

КОНТРОЛЬ ПО УСКОРЯЕМОМУ СГУСТКУ ДИНАМИКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОНЕ

Е.М. Мороз, К.Н. Шорин

Исследована и сопоставлена с фоторегистрацией методика контроля амплитуд вертикальных колебаний электронов в синхротроне на любом участке цикла ускорения по изменениям интенсивности сгустка, обусловленным вариациями медианной поверхности.

В процессе ускорения в синхротроне динамика амплитуд всех видов вертикальных колебаний (включая движение по возмущенной орбите) определяет размер используемой области вакуумной камеры ускорителя и при нарушениях расчетного режима (резонансы, искажения медианной поверхности и др.) может стать причиной потерь и нестабильности интенсивности ускоренного сгустка.

Распределение электронов по амплитудам бетатронных колебаний в конце ускорения задает вертикальный эмиттанс выводимых пучков, который определяет возможности их использования в физических исследованиях.

По этим причинам контроль режима вертикального движения электронов непосредственно по ускоряемому сгустку в эксплуатационном режиме синхротрона крайне полезен для оптимизации выходных характеристик ускорителя.

При энергиях E электронов, превышающих порог E_B генерации синхротронного излучения видимой области спектра (обычно $E_B \cong 80 \div 100$ МэВ), такой контроль может быть обеспечен различными методами оптической диагностики /1/. Для $E < E_B$ в работе /2/ был предложен метод магнитного зондирования, основанный на исследовании потерь интенсивности ускоряемого сгустка, обусловленных дополнительной вариацией магнитной медианной поверхности. Этот метод практически использовался лишь для контроля качества уже исправленной (по данным магнитных измерений) медианной поверхности при ее заведомо небольших возмущениях.

Описываемая в данной работе методика расширяет возможности магнитного зондирования и, не опираясь на предположение о малости контролируемых исходных возмущений медианной поверхности, обеспечивает измерение амплитуды и фазы соответствующих искажений орбиты без градуировки обмоток коррекции по данным магнитных измерений. В работе впервые исследованы возможности применения магнитного зондирования для исследования распределения электронов в сгустке по амплитудам бетатронных колебаний, что представляет значительный интерес не только для области $E < E_B$. При $E = 350$ МэВ результаты этих исследований были сопоставлены и дали хорошее согласие с результатами исследований методами оптической диагностики.

Вся экспериментальная часть работы выполнена на слабофокусирующем рейстрекке ФИАН с энергией $\sim 0,6$ ГэВ. Здесь вносимая для магнитного зондирования вариация медианной поверхности осуществлялась, как и в /2/, с помощью размещенных на каждом из четырех полюсов магнита обмоток путем их возбуждения дополнительным импульсным током с примерно линейным нарастанием. Соответствующая динамика интенсивности ускоряемого сгустка контролировалась по сигналу широкополосных пикап-электродов, обработанному специальным стробоскопическим устройством /3/. Для определения величины z_M и фазы φ исходных вертикальных искажений орбиты в эксперименте измерялись токи i в обмотках, вызывающие полный сброс интенсивности циркулирующего сгустка. В этом случае искаженная орбита частиц касалась верхней или нижней стенок камеры ускорителя, что соответствовало амплитуде ее полного искажения (а практически его первой гармоники), равной половине вертикальной апертуры $2A$ (84 мм в синхротроне на 0,6 ГэВ) вакуумной камеры. Расчет показал, что вклад высших гармоник в искажение орбиты в этих опытах около 1%. Влияние постоянной составляющей искажения (также небольшое) исключалось одновременным возбуждением противофазным током пары

обмоток диаметрально противоположных квадрантов. Если в этом варианте возмущения медианной поверхности i_1 и i_2 — мгновенные значения дополнительных токов разных знаков в одной паре обмоток, приводящие к полному сбросу ускоряемого сгустка, а i_3 — значение аналогичного тока (любого знака) в другой паре обмоток, то значения z_M и φ вычисляются из соотношений:

$$z_M = A \sqrt{1 - 4\xi_1 / (1 + \xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_1^2/\xi_2^2)}, \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\xi_1 - \xi_2^2}{\xi_2(\xi_1 - 1)}, \quad (2)$$

где $\xi_1 = i_2/i_1$, $\xi_2 = i_3/i_1$.

