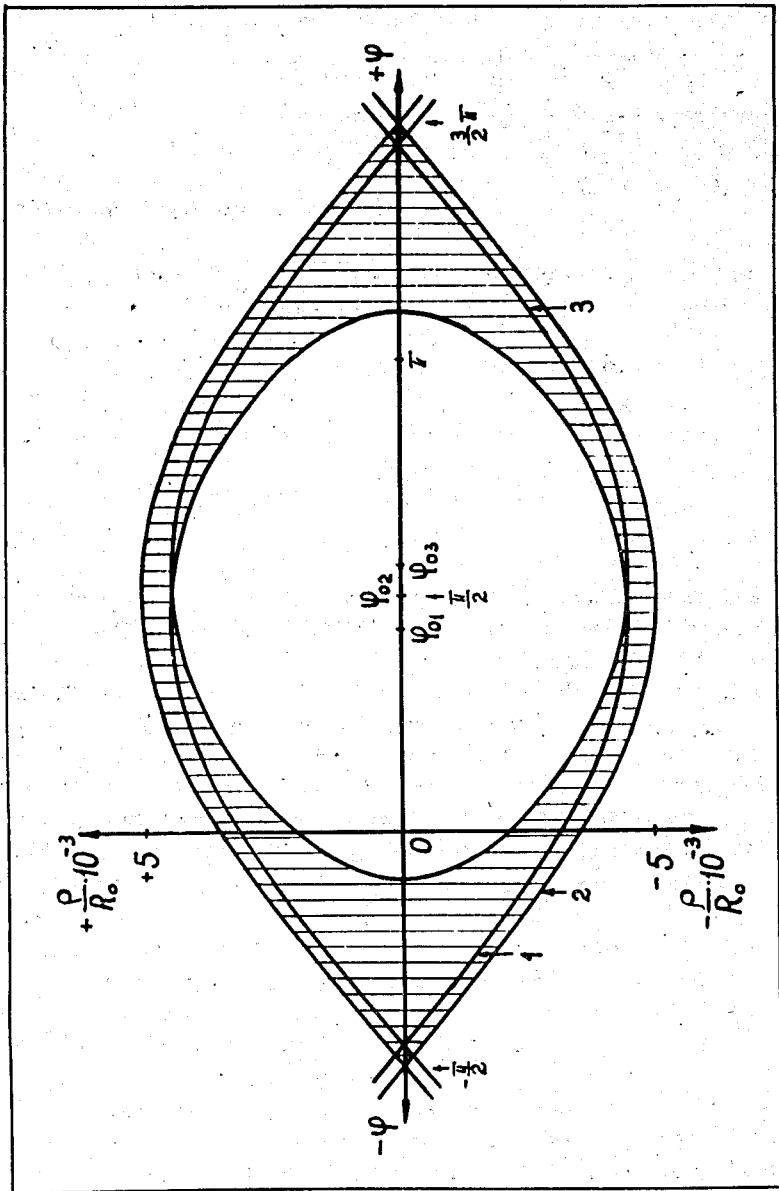


Рис. 1. Области устойчивости при ускорении частиц в начале второго этапа: 1 - при $H = +1.10^3$ э/сек; 2 - при $H=0$; 3 - при $H = -1.10^3$ э/сек.

вать фазу высокочастотного ускоряющего напряжения под пучок, поддерживая при этом радиальный размер области устойчивости постоянным.

Пусть Ψ - сдвиг равновесной фазы, отсчитываемый от ее значения при постоянном магнитном поле, т.е.

