

С 345е 4

К-142

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 5821

2546/1-71

5821



Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, Г.П. Пучков

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

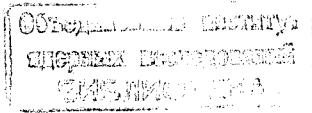
ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЧАСТОТОЙ УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ
В РЕЖИМЕ УСКОРЕНИЯ ДЕЙТОНОВ
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

1971

9 - 5821

Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, Г.П. Пучков

**ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЧАСТОТОЙ УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ
В РЕЖИМЕ УСКОРЕНИЯ ДЕЙТОНОВ
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ**



Метод ускорения дейтронов и α -частиц на синхрофазотроне был предложен в 1968 году /1,2/. В 1969 году были проведены первые эксперименты по ускорению дейтронов в синхрофазотронном режиме /3/, а в 1970 году получены первые результаты физических исследований на выведенном пучке дейтронов, ускоренных до максимальной энергии /4/.

Ускорение в синхрофазотронном режиме осуществляется в два этапа: вначале на второй кратности частоты обращения пучка, а затем, после повторного захвата частиц на "столе" магнитного поля, на первой кратности. Такой режим ускорения потребовал разработки специальной программы для управления частотой ускоряющего напряжения.

В работе рассматривается принцип построения закона управления частотой ускоряющего напряжения и приводится краткое описание аппаратуры.

1. Закон связи между частотой ускоряющего напряжения и напряженностью магнитного поля

При ускорении заряженных частиц в синхрофазотронном режиме на средней равновесной орбите постоянной длины частота ускоряющего высокочастотного напряжения " f_0 " должна изменяться пропорционально скорости частицы /5/

$$f_0(t) = \frac{q}{P_s} \cdot v_s(t), \quad (1)$$

где: $v_0(t)$ - скорость равновесной частицы; $\Pi_0 = (2\pi R_0 + L)$ - периметр равновесной орбиты; R_0 - радиус равновесной орбиты; L - суммарная длина прямолинейных промежутков; q - кратность ускорения; t - временная координата.

С другой стороны, во всех точках орбиты в каждый момент времени должно выполняться соотношение

$$E^2 = E_0^2 + [Z e H(\theta, t) R(\theta)]^2, \quad (2)$$

где: E - полная энергия частицы; E_0 - энергия покоя частицы; e - заряд протона; Z - число протонов в частице; H - напряженность магнитного поля; R - радиус кривизны орбиты; θ - азимутальная координата.

Если потребовать, чтобы в процессе ускорения радиус кривизны орбиты был постоянен ($R = R_0 = const$), то в изменении во времени величин " f_0 " и " H " должна выполняться определенная связь, а именно, частота ускоряющего напряжения " f_0 " должна "следить" за изменением магнитного поля " H " согласно определенному закону. Учитывая, что

$$v = c \cdot \beta; \quad \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E}\right)^2} \quad E_0 = A m_0 c^2,$$

где: c - скорость света; A - число нуклонов в частице; m_0 - масса покоя нуклона, из (1) и (2) легко найти необходимый закон связи между " f_0 " и " H "

$$f_0 = \frac{q \cdot c}{2\pi R_0 + L} \frac{H}{\sqrt{\left(\frac{m_0 c^2}{e R_0}\right)^2 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + H^2}}. \quad (3)$$

Если для удобства выразить частоту в Мгц, а напряженность магнитного поля в кэст, то этот закон для синхрофазотрона ОИЯИ имеет вид:

$$f_0 [\text{мгц}] = \frac{1,44 q H [\text{кэ}]}{\sqrt{1,25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + H^2 [\text{кэ}]}}, \quad (4)$$

а скорость изменения частоты, или крутизна закона

$$\frac{df_0}{dH} = \frac{1,8 q \left(\frac{A}{Z}\right)^2}{\sqrt{\left[1,25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + H^2 \left[\frac{\text{кэ}}{\text{з}}\right]\right]^3}} \left[\frac{\text{МГц}}{\text{кэ}}\right]. \quad (5)$$