Рис. 1 иллюстрирует эксперименты по измерению значений токов i , входящих в (1), (2). Значения токов $i_{1,2,3}$ соответствуют моменту времени T_C полного сброса интенсивности. Соответствие T_C выбранному значению энергии E обеспечивается выбором времени T_0 запуска импульса дополнительного тока.

В аналогичном эксперименте можно исследовать и распределение частиц по амплитудам вертикальных колебаний, определяющее вертикальный размер сгустка в процессе и в конце ускорения. Исследования облегчаются, если учесть практически нормальный (гауссовский) закон этого распределения, подтвержденный при $E > E_B$ в многочисленных исследованиях оптическими методами [1, 4]. В этом случае, как следует из [4 и 5], распределение N частиц сгустка по амплитудам z вертикальных бетатронных колебаний описывается распределением Рэля с плотностью $p(z)$, зависящей от масштабного параметра $\sigma > 0$, $p(z) = (Nz/\sigma^2) \exp(-z^2/2\sigma^2)$, и функцией распределения $F(z) = \int_0^z p(x) dx = N[1 - \exp(-z^2/2\sigma^2)]$ для $z > 0$. Здесь ордината $F(z_a)$ — число N_a частиц с амплитудами $z < z_a$; величина

$$N_C = N - F(z_a) = N \exp(-z_a^2/2\sigma^2) \quad (3)$$

— число частиц с амплитудами $z > z_a$. Аналогичное (3) соотношение описывает распределение яркости в оптическом изображении сечения циркулирующего сгустка электронов [4], что позволяет легко сопоставлять данные магнитного зондирования с результатами оптической диагностики.

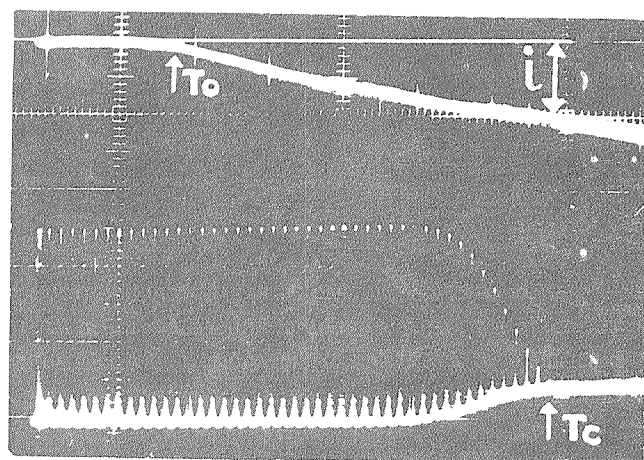
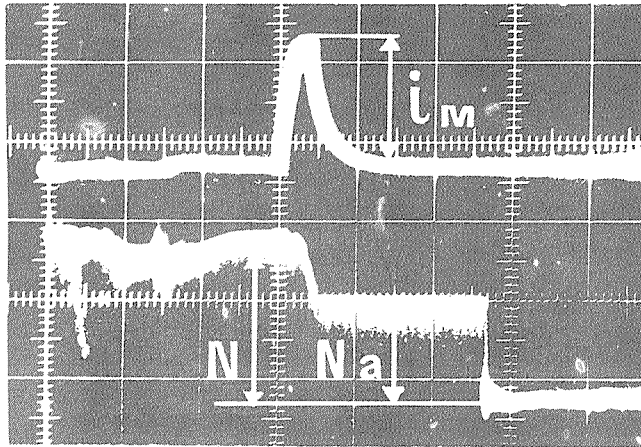
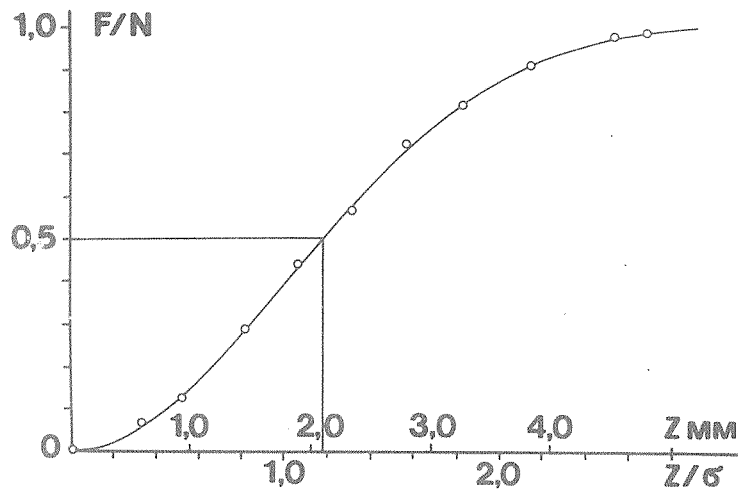


