

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СИНХРОБЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА В ЕРЕВАНСКОМ СИНХРОТРОНЕ ПРИ УСКОРЕНИИ ЧАСТИЦ ДО ЭНЕРГИИ $2 \div 3$ Гэв

Б. Б. АЙРАПЕТЯН, А. И. БАРЫШЕВ, В. Ц. НИКОГОСЯН, А. Р. ТУМАНЯН

Описаны результаты исследования когерентных фазовых колебаний пучка в электронном синхротроне и влияния «пассивных» резонаторов на параметры этих колебаний. Приведены выработанные рекомендации, обеспечивающие устранение потерь частиц по циклу ускорения, и результаты экспериментальной проверки некоторых теоретических положений. Экспериментально подтверждено, что при наличии когерентных фазовых колебаний пучка в бетатронных колебаниях появляются составляющие с комбинационными частотами. Показано, что измеряя эти составляющие бетатронных колебаний, можно определить частоту когерентных фазовых колебаний пучка.

В Ереванском электронном синхротроне [1], предназначенном для ускорения частиц до энергии 6 Гэв, при ускорении электронов до энергии $2 \div 3$ Гэв с сохранением длительности циклов ускорения появляются потери частиц в течение цикла и значительно ухудшается временная равномерность интенсивности выводимого пучка. Возникновение таких явлений обусловлено существенным увеличением амплитуды когерентных фазовых (синхротронных) колебаний пучка вследствие относительного увеличения времени ускорения.

В настоящей работе приводятся результаты исследований влияния расстройки резонаторов на параметры когерентных фазовых колебаний пучка и выработанные рекомендации, обеспечивающие ослабление нежелательных явлений, а также результаты экспериментальной проверки некоторых теоретических положений.

Для малых фазовых колебаний

$$\Phi = \Phi_m \exp \{ \Omega_0 \lambda t \} \ll 1$$

затухание и частота определяются следующим уравнением [2]:

$$\lambda^4 + 2p\lambda^3 + (1 + p^2 + m^2)\lambda^2 + 2p\lambda + p^2 + m^2 + \gamma = 0. \quad (1)$$

Здесь $\lambda = \Omega / \Omega_0$, Ω_0 — частота „невозмущенных“ фазовых колебаний (при отсутствии их связи с колебаниями поля в резонаторе, т. е. при $\gamma = 0$), Ω — частота „возмущенных“ колебаний, $p = \alpha / \Omega_0$, α — декремент затухания резонатора, $m = \Delta\omega / \Omega_0$, $\Delta\omega$ — абсолютная расстройка резонаторов, $\gamma = pm V_H / V_{ps} \sin \Phi_s$, V_{ps} — суммарное ускоряющее напряжение, Φ_s — равновесная фаза, V_H — суммарное напряжение, наводимое пучком на настроенных резонаторах. В этом уравнении не учитывается затухание фазовых колебаний, связанное с ростом энергии частиц и с потерями на излучение.

Для Ереванского синхротрона при токах ускоряемого пучка порядка нескольких ма в середине и в конце цикла ускорения выполняется неравенство $\gamma \ll 1$. Уравнение (1) при $\gamma = 0$ имеет четыре корня

$$\lambda_{1,2}^0 = \pm i, \quad \lambda_{3,4}^0 = -p \pm im,$$

которые можно использовать в качестве нулевого приближения для вычисления более точных значений. Принимая во внимание, что $\gamma \ll 1$, в следующем приближении получаем корни

$$\lambda_{1,2}^1 = \frac{1}{2} p\gamma \pm i \left(1 - \frac{1}{2} \gamma\right),$$

$$\lambda_{3,4}^1 = -p(1 + \gamma) \pm i \left[\sqrt{m^2 + \gamma} - \frac{1}{2} \gamma \frac{(p^2 - m^2)}{\sqrt{m^2 + \gamma}} \right]. \quad (2)$$

Из анализа этих корней следует, что при $\Delta\omega < 0$ появляется декремент фазовых колебаний, т. е. уменьшение их амплитуды по сравнению со случаем $\Delta\omega = 0$. Амплитуда фазовых колебаний должна увеличиваться при расстройке ускоряющего резонатора $\Delta\omega > 0$ вследствие появившегося инкремента. При этом частота фазовых колебаний уменьшается, что видно из мнимой части корней $\lambda_{1,2}^1$. Вторая пара корней имеет очень сильное затухание, что приводит к исчезновению этих колебаний вскоре после инъекции пучка.