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} \pm \Psi \quad /3/$$

Обычно амплитуда ускоряющего напряжения такова, что равновесная фаза при нормальном ускорении в режиме растущего поля составляет $\approx 60^\circ$. Тогда с точностью до нескольких процентов можно считать, что

$$\cos \phi_0 \approx \pm \Psi \quad /4/$$

и с учетом /1/

$$\Psi = -a \cdot \frac{\dot{H}}{V_0}, \quad /5/$$

где $a = \frac{(2\pi R_0 + L) \cdot 300 R_0}{c}$ - коэффициент, определяемый параметра-

ми ускорителя и численно равный для синхрофазотрона ОИЯИ 0,58. Из уравнения /5/ следует, что сдвиг равновесной фазы прямо пропорционален скорости изменения магнитного поля. При $\dot{H} > 0$ сдвиг равновесной фазы опережающий, а при $\dot{H} < 0$ - отстающий по отношению к равновесной фазе при ускорении на постоянном поле.

Максимальный размер области устойчивости имеет место при значениях фаз

$$\phi = \phi_{01} = \frac{\pi}{2} - \Psi \quad \text{при } \dot{H} > 0$$

$$\phi = \phi_{02} = \frac{\pi}{2} \quad \text{при } \dot{H} = 0 \quad /6/$$

$$\phi = \phi_{03} = \frac{\pi}{2} + \Psi \quad \text{при } \dot{H} < 0$$

Подставляя /6/ в /2/, разлагая функцию $\cos \Psi$ в ряды ограничиваясь двумя членами, а также учитывая, что $\sin \Psi \approx \Psi$, будем иметь для любого значения \dot{H}

$$\frac{\rho_{max}}{R_0} = \sqrt{\frac{e V_0}{\pi q E_A K F (1-n)^2 \beta^4} \cdot \frac{Z}{A} \cdot 2 \left(1 + \frac{\Psi^2}{2} - \frac{\pi}{2} |\Psi|\right)}, \quad /7/$$

где: ρ_{max} - максимальный полуразмер области устойчивости;
 $|\Psi|$ - абсолютное значение Ψ .

Обозначив

$$\left(\frac{\rho_{max}}{R_0}\right)^2 \cdot \frac{\pi q K F E_A (1-n)^2 \beta^4}{2} \cdot \frac{A}{Z} = V_{oc},$$

где V_{oc} - амплитуда ускоряющего напряжения, соответствующая заданной полуширине области устойчивости ρ_{max} при $\dot{H} = 0$, на основании соотношений /5/ и /7/ получим

$$V_0 = \frac{V_{oc}}{2} + \frac{a\pi}{4} |\dot{H}| + \sqrt{\left(\frac{V_{oc}}{2} + \frac{a\pi}{4} |\dot{H}|\right)^2 - \frac{a^2}{2} \dot{H}^2}. \quad /8/$$

На рис. 2 представлена зависимость дополнительного приращения амплитуды ускоряющего напряжения $\Delta V_0 = V_0 - V_{oc}$, а также компенсирующего фазового сдвига Ψ_k в функции скорости изменения магнитного поля " \dot{H} " при ускорении в начале II этапа для двух случаев:

а/ Кривые 1,3 - соответственно $\Delta V_0 = F(\dot{H})$ и $\Psi_k = \Phi(\dot{H})$ при $V_{oc} = 2$ кв; б/ кривые 2,4 - также $\Delta V_0 = F(\dot{H})$ и $\Psi_k = \Phi(\dot{H})$ при $V_{oc} = 4$ кв.

Из рис. 2 следует, что величина ΔV_0 слабо зависит от V_{oc} и изменяется практически пропорционально \dot{H} . В то же время с увеличением V_{oc} улучшается линейность функции $\Psi_k = \Phi(\dot{H})$. Таким образом, в первом приближении для обеспечения наименьшей раскачки синхротронных колебаний из-за пульсаций магнитного поля с амплитудой $\dot{H}_m = 1.10^3$ э/сек достаточно модулировать фазу ускоряющего напряжения прямо пропорционально " \dot{H} " /при $\dot{H} < 0$ должен вводиться опережающий сдвиг фазы, а при $\dot{H} > 0$ - отстающий/, а амплитуду ускоряющего напряжения изменять пропорционально абсолютному значению скорости изменения магнитного поля $|\dot{H}|$.

