

С 345 е 2

- К-142

27/11-65

✓

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1947



Г.С. Казанский, Г.П. Пучков

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ  
ВОЗМУЩЕНИЯ РАВНОВЕСНОЙ ФАЗЫ  
СГУСТКА УСКОРЯЕМЫХ ЧАСТИЦ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАРМОНИК ПУЛЬСАЦИЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

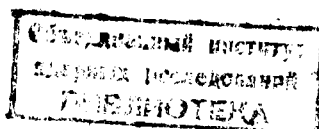
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1965

1947

Г.С. Казанский, Г.П.Пучков

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ  
ВОЗМУЩЕНИЯ РАВНОВЕСНОЙ ФАЗЫ  
СГУСТКА УСКОРЯЕМЫХ ЧАСТИЦ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАРМОНИК ПУЛЬСАЦИЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ



### 1. Способ компенсации возмущения равновесной фазы $\phi_0$

#### под действием гармоник пульсаций магнитного поля

Как известно <sup>/1/</sup>, магнитное поле синхрофазотрона, действующее на пучок ускоряемых частиц, описывается выражением

$$H(t) = H_0(t) + \sum_{i=1}^{\infty} h_i \sin(j \Omega t + \Psi_i), \quad (1)$$

где  $H_0(t)$  - медленная функция, описывающая изменение магнитного поля синхрофазотрона в течение цикла ускорения;

$h_i$  - амплитуда  $i$ -той гармоники пульсации магнитного поля;

$\Psi_i$  - фаза пульсации;

$\Omega$  - частота пульсации ( $2\pi \cdot 600 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$ ).

Как показывают измерения, магнитное поле  $H_0(t)$  изменяется со скоростью, близкой к расчетной ( $\dot{H} = 4000$  эрстед/сек), и только в начале ускорительного цикла за счет переходного процесса и в конце цикла за счет насыщения железа имеет отличие от номинальной величины на  $\sim 10\%$ . Исследование переменной составляющей магнитного поля показало, что производная магнитного поля  $\dot{H}$  содержит гармоники пульсаций, уровень которых изменяется в течение цикла ускорения.

Основная гармоника пульсаций  $\Omega_1 = 600$  гц составляет  $\sim 6\%$  в начале ускорения и достигает  $14\%$  в конце ускорительного цикла <sup>/2/</sup>. Исследование начального участка ускорения показывает, что потери частиц с частотой 600 гц во время формирования пучка ( $1\%$  от общего уровня интенсивности ускоряемых частиц) вызваны эффектом возмущения равновесной фазы  $\phi_0$  за счет гармоник пульсаций магнитного поля <sup>/3/</sup>. Особенно опасны эти возмущения в резонансных случаях. Как известно <sup>/1/</sup>, частота радиально-фазовых колебаний на нашем ускорителе изменяется в течение цикла ускорения от 2000 гц до 600 гц.

В этом же диапазоне частот лежат частоты гармоник пульсаций магнитного поля (600 гц, 1200 гц, 1800 гц). Исследование резонансов радиально-фазовых колебаний с гармониками магнитного поля <sup>/2,3/</sup> показало, что пучок ускоренных частиц в результате резонансного возмущения синхротронных колебаний претерпевает значительные

структурные изменения, сопровождающиеся в ряде случаев потерями частиц в процессе ускорения. Так, например, при прохождении резонанса 1200 гц в середине цикла пучок частиц изменяет свой геометрический размер на ~ 30%, что в ряде случаев приводит к выходу из синхронизма (~ 10-15%) ускоряемых частиц<sup>х)</sup>. Потери частиц в данном случае возникают потому, что размер пучка ускоренных частиц становится соизмеримым с размерами области фазовой устойчивости и колебания равновесной фазы  $\phi_a$  за счет гармоник пульсаций магнитного поля приведут к выходу из синхронизма граничных частиц.

Аналогичный эффект может возникнуть, если значительно снизить амплитуду ускоряющего напряжения  $V_1$ <sup>хх)</sup>. Заметим еще одно обстоятельство. При быстрой манипуляции с пучком ускоренных частиц в момент вывода на мишень (за время, соизмеримое с периодом фазовых колебаний) основная масса частиц оказывается "прижатой" к границе области фазовой устойчивости, где за счет колебаний равновесной фазы  $\phi_a$  под действием гармоник пульсаций магнитного поля будут возникать потери частиц, создающих нежелательный фон при быстром выводе пучка частиц на мишень<sup>4/</sup>.