Кроме того, известно, что частоты бетатронных колебаний пучка зависят от энергии частиц и при ее колебаниях меняются с частотой фазовых колебаний [3]

$$\nu = \nu_0 + \Delta\nu_m \cos(\Omega t + \varphi).$$

Таким образом, бетатронные колебания оказываются частотно-модулированными частотой синхротронных колебаний. Частотно-модулированная функция, описывающая, например, вертикальные колебания в какой-либо точке орбиты, определяется выражением

$$z = A \cos \left[\left[\nu_0 + \Delta\nu_m \cos(\Omega t + \varphi) \right] \omega_0 M t \right].$$

Если такую функцию разложить в ряд Фурье, то будет видно, что в бетатронных колебаниях появляются когерентные члены с комбинационными частотами

$$\nu = \nu_0 + \frac{m\Omega}{\omega_0 M}, \quad (3)$$

амплитуды которых уменьшаются при увеличении m . Здесь ν — число бетатронных колебаний на периоде магнитной структуры, ν_0 — основное число колебаний, определяемое магнитной системой ускорителя, M — число периодов магнитной структуры, ω_0 — частота обращения частиц, m — любое целое положительное или отрицательное число.

В этом случае для измерения основной и комбинационных частот бетатронных колебаний необходимо использовать резонансный метод измерения [4], что одновременно позволяет определить также частоту когерентных синхротронных колебаний пучка.

Измерить частоту фазовых колебаний пучка можно также с помощью одного из ускоряющих резонаторов, отключенного от генератора. Как известно, при наличии когерентных синхротронных колебаний пучка напря-

жение, наводимое в таком «пассивном» резонаторе, оказывается модулированным как по фазе, так и по амплитуде, если резонатор не настроен. Для случая малых фазовых колебаний амплитуду наведенного напряжения можно определить согласно выражению

$$V_H(t) = \frac{2J_n \mu R_{ш}}{\sqrt{1+\xi^2}} \left[1 + \frac{m_1 \Phi_m}{1-m_1^2} \cos \Omega t \right], \quad 0 < |m_1| < 1. \quad (4)$$

Здесь J_n — ток пучка, $R_{ш}$ — шунтирующее сопротивление «пассивного» резонатора, μ — фактор времени пролета, $\xi_1 = \Delta\omega_1/\alpha$, $m_1 = \Delta\omega_1/\Omega_0$ — расстройка пассивного резонатора, Φ_m и Ω — амплитуда и частота фазовых колебаний. Из этой формулы видно, что увеличение, например, Φ_m приводит к увеличению амплитуды переменной части наведенного напряжения. Однако измерить Φ_m затруднительно, так как нужно знать J_n и m_1 . Вместе с тем, измерение Ω не представляет трудностей, так как ни ток пучка, ни расстройка «пассивного» резонатора на частоту фазовых колебаний не влияют.

По измерениям частоты когерентных синхротронных колебаний пучка Ω , примерно равной Ω_0 , можно определить значение равновесной фазы Φ_s и амплитуду V_{ps} суммарного ускоряющего напряжения, действующего на частицу за время одного оборота. С этой целью рассмотрим известную формулу для частоты Ω_0 при малых фазовых колебаниях пучка

$$\Omega_0^2 = e\mu B \frac{V_{ps}(t) \sin \Phi_s(t)}{E_s(t)}, \quad (5)$$

где $B = 2\pi q\alpha_M/T_s^2 = \text{const}$, q — кратность радиочастоты, α_M — коэффициент расширения орбиты, T_s — период обращения равновесной частицы, E_s — энергия равновесной частицы. С помощью соотношения

$$\Delta E(t) = e\mu V_{ps}(t) \cos \Phi_s(t), \quad (6)$$

где ΔE — прирост энергии частицы на одном обороте, определяемый ростом напряженности магнитного поля во времени, выражение (5) можно переписать в виде

$$\text{tg} \Phi_s(t) = \frac{\Omega_0^2(t)}{B} F(t). \quad (7)$$

Функцию $F(t) = E_s(t)/\Delta E(t)$ легко рассчитать для любого момента цикла ускорения по известному закону изменения магнитного поля во времени.

