

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ СВЕТИМОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА В СИНХРОТРОНЕ

Е.М.Мороз, К.Н.Шорин
Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР, Москва

1. Введение

В источниках синхротронного излучения (СИ), увеличение светимости сгустка циркулирующих электронов, достигаемое уменьшением его поперечных размеров, является эффективным средством существенного улучшения качества выводимых пучков СИ. При этом предпочтительнее (и легче удается) уменьшение вертикальных размеров сгустка вследствие известных особенностей самого СИ, конструкций источников и используемой при исследованиях аппаратуры.

/1/
Имеется опыт значительного уменьшения вертикального размера электронного пучка в сильнофокусирующем накопителе путем ослабления проявлений синхротронных резонансов связи. В данной работе описаны исследования по уменьшению размеров пучка в слабофокусирующем синхротроне-рейстреке с энергией ~ 600 МэВ. Здесь уменьшение поперечных размеров сгустка вне областей проявления резонансов связи достигнуто импульсной модуляцией^{/2/} показателя магнитного поля n , уменьшением раскачки вертикальных колебаний квантовыми флуктуациями излучения под влиянием наклона оси сечения циркулирующего пучка к гори-

зонтальной плоскости ^{/3/}, уменьшением азимутальной несимметрии медианной поверхности.

2. Основные расчетные соотношения

Вертикальный d_z размер пучка электронов в синхротроне-рейстреке при значениях показателя магнитного поля n , обеспечивающих достаточное удаление рабочей точки от синхробетатронных резонансов связи, определяется рассеянием электронов на остаточном газе, квантовыми флуктуациями синхротронного излучения, влиянием отклонений орбит электронов от средней плоскости зазора магнита.

Степень рассеяния электронов остаточным газом зависит главным образом от вакуума и для параметров синхротрона ФИАН при давлении $p \sim (1-3) 10^{-6}$ тор (в отсутствие других возмущающих факторов) приводит к величине $d_z \sim (0,4-0,25)$ мм.

Влияние на размер d_z квантовых флуктуаций СИ (в отсутствие искажений медианной поверхности и в идеальном вакууме) соответствует величине $d_z \sim 1,5 10^{-3}$ мм.

В эксплуатационном режиме работы ускорителя наблюдаемый размер $d_z \sim 2,4-2,6$ мм (при $p \sim 2 10^{-6}$ тор), что свидетельствует о наличии других возмущающих факторов.

Указания работы ^{/3/}, наши многочисленные наблюдения за ускоренным пучком и расчеты, проведенные в связи с излагаемым исследованием, показали, что при наличии вертикальных искажений орбит частиц наиболее существенное влияние на радиальный размер пучка в синхротроне ФИАН оказывает нерезонансная связь вертикальных колебаний с радиальными, описываемая следующими соотношениями:

$$d_z \geq d_r \sqrt{\left(\frac{n}{1-n} \cdot \frac{1}{2\pi} \oint z_r'(\theta) d\theta\right)^2 + \frac{1}{2\pi} \oint z_r'^2(\theta) d\theta} \approx$$

$$\approx d_r \sqrt{\left(1 + \frac{n^2}{(1-n)^2}\right) a_0'^2 + \frac{1}{2} \sum \left[\frac{a_k(1+n)/R + a_k' \cos \psi_k}{\kappa^2 - n(1+\lambda)} \right]^2}, \quad (1)$$

$$d_r \geq \gamma \sqrt{\frac{55 \Lambda R (1+\lambda)}{8\sqrt{3} n (1-n)}}. \quad (2)$$

где d_r - радиальный размер пучка, определяемый только бетатронными колебаниями;
 $\chi'_r(\theta)$ - азимутальная зависимость наклона к горизонтальной плоскости сечения ускоренного пучка;
 R - радиус кривизны равновесной орбиты;
 $a_k, a'_k, \cos \psi_k$ - соответственно амплитуды k -ых гармоник смещения по вертикали и наклона магнитной медианной поверхности ускорителя, множитель сдвига фаз между k -ми гармониками;
 n, λ - показатель поля и относительная длина прямолинейных промежутков;
 γ - релятивистский фактор ускоренных электронов.