По результатам вычислений на ЭВМ на рис. 1 представлены графически законы связи между f_0 и H при $q=1$ для ускорения протонов f_{0p} ($\frac{A}{Z}=1$) и дейтонов f_{0d} ($\frac{A}{Z}=2$). Дейтонный закон f_{0d} (в интервале 160 э + 1200 э изображен пунктирной линией) пригоден также для ускорения α -частиц и других полностью ионизованных атомов ("чистых" ядер) вплоть до кальция ($Z=20$), у которых $\frac{A}{Z}=2$.

Из условий ускорения дейтонов в линейном ускорителе в режиме II кратности получается, что значение магнитного поля при инжекции дейтонов такое же, как и при инжекции протонов /1/. Из формулы (4) при $q=1$ и рис. 1 следует, что начальная частота при ускорении дейтонов должна быть в 2 раза меньше, чем при ускорении протонов, а конечные значения частот отличаются на $\approx 1,5\%$. Так как задающий генератор и ускоряющая система, предназначенные для ускорения протонов, не могут обеспечить расширения частотного диапазона в ≈ 2 раза без существенной реконструкции, то ускорение дейтонов осуществляется в два этапа /1,3/, и имеющийся частотный диапазон используется дважды. На I этапе дейтоны ускоряются в режиме второй кратности частоты обращения пучка (при $q=2$ по закону f_{0dI} рис. 1), а затем осуществляется переход на II этап ускорения в режиме "стола" магнитного поля и ускорение до максимальной энергии при $q=1$ (f_{0dII}). При переходе с $q=2$ на $q=1$ должны быть уменьшены в два раза как частота ускоряющего напряжения, так и скорость ее изменения (см. рис. 1).

2. Аппаратура связи между частотой ускоряющего напряжения и напряженностью магнитного поля

Для программного управления частотой ускоряющего напряжения при ускорении протонов используется аппаратура, включающая в себя ин-

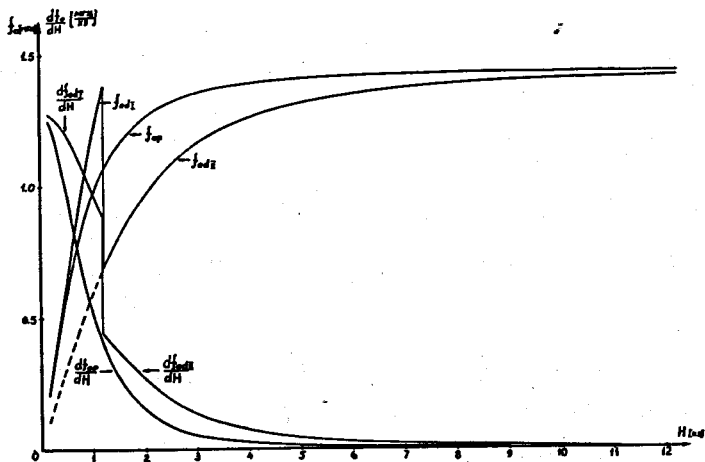


Рис. 1. Зависимость частоты и скорости ее изменения при ускорении протонов (f_{0p} , $\frac{df_{0p}}{dH}$) и дейтронов (f_{0dI} , $\frac{df_{0dI}}{dH}$ на I этапе и f_{0dII} , $\frac{df_{0dII}}{dH}$ на II этапе) в функции напряженности магнитного поля "H".

теграторный датчик магнитного поля, функциональный преобразователь и задающий генератор /6/. Эта аппаратура была изготовлена в двух комплектах: основного и резервного. Однако при достаточно высокой надежности (простой ускорителя по вине этой аппаратуры составляют, в среднем, не более 0,1% рабочего времени ускорителя) один из комплектов практически не использовался и оказался полезным для формирования дейтонного закона.