Измерения частот как бетатронных, так и синхротронных колебаний пучка проводились при работе синхротрона в режиме ускорения частиц до энергии 2,55 Гэв. Ускорение осуществлялось одним генератором, т. е. половиной ускоряющих резонаторов. Второй генератор был отключен и, следовательно, другая половина резонаторов была «пассивной». Один из этих резонаторов использовался в качестве измерительного. С этой целью напряженке, наводимое в нем пучком, подавалось на амплитудный детектор, сигнал с которого просматривался на осциллографе.

Остальные «пассивные» резонаторы настраивались либо в резонанс с пучком (по максимальной амплитуде наведенного в них напряжения), либо расстраивались в ту или другую сторону. Знак расстройки определялся по погружению в резонатор подстроечного плунжера. Абсолютная величина расстройки не измерялась. Максимальная интенсивность пучка при измерениях составляла $5 \div 10$ ма. Одновременно с изменением расстройки резонаторов резонансным методом измерялась частота горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний.

На рис. 1 приведена осциллограмма двух циклов ускорения, где видно увеличение амплитуды когерентных синхротронных колебаний пучка в середине цикла, а также некоторое уменьшение интенсивности частиц, выз-

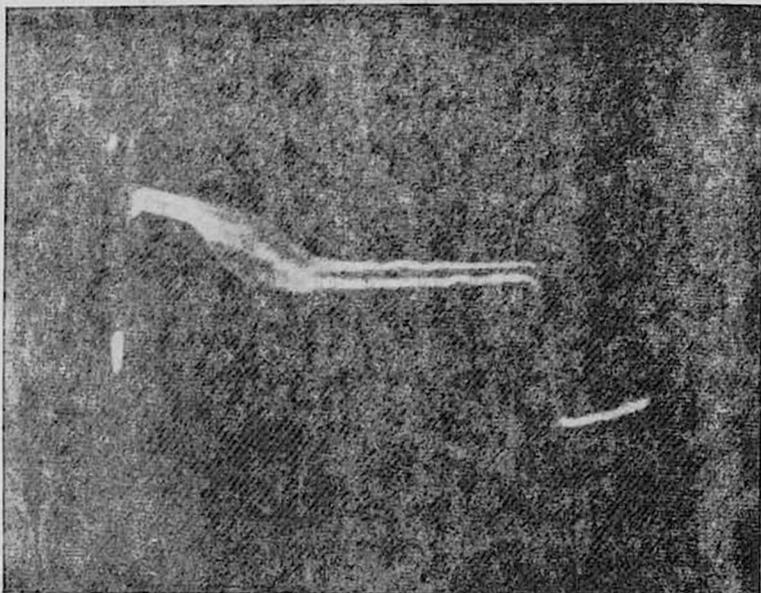


Рис. 1.

ванное этим увеличением. При большей скорости развертки осциллографа легко определить частоту фазовых колебаний по осциллограмме. На рис. 2 (кривая 1) представлены результаты измерения частоты синхротронных колебаний ($f_{с.к.}$) по циклу ускорения (t) с помощью «пассивного» резонатора.

Результаты измерений частот радиальных бетатронных колебаний также представлены на рис. 2, где кривая 2—изменение Mv_0 по циклу ускорения (основная частота бетатронных колебаний), кривые 3—7—изменение комбинационных бетатронных частот, пунктирные кривые 1', 3', 4', 5'—те же зависимости, но при увеличенном значении суммарного ускоряющего напряжения в резонаторах. Разница значений частот между кривой 2 и кривыми 3, 4 с достаточной точностью повторяет значения частоты кривой 1, а соответствующая разница между кривыми 2 и 3', 4' повторяет значения частоты кривой 1'.