На рис. 1 представлены осциллограммы, которые характеризуют действие гармоник пульсаций производной магнитного поля при малых размерах области устойчивости. При эксперименте уменьшение области фазовой устойчивости достигалось за счет снижения амплитуды ускоряющего напряжения с 35 кв до 20 кв. Нетрудно видеть, что сигнал интенсивности (рис. 1,а), регистрируемый индукционными электрдами<sup>5/</sup>, имеет монотонный спад к концу цикла ускорения, в течение которого на мишень идут резонансные потери частиц (рис. 1,в, нижний луч).

В ОИЯИ предложен способ, позволяющий компенсировать возмущение равновесной фазы  $\phi_a$  действием гармоник пульсаций магнитного поля. Способ заключается в создании противофазного возмущения  $\phi_s$  в пучке ускоренных частиц.

Как известно<sup>1/</sup>, резонансное возмущение описанного типа характеризуется появлением в правой части фазового уравнения осциллирующего члена, связанного с производной магнитного поля  $\dot{H}$ . Если при этом осуществляется слежение частоты ускоряющего напряжения за изменением магнитного поля, то осциллирующий член можно записать как

х) Это обстоятельство особенно важно учитывать при манипуляции  $V_0$  в момент вывода пучка частиц на мишень<sup>4/</sup>.

хх) В этом случае существует опасность возникновения сильного резонанса с гармоникой 600 гц в конце цикла ускорения.

$$M_1 = \frac{2 e R_0^2 \Pi_0}{c} (1-\Lambda) \frac{d \Delta H}{dt} \quad (2)$$

$$\text{где } \frac{d \Delta H}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} h_i \Omega \cos(j \Omega t + \Psi_i)$$

и  $R_0$  - равновесный радиус,  $\Pi_0$  - периметр равновесной орбиты. Известно, что возмущение аналогичного типа может быть вызвано соответствующим изменением в амплитуде ускоряющего напряжения:

$$M_2 = \frac{e V_0 \cos \phi_a}{2 \pi} \sum_{i=1}^{\infty} b_i \cos(j \Omega t + \Psi_i) \quad (3)$$

а так как<sup>1/</sup>

$$e V_0 \cos \phi_a = \frac{(2 \pi R_0 + L) e R_0 \dot{H}_0}{c} (1-\Lambda) \quad (4)$$

то можно осуществить взаимокompенсацию одностипных возмущений. Так, если  $\tilde{H} = H_0(1 + \epsilon_H)$  а изменения амплитуды ускоряющего напряжения есть  $\tilde{V}_0 = V_0(1 + \epsilon_V)$  (где  $\epsilon_H$  и  $\epsilon_V$  - переменные составляющие соответственно  $\dot{H}$  и  $V_0$ ), то нетрудно показать, что при компенсации в резонансном случае будет осуществлена связь:

$$\epsilon_V = \text{ctg } \phi_a \epsilon_H \quad (5)$$

Выражение (5) и было положено в основу разработки системы компенсации возмущения равновесной фазы  $\phi_a$  под действием гармоник пульсаций магнитного поля.

Остановимся еще на одном вопросе. При работе в режиме компенсации равновесной фазы  $\phi_a$  важно учитывать изменения равновесного радиуса. Если  $R_0 \neq 0$ , то в этом случае в выражении (4) появляется дополнительный член и уравнение принимает вид:

$$e V_0 \cos \phi_a = \frac{(2 \pi R_0 + L) e R_0 \dot{H}_0}{c} (1-\Lambda) + (1-\pi) \beta^2 E T \frac{R_0}{R_0} \quad (6)$$

где  $\pi = -\frac{\partial \ln H}{\partial \ln r}$ ;  $E$  - энергия в электроновольтах;  $T$  - период обращения,  $R_0$  - равновесный радиус.