На рис. 2 представлена блок-схема аппаратуры и диаграммы сигналов в характерных точках. Индуцируемая на охватывающей рабочую область по всему азимуту ускорителя интеграторной катушке (ИК) ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного поля, поступает на вход интегратора "1", который представляет собою усилитель постоянного тока, охваченный емкостной отрицательной обратной связью. Напряжение на выходе интегратора " $U_{\text{инт.}}$ " описывается выражением

$$U_{\text{инт.}} = k_{\text{инт.}} \int_{t_0}^t \dot{H} dt = k_{\text{инт.}} (H - H_0), \quad (6)$$

где $k_{\text{инт.}}$ - коэффициент пропорциональности, определяемый параметрами катушки и интегратора и равный $\approx 15,8$ в/кэ; \dot{H} - скорость изменения магнитного поля; H_0 - значение магнитного поля в момент времени " t_0 ", с которого начинается процесс интегрирования (поле включения интегратора), равное ≈ 115 э.

Входным сигналом задающего генератора "9" является напряжение с выхода функционального преобразователя " $U_{\text{фп}}$ ". По известным параметрам - начальной частоте и крутизне задающего генератора определяется частота на его выходе

$$f_0 = f_{0 \text{ нач.}} + S U_{\text{фп}}, \quad (7)$$

где: $f_{0 \text{ нач.}}$ - начальная частота генератора, равная 150 кГц; $S = \frac{\Delta f}{\Delta U_{\text{фп}}}$ - крутизна модуляционной характеристики генератора по входному напряжению. Так как на входе задающего генератора имеется делитель, и для модуляции частоты используется лишь некоторая часть напряжения функционального преобразователя, то

$$f_0 = f_0 \text{ нач.} + k_d S_\Gamma U_{\text{фп}} \quad (8)$$

где: k_d - коэффициент передачи делителя (при формировании протонного закона $k_d \approx 0,14$); S_Γ - собственная крутизна модуляционной характеристики генератора, равная ≈ 65 кгц/в.

Выбранное значение начальной частоты генератора, равное 150 кгц, определяет поле включения интегратора (≈ 115 э) в соответствии с протонным законом связи (формула (4) при $q=1$ и $\frac{A}{Z}=1$). Так как начальная частота при ускорении дейтонов меньше в 1,5 раза начальной частоты генератора, то начальный участок дейтонного закона при $q=1$ не может быть реализован на предназначенной для ускорения протонов аппаратуре, вследствие чего он изображен на рис. 1 пунктирной линией на всем I этапе. В то же время, при $q=2$ на начальном участке он значительно отличается от протонного при $q=1$ (см. рис. 1).

По известным параметрам интеграторного датчика магнитного поля и задающего генератора ($k_{\text{инт.}}$, $f_0 \text{ нач.}$, S_Γ , k_d) и в соответствии с формулой (4) можно найти зависимость выходного напряжения функционального преобразователя от входного. Решая совместно уравнения (4), (6) и (8), получим

$$U_{\text{фп}} = \frac{1,44 q}{k_d S_\Gamma} \frac{U_{\text{инт.}}}{k_{\text{инт.}}} \frac{1}{\sqrt{1,25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + \left(H_0 + \frac{U_{\text{инт.}}}{k_{\text{инт.}}}\right)^2}} \quad (9)$$

График функции $U_{\text{фп}} = F(U_{\text{инт.}})$, рассчитанной по формуле (9) при

$\frac{A}{Z} = 2$, представлен на рис. 3. В интервале $0 < U_{\text{инт.}} < 17$ в ($115 \text{ э} < H < 1200 \text{ э}$) $q=2$, а при $U_{\text{инт.}} > 17$ в ($H > 1200 \text{ э}$) $q=1$. Из графика следует, что дейтонный закон может быть получен двумя способами:

А. Функция $U_{\text{фп}} = F(U_{\text{инт.}})$ имеет разрыв в т. "А" в момент перехода с одной кратности на другую (скачок с кривой III на кривую II) при неизменной крутизне модуляционной характеристики генератора.