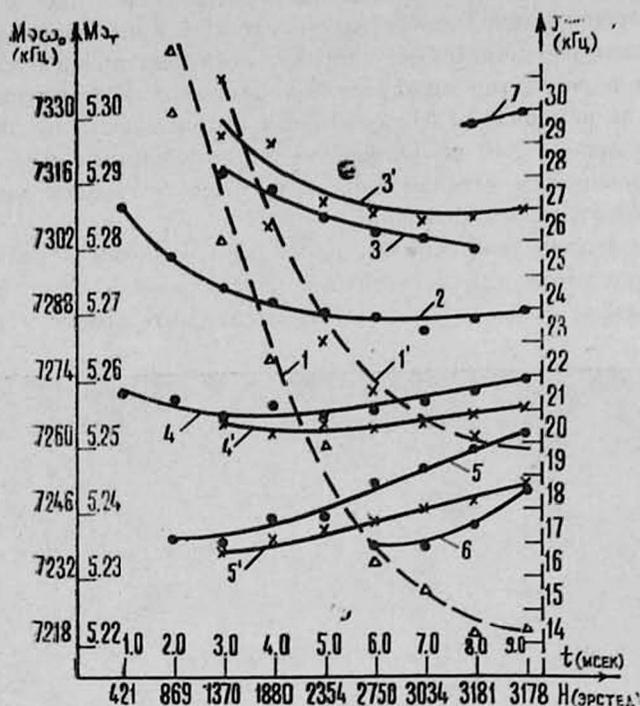


Рис. 2.

На рис. 3 приведены результаты измерений частот вертикальных бетатронных колебаний, где кривая 2 — изменение основной частоты вертикальных колебаний Mv_0^z по циклу ускорения, кривые 3—5 — изменение комбинационных частот по циклу. На том же рисунке кривая 1 — изменение частот синхротронных колебаний по циклу при расстроенных «пассивных» резонаторах в сторону увеличения амплитуды этих колебаний, кривая 1' — изменение той же частоты при настроенных по максимуму сигнала интенсивности пучка «пассивных» резонаторах. Эти кривые подтверждают, что при расстройке резонаторов в сторону увеличения амплитуды синхротронных колебаний частота этих колебаний уменьшается.

На рис. 4 приведены результаты измерений радиальных бетатронных колебаний при уменьшенном значении частоты ускоряющего напряжения в резонаторах. Кроме общего смещения частот бетатронных колебаний уменьшение частоты ускоряющего напряжения в резонаторах привело к увеличению количества членов с комбинационными частотами, имеющими положительное значение коэффициента m (см. (3)), и к уменьшению членов с отрицательными значениями того же коэффициента.

Рассматривая поведение основной и комбинационных частот поперечных колебаний на диаграмме устойчивости, приведенной в работе [4], можно видеть, что как основная, так и комбинационные частоты проходят через различные резонансы, чем и обуславливаются потери пучка по циклу ускорения при наличии когерентных синхротронных колебаний частиц.