Таким образом, основными факторами сжатия пучка являются показатель поля n , амплитуды a_k компонент азимутальных искажений медианной поверхности, компоненты a'_k наклона медианной поверхности и полная коррекция всех искажений медианной поверхности обеспечат величину d_z , соответствующую рабочему вакууму в камере ускорителя.

Ниже описаны экспериментальные исследования влияния этих факторов на вертикальный размер пучка синхротрона ФИАН и результаты, достигнутые в его эксплуатационном режиме.

3. Экспериментальные исследования

Об уменьшении размеров сгустка электронов при импульсной модуляции (в сторону уменьшения) показателя поля n на плоской вершине магнитного цикла синхротрона ФИАН упоминалось в работе^{12/}. В данной работе проведены подробные экспериментальные исследования динамики поперечных размеров пучка как в отсутствие, так и одновременно с другими факторами возмущения вертикального размера, в диапазоне значений n от 0,707 (исходное) до $\sim 0,61$ (границы области проявлений одного из резонансов связи).

На рис. 1 приведена зависимость наблюдаемого в опытах вертикального (кривая 1) и радиального (кривая 2) сжатия M пучка в зависимости от величины n или тока $I_{\Delta n}$ в полюсной градиентной обмотке. (Здесь и ниже M - отношение исходного размера пучка к размеру, измененному тем или иным воздействием). Наибольшее сжатие $M \sim 1,72$ по вертикали и $M \sim 1,42$ по радиусу достигается при наименьшем ($\sim 0,61$) значении n в опыте.

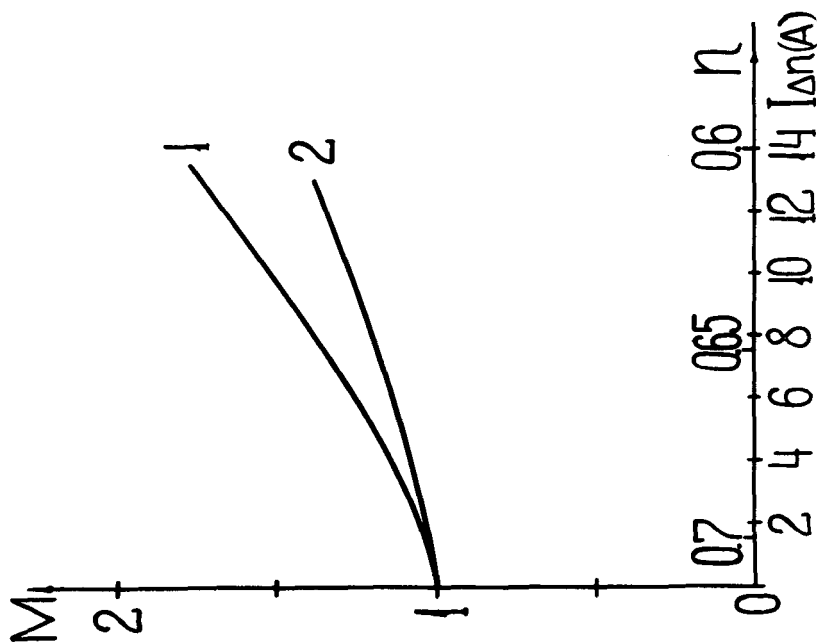


Рис.1. Зависимость вертикального (1) и радиального (2) сжатия M от показателя n и тока $I_{\Delta n}$ градиентной обмотки.