Рис. 1. Смещение медианной поверхности (верхний луч осциллограммы) и изменение интенсивности сгустка (нижний луч) при его полном сбросе. Часть цикла ускорения.



Р и с. 2. Смещение медианной поверхности (верхний луч осциллограммы) и изменение интенсивности сгустка при его частичном сбросе (нижний луч). Полный цикл ускорения.



Р и с. 3. Распределение частиц по амплитудам вертикальных бетатронных колебаний. Кривая – расчет по формуле (3), точки – эксперимент.

Величины N_a и N_c могут быть определены из опыта, в котором частицы с амплитудами $z > z_a$ выводятся тем или иным способом из процесса ускорения. Такого рода опыт иллюстрируется рисунками 1 и 2, где частицы с $z > z_a$ выходят из ускорения при выведении сгустка на стенки камеры. На рис. 2, в отличие от опыта рис. 1, измеряется амплитуда i_M дополнительного тока, вызывающего смещение медианной поверхности (верхняя осциллограмма), а величины N_a , N и $N_c = N - N_a$ определяются, как показано на нижней осциллограмме. При измерениях распределения частиц по амплитудам колебаний на время T_B перемещения сгустка к стенкам камеры следует наложить условие $T_B \ll T_B \ll \tau_z$, где T_B и τ_z – период и постоянная затухания вертикальных бетатронных колебаний.

На рис. 3 приведены результаты измерений распределения электронов по амплитудам бетатронных колебаний при $E = 350$ МэВ на плоском участке магнитного цикла синхротрона на 0,6 ГэВ. Сплошная кривая – функция распределения $F(z/\sigma)/N$, точки вблизи кривой – результаты эксперимента, аналогичные представленным на рис. 1

Сопоставление абсолютных значений амплитуд бетатронных колебаний, измеренных методами магнитного зондирования и оптической диагностики, осуществлено при $E = 350$ МэВ для значений $F/N = 0,5$, что соответствует точке кривой распределения яркости оптического изображения сгустка /4/ на половине ее высоты. Были получены значения $z \sim 2,1$ мм /1/, неразличимые в пределах точности измерений.

Авторы благодарны Г.В. Демьянову, обработавшему экспериментальные данные, а также Ю.М. Александрову, П.А. Кирейко, А.С. Ярову и С.С. Молчанову за обсуждения и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов О.Ф. Труды ФИАН, 80, 3 (1980).
2. Шорин К.Н. ПТЭ, № 4, 25 (1964).
3. Александров Ю.М. и др. Препринт ФИАН № 168, М., 1980.
4. Ершов А.Г. ЖЭТФ, 42, 137 (1962).
5. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., Наука, 1980.

Поступила в редакцию 10 октября 1985 г.