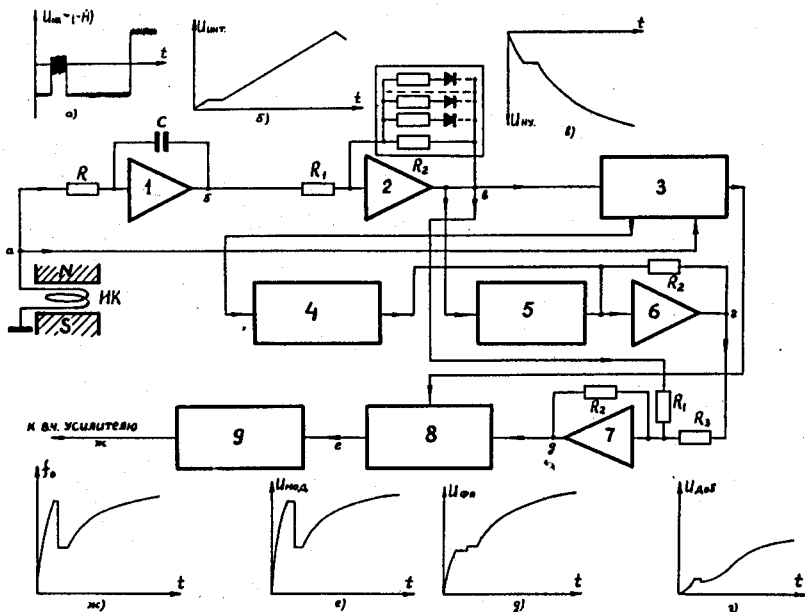


Рис. 2. Блок-схема аппаратуры программного управления частотой ускоряющего напряжения для ускорения дейтронов: 1 - интегратор; 2 - нелинейный усилитель; 3 - блок управления; 4-5 - диодные блоки; 6 - добавочный усилитель; 7 - суммирующий усилитель; 8 - коммутатор крутизны модуляционной характеристики задающего генератора; 9 - задающий генератор; ИК - интеграторная катушка.

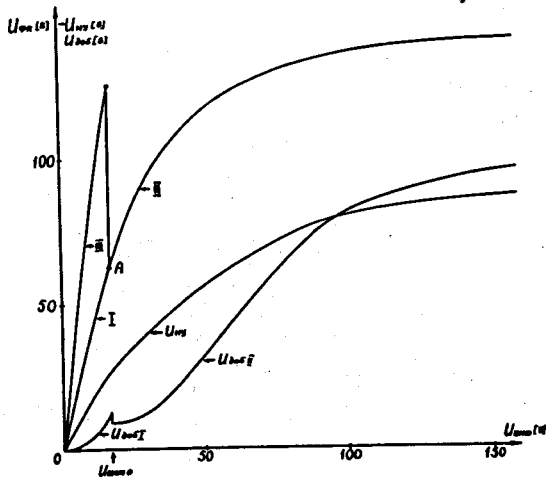


Рис. 3. Зависимость выходных напряжений элементов функционального преобразователя в функции $U_{\text{инт}}$: I - $U_{\text{фп}}$ при $q=2$ и $k_{\text{д}}=0,28$; II - $U_{\text{фп}}$ при $q=1$ и $k_{\text{д}}=0,14$; III - $U_{\text{фп}}$ при $q=2$ и $k_{\text{д}}=0,14$; $U_{\text{нл}}$ - измеренное напряжение на выходе нелинейного усилителя; $U_{\text{доб I}}$, $U_{\text{доб II}}$ - напряжение на выходе добавочного усилителя на I и II этапах ускорения.

Б. Функция $U_{\text{фп}} = F(U_{\text{инт}})$ непрерывна в т. "А", если одновременно с переходом с одной кратности на другую изменяется крутизна модуляционной характеристики генератора.