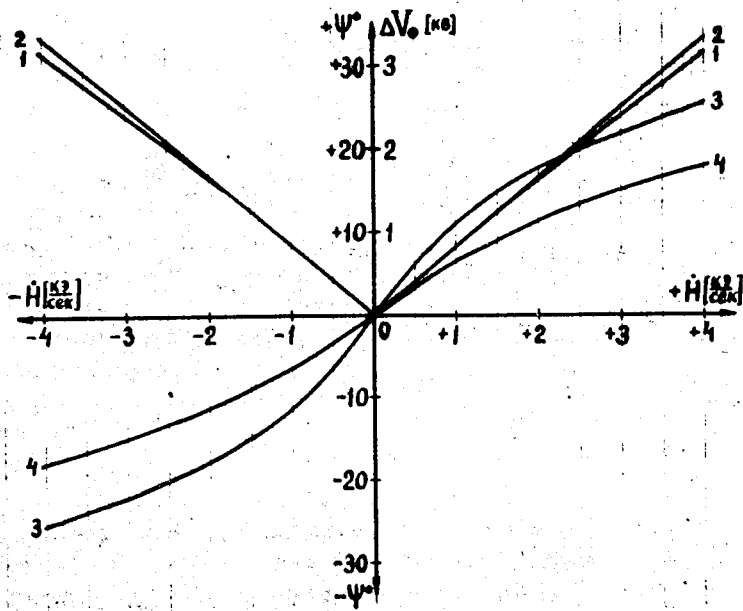


Рис. 2. Зависимость дополнительного приращения в.ч. ускоряющего напряжения " ΔV_0 " / кривые 1,2/ и компенсирующего фазового сдвига " Ψ_k " / кривые 3,4/ в функции скорости изменения магнитного поля " \dot{H} ". Кривые 1, 3 - при $V_{oc} = 2 \text{ кВ} / V = 11 \text{ кВ/}$; кривые 2,4 - при $V_{oc} = 4 \text{ кВ} / V = 22 \text{ кВ/}$.

Ускоряющее напряжение V_0 обеспечивается высокочастотным напряжением в зазорах ускоряющего электрода V , являющегося емкостью колебательного контура выходного каскада ускоряющей системы /10/. Соотношение между V_0 и V , выражаемое через коэффициент передачи "а", зависит от параметров ускорителя и определяется по формуле /11/.

$$a = \frac{V_0}{V} \approx 2 \sin \pi q \frac{l}{(2\pi R_0 + L)}, \quad /9/$$

где l - длина электрода по направлению движения пучка. Для синхрофазотрона ОИЯИ $l = 6,1$ м / $a_1 = 0,18$ при ускорении на первой кратности $q = 1$ /. При такой сравнительно низкой эффективности ускоряющего электрода и имеющейся ширине пучка в конце первого этапа ускорения необходимое приращение амплитуды ускоряющего напряжения ΔV_0 в переходном режиме магнитного поля может быть и не реализовано на практике при ускорении с одним ускоряющим электродом из-за ограничений электрической прочности зазоров.

2. Схема управления фазой ускоряющего напряжения

Обычно в устройствах фазовой модуляции в широкой полосе частот используют принцип преобразования амплитудной модуляции в фазовую /12/. Однако эти устройства достаточно сложны с точки зрения расчета и особенно наладки высокочастотного широкополосного фазовращателя на 90° /13, 14/, а также необходимости подавления амплитудной модуляции в сигнале, модулированном по фазе.