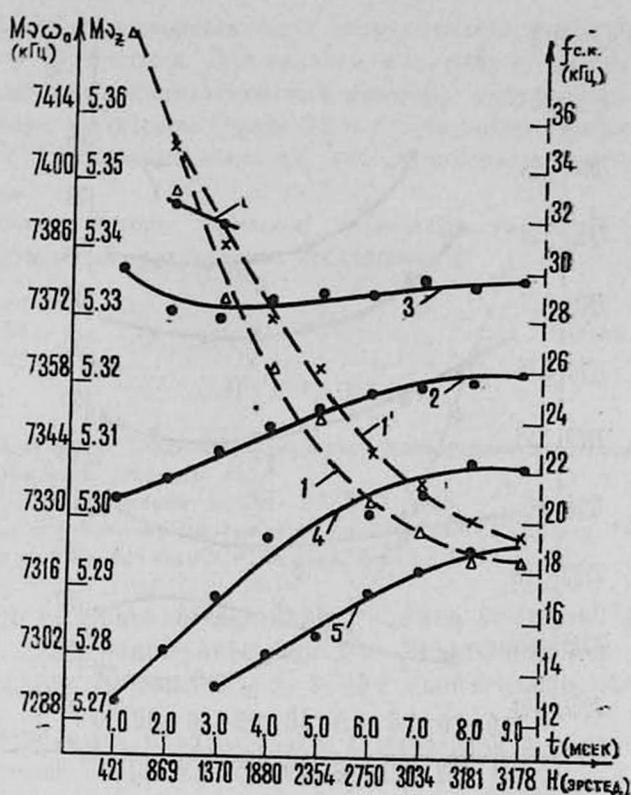


Рис. 3.

При работе ускорителя на пониженной энергии (4 Гэв) целесообразно использовать для ускорения только один из двух ВЧ генераторов, а «пассивные» резонаторы второго генератора использовать для демпфирования когерентных синхротронных колебаний, что позволит устранить потери пучка по циклу ускорения и улучшить условия вывода частиц из ускорителя. Для этого резонаторы второго генератора следует расстраивать так, чтобы их собственная частота была меньше частоты ускоряющего напряжения. Экспериментально найденное изменение частоты когерентных фазовых колебаний, вызванное расстройкой «пассивных» резонаторов, качественно совпадает с тем, что дает формула (2) для одиночного ускоряющего резонатора.

При работе двумя генераторами демпфирование колебаний с помощью резонаторов становится невозможным, и поэтому целесообразно в дальнейшем разработать систему с обратной связью для подавления этих колебаний пучка.

В таблице приведены результаты измерения Ω и вычислений Φ_s и V_{ps} по формулам (6) и (7) для двух моментов времени — спустя 3 мсек и спустя 5 мсек после инъекции — для разных значений ускоряющего напряжения. В графе 3 таблицы приведены показания пикового детектора, измеряющего суммарное напряжение с измерительных петель всех

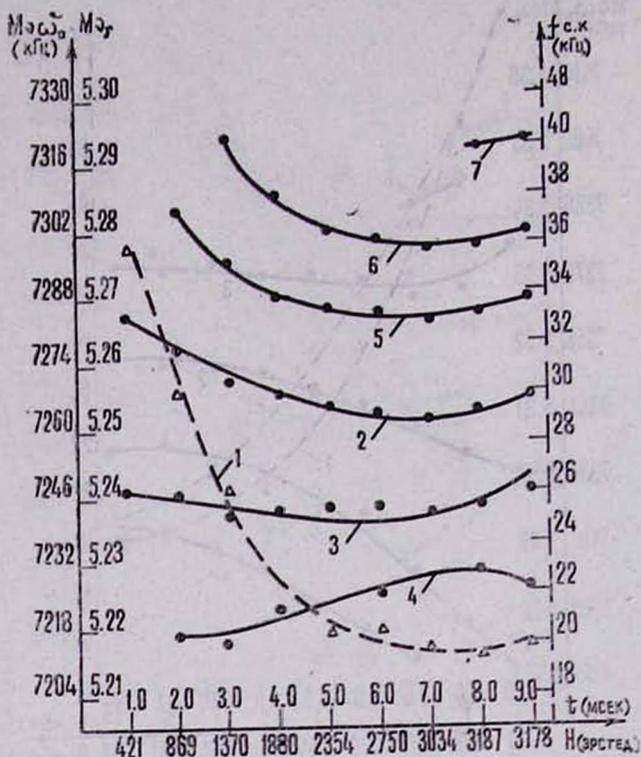


Рис. 4.