Получение разрывной функции возможно лишь при наличии двух функциональных преобразователей с переключением их выходов в момент перехода с I этапа ускорения на II. Второй способ имеет несомненное преимущество перед первым, так как изменение крутизны модуляционной характеристики генератора в данном случае можно легко получить за счет изменения коэффициента передачи делителя " $k_{\text{д}}$ " (в блоке "8" рис. 2).

Функциональный преобразователь, предназначенный для формирования функции $U_{\text{фп}} = F(U_{\text{инт}})$, состоит из нелинейного усилителя "2", диодных блоков "4" и "5", суммирующего "6" и выходного "7" усилителей.

Нелинейный усилитель представляет собой усилитель постоянного тока, охваченный отрицательной обратной связью через нелинейный двухполюсник, содержащий 32 цепочки из диодов и сопротивлений, подключаемых параллельно " R_2 " по мере открывания диодов. Величины сопротивлений в этих цепочках и уровни напряжений на выходе нелинейного усилителя, при которых открываются диоды, выбраны с таким расчетом, чтобы получить первое приближение зависимости, аппроксимированной отрезками прямых, к требуемой функции. Таким образом, выходное напряжение нелинейного усилителя является некоторой нерегулируемой функцией от входного напряжения с уменьшающейся крутизной.

С выхода нелинейного усилителя напряжение " $U_{\text{ну}}$ " поступает на диодные блоки "4" и "5", с помощью которых осуществляется точная настройка закона при ускорении. Диодные блоки содержат 36 параллельных цепочек из последовательно соединенных регулируемых сопротивлений и диодов, открываемых при заданных значениях " $U_{\text{ну}}$ ". Токи этих цепочек суммируются на входе добавочного усилителя постоянного тока с отрицательной обратной связью "6". Таким образом, напряжение на выходе добавочного усилителя является некоторой регулируемой функцией от " $U_{\text{ну}}$ " с возрастающей крутизной.

Суммирующий усилитель постоянного тока с отрицательной обратной связью "7", суммируя напряжения нелинейного (с коэффициентом передачи $\approx 2,75$) и добавочного (с коэффициентом передачи $\approx 1,8$) усилителей, имеет на выходе напряжение с уменьшающейся скоростью нарастания, аппроксимированное отрезками прямых и изменяющееся по закону, близкому к функции $U_{\text{фп}} = F(U_{\text{инт}})$, изображенной на рис. 3 кривыми I, II.

Точность аппроксимации функции $U_{\text{фп}} = F(U_{\text{инт}})$ для получения требуемого закона связи определяется количеством элементов, изменяющих крутизну этой функции (при формировании протонного закона 68 элементов нелинейного усилителя и диодных блоков обеспечивают точность аппроксимации $\approx 10^{-4}$).

Основанием при выборе количества диодов для получения соответствующей точности аппроксимации служит характер и пределы изменения первой производной функции (9)

$$\frac{dU_{\text{фп}}}{dU_{\text{инт}}} = \frac{1,44 q}{k_{\text{д}} S_{\Gamma}} \frac{1,25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + H_0 \left(H_0 + \frac{U_{\text{инт}}}{k_{\text{инт}}}\right)}{\sqrt{\left[1,25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + \left(H_0 + \frac{U_{\text{инт}}}{k_{\text{инт}}}\right)^2\right]^3}} \quad (10)$$

Вторая производная функции (9)

$$\frac{d^2U_{\text{фп}}}{dU_{\text{инт}}^2} = \frac{1,44 q}{k_{\text{д}} S_{\Gamma}} \frac{2H_0 \left[1,25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + H_0^2\right] + \left[4H_0^2 + 3,75 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + 2H_0 \frac{U_{\text{инт}}}{k_{\text{инт}}}\right] \frac{U_{\text{инт}}}{k_{\text{инт}}}}{\sqrt{\left[1,25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + \left(H_0 + \frac{U_{\text{инт}}}{k_{\text{инт}}}\right)^2\right]^5}} \quad (11)$$

дает представление о расстановке элементов для формирования функции (9).