В рассматриваемом фазовом модуляторе используется фазовращатель, управляемый сигналом обратной связи. Блок-схема устройства показана на рис. 3. Высокочастотный сигнал с задающего генератора, постоянный по амплитуде и изменяющийся по частоте в диапазоне $0,2 \sim 1,44$ мгц, поступает на широкополосный трансформатор "ТР", с одной из вторичных обмоток которого сигнал подается на резистивно-емкостной мостиковый фазовращатель /12/. При одинаковых сопротивлениях в плечах моста (r_0) сигнал на выходе фазовращателя постоянен по амплитуде и изменяется по фазе по отношению к входному сигналу от 0 до 180° при изменении

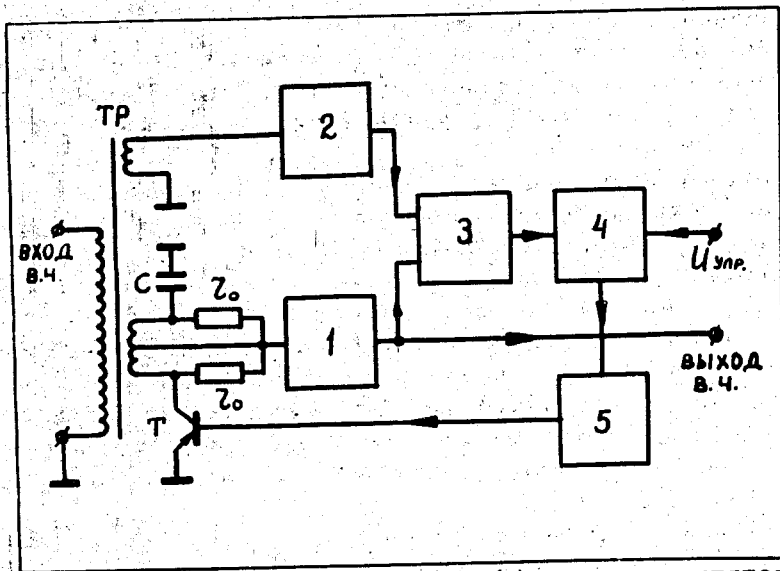


Рис. 3. Блок-схема широкополосного фазового модулятора: 1, 2 - широкополосные усилители; 3 - балансный фазовый детектор; 4 - дифференциальный усилитель; 5 - согласующий эмиттерный повторитель; Т - высококачественный транзистор типа IT313B; Тр - широкополосный трансформатор.

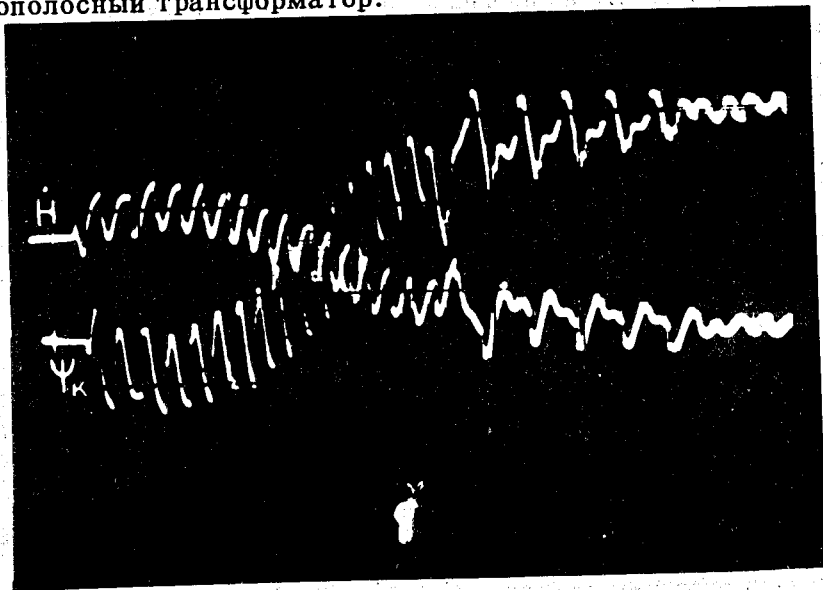


Рис. 4. Осциллограмма сигналов, пропорциональных скорости изменения магнитного поля "H" и компенсирующему фазовому сдвигу ускоряющего напряжения "Ψк" в переходном режиме магнитного поля от постоянного к растущему.

сопротивления участка коллектор-эмиттер транзистора "Т" от 0 до ∞ *. Во избежание нелинейных искажений амплитуда сигнала, прикладываемого к управляемому транзистору, должна быть не более $/30 \pm 50/$ мв. Это обеспечивается соответствующим коэффициентом трансформации.