Таблица

1	2	3	4	5	6	7	8
Задержка момента измерения относительно инжекции	Частота фазовых колебаний	Показания детектора суммарного напряжения	Равновесная фаза Φ_s	Амплитуда суммарного напряжения в измеренный момент, V_{ps}	Энергия частицы в измеренный момент времени, E_s	Прирост энергии частицы на обороте, ΔE	Отношение амплитуд суммарного напряжения
(мксек)	(кГц)	(мкВ)		(кВ)	(ГэВ)	(кэВ)	
3000	18,8	1,10	47°30'	433	1,06	293	1,25:1,34:1
3000	21,6	1,20	55°30'	518	1,06	293	1,23:1,47:1
3000	14,6	0,90	33°00'	352	1,06	293	
5000	9,92	0,90	27°40'	348	1,86	258	1:1,1:1,39
5000	13,3	1,00	43°00'	410	1,86	258	1:1,18:1,46
5000	15,7	1,25	52°30'	500	1,86	258	

ускоряющих резонаторов. Показания этого детектора пропорциональны амплитуде суммарного напряжения (без учета возможной расфазировки резонаторов). При измерениях максимальная энергия ускоренных частиц

составляла $2,55 \text{ Гэв}$, а скорость роста напряженности магнитного поля при инжекции — $3 \cdot 10^5 \text{ эрст/сек}$. Для сравнения в графе 8 таблицы приведены нормированные на единицу отношения амплитуд ускоряющего напряжения, измеренные детектором (графа 3) и рассчитанные (графа 5) согласно выражению (7). Нетрудно заметить, что совпадение этих величин достаточно хорошее.

В заключение авторы приносят благодарность Х. А. Симоняну за участие в обсуждениях результатов исследований.

Ереванский физический
институт

Поступила 18. VI. 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Г. Агбалян и др. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, Атомиздат, 1964, стр. 235.
2. А. И. Барышев и др. Преприят ЕрФИ—УФТ—1, 1968.
3. С. А. Хейфец. Электронный синхротрон, Изд. АН АрмССР, Ереван, 1963.
4. С. К. Есин и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 8, 213 (1973).

ՓՆՁԻ ԿՈՇԵՐԵՆՏ ՄԻՆԵՐՈՐԵՏԱՏՐՈՆԱՅԻՆ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՐԵՎԱՆԻ ՄԻՆԵՐՈՏՐՈՆՈՒՄ
ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԱՐԱԳԱՑՄԱՆ 2+3 ԳԷՎ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐԻ ԴԵՊՈՒՄ

Բ. Բ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա. Ի. ԲԱՐՅՇԵՎ, Վ. Ց. ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Ա. Ռ. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ

Նկարագրված են էլեկտրոնային սինխրոտրոնում փնջի կոհերենտ ֆազային տատանումների հետազոտությունների արդյունքները և «պասիվ» ռեզոնատորների ազդեցությունը այդ տատանումների պարամետրերի վրա: Մշակված են առաջարկություններ, որոնք ապահովում են մասնիկների կորուստների կանխումը արագացման ցիկլի ընթացքում: Բերված են որոշ տեսական դրույթների փորձով ստուգված արդյունքները: Փորձով հաստատված է, որ փնջի կոհերենտ ֆազային տատանումների առկայության դեպքում բետատրոնային տատանումներում ի հայտ են գալիս կոմբինացիոն հաճախականություններով բաղադրված Զուլց է տրված, որ բետատրոնային տատանումների շարժման միջոցով կարելի է որոշել փնջի կոհերենտ ֆազային տատանումների հաճախականությունը:

THE STUDY OF COHERENT SYNCHROBETATRON
OSCILLATIONS OF YEREVAN SYNCHROTRON BEAM AT THE
ACCELERATION OF PARTICLES UP TO THE END-POINT
ENERGY OF 2+3 GeV

B. B. AJRAPETYAN, A. I. BARYSHEV,
V. Ts. NIKOGOSYAN, A. R. TUMANYAN

The coherent phase oscillations of the electron beam and the influence of "passive" resonant cavities on the parameters of these oscillations have been investigated. The recommendations to eliminate particle losses during the acceleration cycle are given and some theoretical propositions were experimentally verified. It was experimentally confirmed, that in the presence of coherent phase oscillations of the beam, there appeared combination frequency components in betatron oscillations. The measurement of these components allows one to determine the frequency of the coherent phase oscillations of the beam.