Из сравнения соответствующих кривых, рассчитанных по формулам (10) и (11) и представленных графиками рис. 4, следует, что при одинаковой точности аппроксимации для формирования дейтонного закона требуется приблизительно в 2 раза меньше диодов, чем при формировании протонного закона, и расставлены они могут быть существенно реже. Из кривой "4" следует также, что наибольшее количество диодов должно располагаться на участках в конце I и начале II этапов.

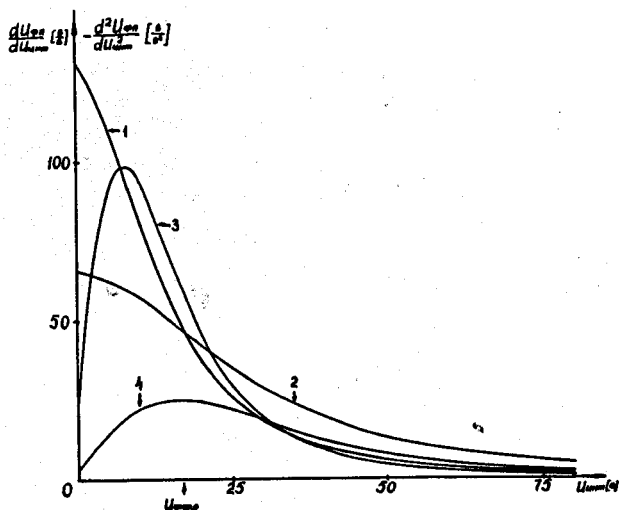


Рис. 4. Производные функции выходного напряжения функционального преобразователя $\frac{dU_{\text{ФП}}}{dU_{\text{ИНТ}}}$ (1,2) и $\frac{d^2U_{\text{ФП}}}{dU_{\text{ИНТ}}^2}$ (3,4) при формировании протонного (1,3) и дейтонного (2,4) законов связи.

Следует заметить, что при расчете по формулам (9), (10) и (11) " S_{Γ} " считалось постоянной, хотя, в действительности, она возрастает на $\approx 20\%$ при изменении частоты от ≈ 1 мгц к концу частотного диапазона. Так как этот интервал частот проходится дважды в конце I и на II этапах, то на этих участках диоды расставлены чаще. Иллюстрацией может служить измеренная зависимость $U_{\text{ну}} = \Phi(U_{\text{инт}})$, представленная на рис. 3, крутизна которой резко изменяется в конце I - начале II этапов ($U_{\text{инт}} = 10+20$ в) и при $U_{\text{инт}} = (80+100)$ в. В формировании зависимости $U_{\text{ну}} = \Phi(U_{\text{инт}})$ использованы 24 цепочки с диодами.

Способность функционального преобразователя формировать функцию лишь с уменьшающейся крутизной накладывает определенные условия на выбор крутизны модуляционной характеристики генератора на начальных участках I и II этапов. Из условия уменьшения частоты в 2 раза при переходе с I этапа ускорения на II и на основании формулы (8) можно найти, что

$$\frac{k_{\text{дI}}}{k_{\text{дII}}} = \frac{2f_{\text{оII}} - f_{\text{онач}}}{f_{\text{оII}} - f_{\text{онач}}}, \quad (12)$$

где: $k_{\text{дI}}$, $k_{\text{дII}}$ - коэффициенты передачи входного делителя генератора соответственно на I и II этапах; $f_{\text{оII}}$ - начальная частота II этапа. Таким образом, при $f_{\text{оII}} = 700$ кгц коэффициент передачи делителя должен уменьшаться в $\approx 2,3$ раза при переходе с I этапа ускорения на II .