С выхода фазовращателя сигнал поступает на широкополосный усилитель "1", который обеспечивает на входе балансного фазового детектора "3" /16/ амплитуду сигнала порядка 1 в. Так как в сигнале с управляемой фазой из-за фазовых искажений в усилителе "1" появляется неуправляемый фазовый сдвиг в зависимости от частоты сигнала, то сигнал с опорной фазой, снимаемый с другой обмотки трансформатора, перед подачей на второй вход фазового детектора также усиливается усилителем "2", идентичным усилителю "1". Коэффициент трансформации в канале с опорной фазой выбран таким, чтобы выходные сигналы усилителей "1" и "2" были примерно одинаковыми по амплитуде.

Напряжение на выходе фазового детектора, равное нулю при сдвиге фаз 90° между сигналами с регулируемой и опорной фазами, изменяется пропорционально /с точностью до нескольких процентов/ фазовому сдвигу в пределах $/90 \pm 50/^\circ$.

Дифференциальный усилитель постоянного тока "4", усиливая разность между управляющим напряжением " $U_{упр}$ " и выходным напряжением фазового детектора, через согласующий эмиттерный повторитель "5" управляет сопротивлением транзистора "Т". При $U_{упр} = 0$ схема создает фазовый сдвиг 90° между сигналами на выходах усилителей "1" и "2". При $U_{упр} \neq 0$ фазовый сдвиг между сигналами будет изменяться относительно 90° -градусного сдвига пропорционально " $U_{упр}$ " в пределах линейного участка характеристики фазового детектора.

3. Экспериментальные результаты

Фазовый модулятор по описанной выше схеме был использован при ускорении дейтронов. В качестве управляющего напряжения, модулирующего фазу ускоряющего напряжения, использовался сигнал с интеграторной катушки /17/, пропорциональный скорости изменения магнитного поля. Иллюстрацией может служить осциллограм-

* В фазовращателе звукового диапазона частот, описанном в работе /15/, в качестве управляемого сопротивления используется полевой транзистор.

ма рис. 4. На одном из лучей (\dot{H}) показан сигнал с интеграторной катушки, а на другом (Ψ_k) - напряжение, пропорциональное фазовому сдвигу ускоряющего напряжения, в переходном режиме магнитного поля. Запуск осциллографа - непосредственно перед моментом выключения системы подавления пульсаций и началом перевода магнитного поля из постоянного в растущее.

На рис. 5 представлены осциллограммы сигнала интенсивности на первом и начале второго этапах ускорения дейтронов. Указанные на осциллограммах моменты времени означают: t_I - конец первого этапа; t_{II} - начало второго этапа; t_k - начало переходного режима в магнитном поле. Отсутствие сигнала в интервале t_I - t_{II} означает, что пучок при отсутствии ускоряющего напряжения дебанчируется, и система измерения интенсивности не "чувствует" сплошного кольцевого пучка, циркулирующего в камере ускорителя. При выключенном фазовом модуляторе /рис. 5а/ в переходном режиме наблюдаются значительные потери интенсивности. При работе фазового модулятора и введении компенсирующего фазового сдвига в ускоряющее напряжение эти потери существенно уменьшаются /см. рис. 5б/.

Управление одной лишь фазой ускоряющего напряжения позволило значительно уменьшить потери интенсивности в переходном режиме магнитного поля и ускорить до максимальной энергии $\approx 60\%$ дейтронов, ускоренных к концу I этапа /18/.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Г.С.Казанскому, Ю.Д.Безногих и Г.П.Пучкову за полезное обсуждение результатов исследований при ускорении дейтронов.