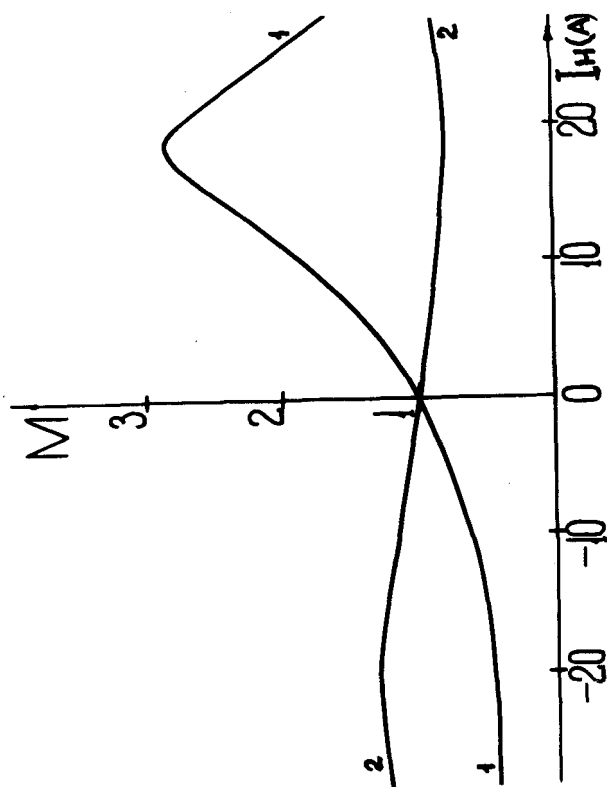


Рис.2. Зависимость вертикального (1) и радиального (2) сжатия M от величины тока I_n в обмотке наклона медианной поверхности (первая гармоника).

Коррекция наклона оси пучка к горизонтальной плоскости (описываемого коэффициентами a'_k) и исследование его влияния на размеры пучка осуществлялись с помощью специальной полюсной "обмотки наклона медианной поверхности", создававшей вблизи равновесной орбиты градиент радиальной составляющей управляющего поля $\sim 0,15$ Э/см·А, что соответствует хорошо подтвержденной опытами с ускоренным пучком величине угла наклона его сечения $\sim 0,005$ рад/А.

Нулевая (по азимуту) гармоника наклона медианной поверхности, вносимая общим для всех квадрантов током I_H , в обмотке наклона не вызвала представляющего практический интерес изменения размера d_z , в то время как первая гармоника наклона, внесенная необходимым распределением величины токов I_H , в разных квадрантах магнита синхротрона оказала сильное влияние (кривая 1 рис.2) на вертикальный размер сгустка. На кривой 2 рис.2 показана соответствующая динамика радиального размера пучка. Наибольшее вертикальное сжатие пучка $M \sim 2,6$ сопровождается небольшим увеличением радиального размера, которое, впрочем, легко восстанавливается до $M = 1$ с помощью модуляции показателя поля n .

На рис.3 приведены результаты исследований вертикального сжатия пучка в процессе коррекции азимутальных искажений орбит частиц по вертикали, определяемых коэффициентами a_k . Здесь при уменьшении амплитуды искажений от ~ 3 см до, практически, нуля (током I_z в корректирующих обмотках ~ 30 А) достигнуто вертикальное сжатие 2,25, изменяющееся по кривой 1 рис.3 в отсутствие других факторов сжатия и по кривой 2 при модуляции показателя поля током $I_{\Delta n} = 10$ А в градиентной обмотке.

На рис.4 приведены результаты фотометрирования по вертикали z кинограмм сечения пучка электронов в относительных единицах N плотности частиц для эксплуатационного режима работы синхротрона, оптимизированного на основе данных исследований рис. 1-3. Здесь исходный размер $d_z = 2,42$ мм превращается в $d_z = 0,64$, что соответствует сжатию пучка по вертикали в $\sim 3,8$ раза.

Таким образом, эксперимент подтвердил возможность существенного уменьшения вертикального размера пучка синхротрона с помощью указанных соотношениями (1), (2) факторов как в принципе, так и в реализуемом эксплуатационном режиме.