Выражение (6) показывает, что необходимо учитывать дополнительную коррекцию положения  $\phi_a$  при осуществлении режимов, где имеют место манипуляции с пучком ускоренных частиц в моменты вывода на мишень (при частотном управлении пучком частиц<sup>4/</sup>  $\dot{R}_0 \neq 0$ ).

## 2. Аппаратура для компенсации возмущений равновесной фазы

### в цикле ускорения

Аппаратура для компенсации равновесной фазы  $\phi_a$  в цикле ускорения представляет собой единый встроенный блок, размещенный в технологическом оборудовании системы высокочастотного питания синхрофазотрона. Блок содержит два канала обработки

информации, необходимой для компенсации резонансной раскачки синхротронных колебаний в пучке ускоренных частиц под действием гармоник пульсаций производной магнитного поля.

Первый канал, включающий в себя масштабный усилитель и инверторный усилитель, предназначен для обработки информации, носящей адиабатический характер (медленные изменения производной магнитного поля и радиальные смещения пучка частиц при манипуляции).

Второй канал предназначен для выделения переменной составляющей скорости изменения магнитного поля ( $\epsilon_{\dot{H}}$ ). Суммирующий усилитель выдает обобщенную информацию, которая в виде напряжения  $\epsilon_{v_0}$  подается в тракт манипуляции опорных выпрямителей широкополосных усилителей.

На рис. 2 представлена принципиальная схема блока стабилизации равновесной фазы  $\phi$ . Канал обработки информации о радиальном смещении пучка ускоряемых частиц представлен двумя усилителями. 1 усилитель ( $L_1-L_3$ ) - усилитель постоянного тока (УПТ) с обратной связью. Коэффициент усиления  $K = -10$ . На вход этого усилителя с помощью переключателя  $\Pi_1$  может быть подан сигнал или с датчика радиального положения или со схемы компенсации (медленные изменения  $\dot{H}$ ). Второй усилитель ( $L_4-L_6$ ) представляет из себя инвертор с  $K = -1$ , дающий возможность с помощью переключателя  $\Pi_2$  получить двухполярный сигнал на выходе первого канала. Второй канал содержит схему раздельного выделения гармоник магнитного поля с частотами  $\Omega_1 = 600$  гц,  $\Omega_2 = 1200$  гц,  $\Omega_3 = 1800$  гц.

Каждая гармоника выделяется соответствующим фильтром и подается на фазовращатель для коррекции фаз. На выходе фазовращателей гармоники суммируются и усиливаются предварительным усилителем. Сигналы с выхода каналов 1 и 2 подаются соответственно на вход 1 и вход 2 суммирующего усилителя, с выхода которого обработанный сигнал подается в тракт манипуляции опорных выпрямителей широкополосных усилителей.

На рис. 1,б и 1,в (верхний луч) представлены осциллограммы, иллюстрирующие работу схемы компенсации. Как видно из осциллограмм, резонансные потери частиц практически исчезают, хотя амплитуда ускоряющего напряжения, как и в первом эксперименте, поддерживалась на уровне 20 кВ.

Приведем еще одно важное обстоятельство, указывающее на необходимость применения описанной схемы компенсации.

Одним из главных параметров пучка частиц в конце ускорения является его энергетический размер, который зависит от эффективности затухания амплитуды радиально-фазовых колебаний по мере роста энергии в процессе ускорительного цикла. Отсюда

ясно, насколько важно принятие мер по ликвидации дополнительных возмущений пучка ускоряемых частиц в цикле ускорения. В реальном случае пучок испытывает возмущения в точках цикла, где частота фазовых колебаний совпадает с частотой гармоник пульсаций магнитного поля. В рабочем диапазоне изменения энергий на синхрофазотроне имеют место резонансы частот радиально-фазовых колебаний с гармониками пульсаций магнитного поля 1800 гц в начале цикла, 1200 гц - в середине (1,51 сек) и 600 гц - в конце. При помощи соответствующей манипуляции амплитуды ускоряющего напряжения удается обойти резонансы и значительно улучшить характеристики пучка частиц, выводимого на мишень в конце цикла ускорения.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований по улучшению характеристик пучка ускоренных частиц. Как видно из графиков, оптимальный режим получается при обходе резонансов в режиме компенсации возмущения равновесной фазы. Особенно важен такой режим при ускорении с малыми амплитудами ускоряющего напряжения.