Литература

1. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев и др. ОИЯИ, Р9-4214, Дубна, 1968.
2. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев и др. ПТЭ, 4, 202 /1969/.
3. А.А.Смирнов и др. ОИЯИ, Р9-5724, Дубна, 1971.
4. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков. ОИЯИ, Р9-5311, Дубна, 1970.
5. E.J.Rogers. Rev.Sci.Instr. 29, 3, 215 (1958).
6. W.Schnell. Intern.Conf. on High Energy Acceler. and Instr. CERN, Geneva, 485 (1959).
7. Ю.С.Иванов, А.А.Кузьмин, ПТЭ, 4, 106 /1962/.
8. Г.С.Казанский, А.П.Царенков. ОИЯИ, 2491, Дубна, 1965.

9. М.С.Рабинович. Труды ФИАН, т. X, 23 /1958/.
10. И.Х.Невяжский и др. "Радиотехника и электроника", т. I, вып. 7, 954 /1956/.
11. Ю.М.Лебедев-Красин. "Радиотехника и электроника", т. I, вып. 7, 940 /1956/.
12. Б.П.Асеев. "Фазовые соотношения в радиотехнике". Связьиздат, 1959.
13. Б.Б.Штейн, Н.А.Черняк. "Однополосная модуляция с помощью фазовых схем", Связьиздат, 1959.
14. Л.Е.Клягин. "Радиотехника", 23, 9, 17 /1968/.
15. J.Kalinski. "Электроника", 43, 15, 32 /1970/.
16. М.Р.Капланов, В.А.Левин. "Автоматическая подстройка частоты". Госэнергоиздат, 1962.
17. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков. ОИЯИ, 9-5821, Дубна, 1971.
18. А.М.Балдин, Ю.Д.Безногих и др. ОИЯИ, Р9-5442, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 ноября 1972 года.

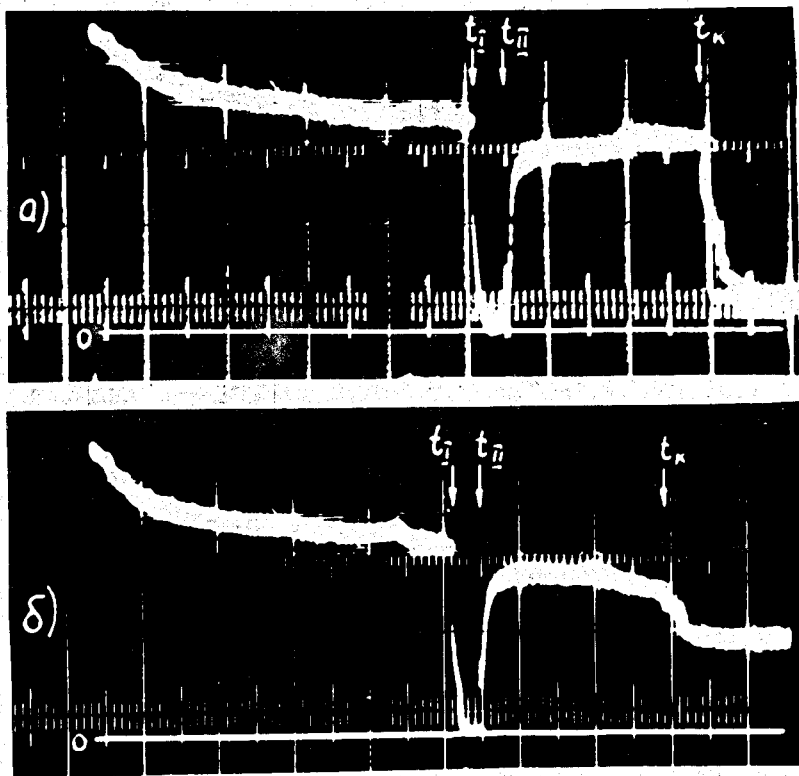


Рис. 5. Осциллограмма сигналов интенсивности при отсутствии /"а"/ и наличии /"б"/ компенсирующего фазового сдвига, пропорционального H . Моменты времени: t_1 - конец I этапа; t_2 - начало II этапа; t_k - начало переходного режима в магнитном поле. Временной масштаб - 50 мсек/кл.