Для получения независимой настройки дейтонного закона на I и II этапах в блоке "8" имеются два делителя входного напряжения с коэффициентами передачи, отличающимися в $\approx 2,3$ раза, каждый из которых может регулироваться в пределах $\pm 2\%$. 36 диодов в диодных блоках разбиты на две группы. В первой группе (блок "4") 16 диодов используются для настройки закона на I этапе. Во второй группе (блок "5") использованы 20 диодов для настройки закона на II этапе. По окончании I этапа вход диодного блока "4" переключается с выхода нелинейного усилителя к регулируемому опорному источнику напряжения, имеющемуся в блоке "3". Этим самым достигается независимость II этапа ускорения от диодов первой группы, а регулировкой опорного напряжения достигается точная настройка начальной частоты II этапа. На рис. 3 показана измеренная зависимость $U_{\text{доб}} = \Phi(U_{\text{инт}})$ на $I(U_{\text{доб I}})$ и II

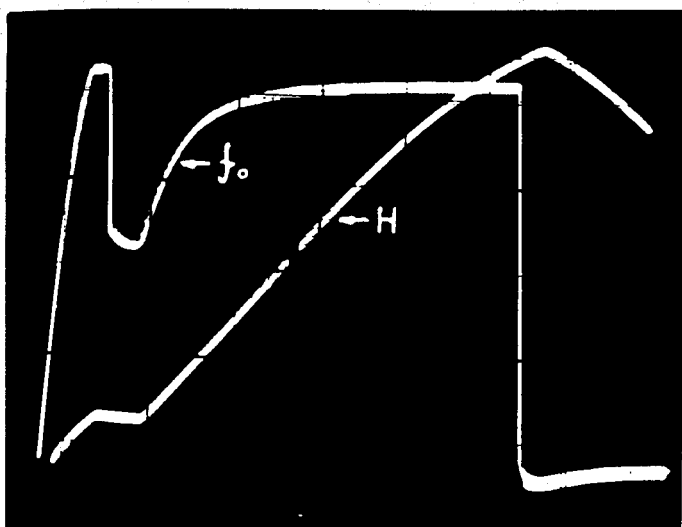


Рис. 5. Осциллограмма сигнала с интегратора, пропорционального напряженности магнитного поля " H ", и сигнала с частотного детектора, пропорционального частоте ускоряющего напряжения " f_0 ".

($U_{\text{доб II}}$) этапах. Скачок в напряжении обязан переключению входа блока "4" с выхода нелинейного усилителя на опорный источник. Блок управления "3", кроме того, синхронизирует с магнитным полем работу блока "8", управляет ускоряющей системой, выключая ускоряющее напряжение на время перехода с I этапа ускорения на II, синхронизирует работу программатора амплитуды ускоряющего напряжения.

В качестве иллюстрации на рис. 5 представлена осциллограмма, на которой показан характер изменения магнитного поля "H" (сигнал с интеграторного датчика поля) и частоты ускоряющего напряжения " f_0 " (сигнал с частотного детектора). Переход с I этапа ускорения на II происходит на "столе" магнитного поля.

Рассмотренный комплекс аппаратуры позволил получить необходимую программу управления частотой ускоряющего напряжения и обеспечить ускорение дейтонов до максимальной энергии.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность В.А. Штырляеву за участие в настройке дейтонного закона связи.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев, Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, В.И. Мороз, Н.И. Павлов. Препринт ОИЯИ Р9-4214, Дубна (1968).
2. Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев, Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, В.И. Мороз, Н.И. Павлов. ПТЭ, 4, 202 (1968).
3. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, Г.П. Пучков. Препринт ОИЯИ Р9-5311, Дубна (1970).
4. А.М. Балдин, Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев, И.Б. Иссинский, Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, В.И. Мороз, Н.И. Павлов, Г.П. Пучков. Препринт ОИЯИ Р9-5442, Дубна, 1970.
5. А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев. "Теория циклических ускорителей". Гос. из-во физ.-мат. литературы, Москва (1962).
6. А.Л. Минц, С.М. Рубчинский, С.М. Вейсбейн, Ф.А. Водопьянов, А.А. Кузьмин, В.А. Уваров. Радиотехника и электроника, 1, вып. 7, 928 (1956).

Рукопись поступила в издательский отдел

20 мая 1971 года.