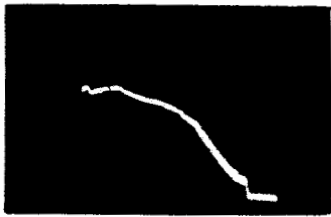
#### З а к л ю ч е н и е

Применение способа компенсации возмущения равновесной фазы под действием гармоник пульсаций производной магнитного поля дало возможность улучшить структуру пучка в конце ускорения и управляемых режимах. Внедрение описанной схемы подготовило переход к ускорению на одном электроде, так как оказалось возможным осуществлять нормальное ускорение при пониженном значении амплитуды ускоряющего напряжения (в 2 раза) и исключило влияние быстрых осцилляций в магнитном поле на пучок ускоренных частиц.

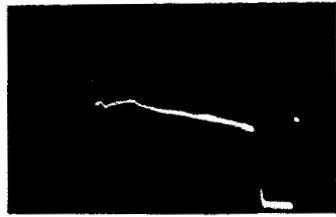
#### Л и т е р а т у р а

1. М.С.Рабинович. Труды ФИАН, 3, 23, 1958.
2. Г.С.Казанский, В.Н.Перфеев, К.В.Чехлов. Препринт ОИЯИ, Р-652, Дубна, 1961.
3. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, Г.П.Пучков, А.П.Царенков. Препринт ОИЯИ, 1177, Дубна, 1963.
4. Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, А.П.Царенков. Препринт ОИЯИ, Б-50-819, Дубна, 1961.
5. Г.С.Казанский, А.Б.Кузнецов, А.И.Михайлов, Н.Б.Рубин, А.П.Царенков. Препринт ОИЯИ, Р-670, Дубна, 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 января 1965 г.



а)



б)



в)

Рис. 1. Эффект действия схемы компенсации возмущения равновесной фазы  $\phi_0$  за счет гармоник пульсаций магнитного поля при малых значениях амплитуды ускоряющего напряжения  $V_1 = 20$  кв в течение всего цикла ускорения. Осциллограммы а и б - сигналы интенсивности, в - сигнал потерь с мишени; а) без работы схемы компенсации, б) схема компенсации действует, в) нижний луч - потери частиц без компенсации, верхний луч - эффект компенсации.