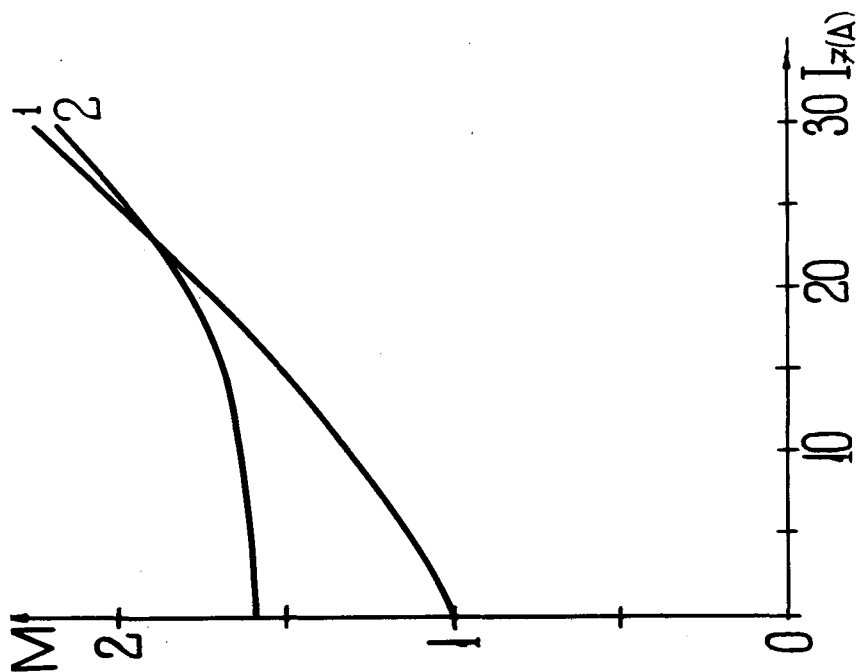


Рис.3. Вертикальное сжатие M сгустка при коррекции током I_z вертикальных искажений ор. плотности N частиц сгустка: 1- исходное, 2- при отсутствии других факторов сжатия (1) и 2- при сжатии коррекцией наклона пучка с модуляцией показателя n (2).

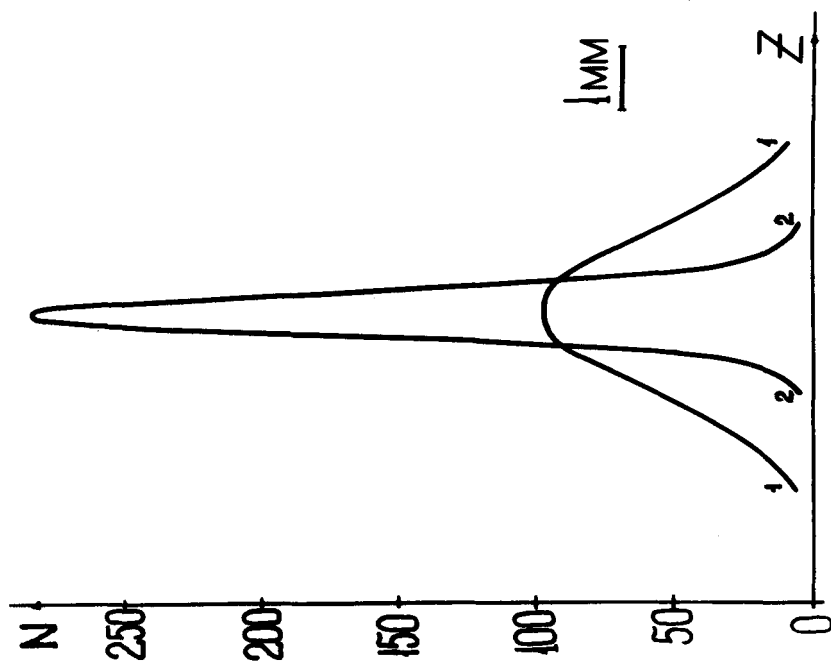


Рис.4. Вертикальное (по z) распределение N частиц сгустка: 1- исходное, 2- при сжатии коррекцией наклона пучка с модуляцией показателя n .

Авторы благодарны Э.Л.Артемовой, П.А.Кирейко, Г.С.Паденко, В.Е.Писареву и А.С.Ярову за помощь, оказанную в выполнении работы.

Литература

1. И.Б.Вассерман и др. Пятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов, стр.56, Москва, 1976.
2. Э.Л.Артемова и др. Пятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов, стр.58, Москва, 1976 .
3. А.Г.Ершов. Диссертация МГУ. Москва, 1972 .

ДИСКУССИЯ

Г.М.Тумайкин: Какое соотношение эмиттансов (вертикального и радиального) удалось получить в результате этой работы?

Е.М.Мороз: Соотношение эмиттансов имеет значение при инжекции, которую мы проводим при энергии около 1,5 МэВ. Эксперименты, о которых я рассказывал, проведены на плато магнитного цикла при энергии около 600 МэВ. Поэтому соотношение эмиттансов никак не связано с размерами поперечного сечения пучка.

Г.М.Тумайкин: Какое соотношение поперечных размеров пучка в Вашей работе?

Е.М.Мороз: Поперечное соотношение размеров: 2,4 мм по вертикали и 4 мм по горизонтали. В результате нашей работы вертикальный размер 2,4 мм снижен до 0,68 мм. Радиальный размер пучка удалось уменьшить в 1,4 раза.