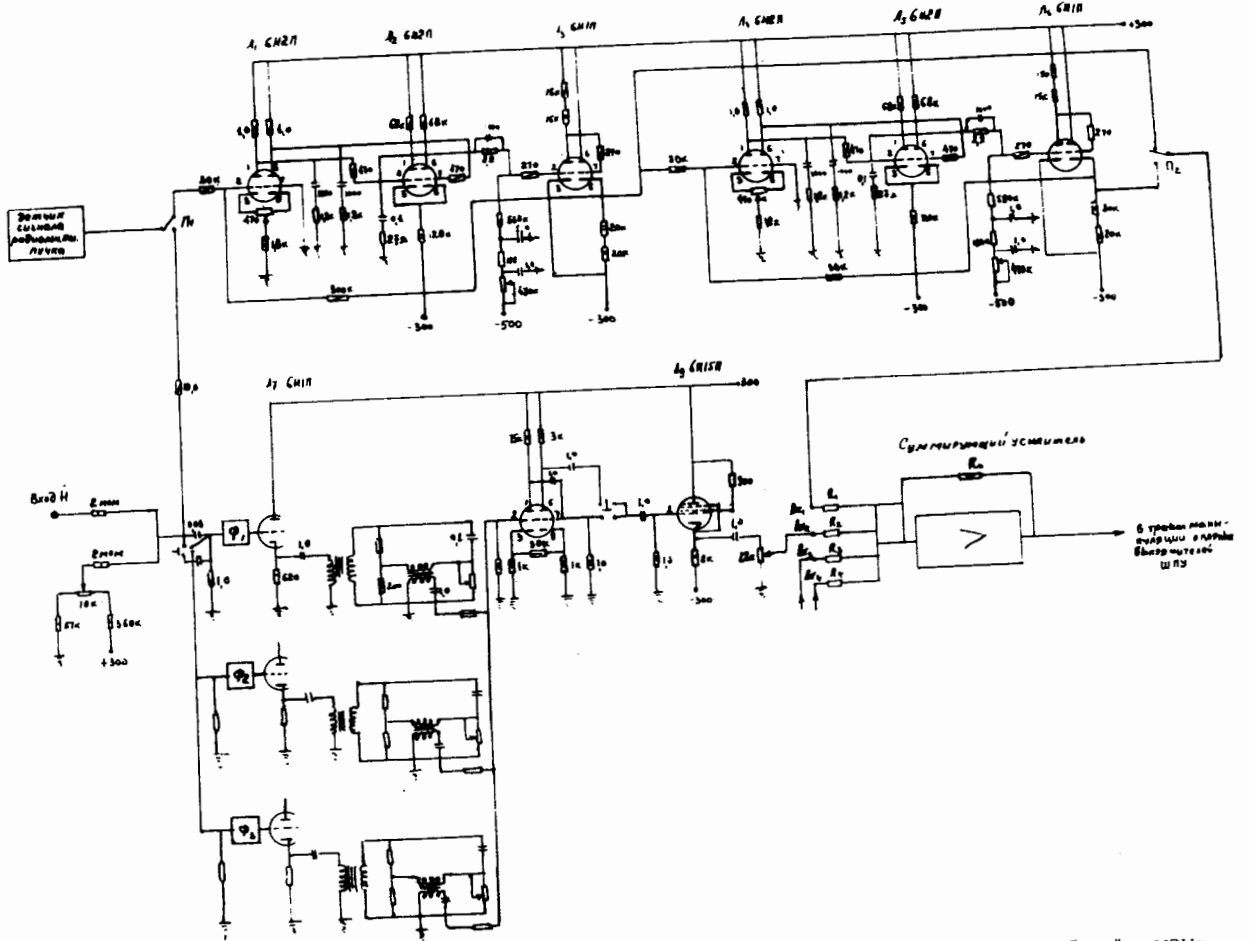


Рис. 2. Принципиальная схема аппаратуры для компенсации возмущения синхронных колебаний, вызываемого действием гармоник магнитного поля на синхрофазотроне.

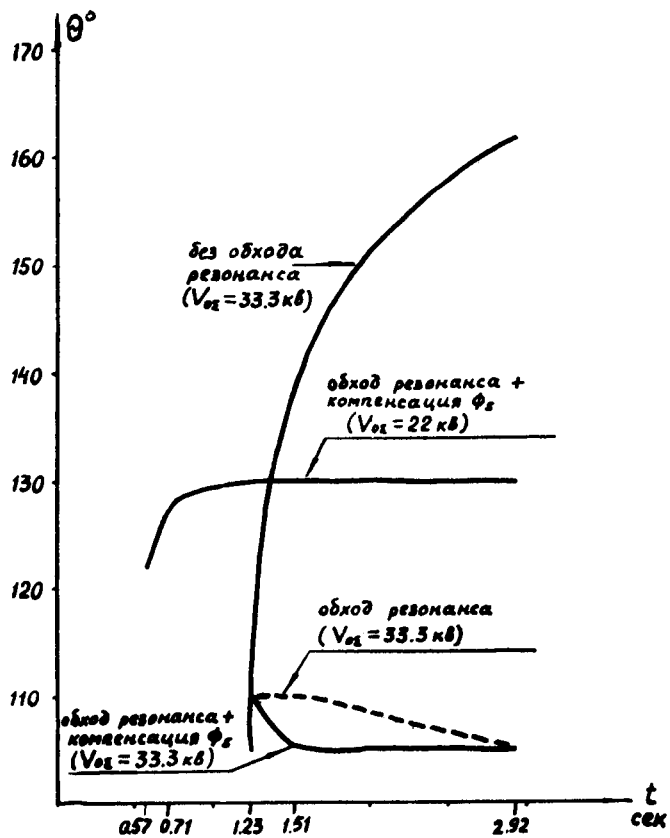


Рис. 3. Результаты обработки данных по измерению характеристик пучка частиц в конце цикла ускорения (изменение азимутального размера пучка  $\Theta^\circ$  при прохождении резонанса 1200 гц (1,51 сек)). По оси абсцисс отложено время ускорения.