

К ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМУ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГИИ  
ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОНЕ

Э. Л. Артемьева, Е. М. Мороз, В. А. Орлов, К. Н. Шорин,  
А. С. Яров

УДК 621.384.63

В синхротроне на 0,6 ТэВ исследованы экспериментально и сопоставлены с расчетом основные элементы метода контроля энергии ускоренных электронов, использующего интерференцию излучения, генерируемого на краях промежутков магнита ускорителя. Точность  $\leq 1\%$  может быть достигнута при любой энергии в диапазоне 0,2 + 0,6 ТэВ.

В работах /1, 2, 3/, посвященных исследованию интерференции синхротронного излучения (ИСИ), генерируемого в промежутках магнитной системы рейстрекса, указано на возможность использования ИСИ для контроля энергии ускоряемых электронов. Эта возможность — следствие очевидной зависимости реализуемого порядка  $m$  интерференции СИ, наблюдаемой вблизи оси взаимодействующих пучков, от относительной скорости  $\beta$  и энергии  $E$  электронов:

$$m = (l_0/\beta - L)\lambda^{-1}, \quad (1)$$

$$\beta = [1 - (E_0/E)^2]^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны регистрируемого излучения,  $E_0$  — энергия покоя электронов,  $L$  — расстояние между крайними точками генерации интерферирующих пучков,  $l_0$  — длина соответствующего участка орбиты электронов.

Эксперименты по исследованию ИСИ /1,2,3/ показывают возможность определения  $m$  по интерференционной картине, а соответствующей величины  $E$  — с помощью соотношений (1), (2).

Контроль энергии  $E$  с помощью ИСИ осуществляется по ускоряемому ступку, что в ряде случаев предпочтительнее контроля по величине магнитного поля на орбите или по величине тока, питающего обмотки магнита ускорителя /4/.

В синхротронах с большими прямолинейными промежутками  $l_0$ , свободными от рассеянного поля, с определенной степенью точности можно считать  $L \approx l_0 \approx l_0$ . Наличие в промежутках магнитного поля (рассеянного или внесенного) требует, в большинстве случаев, численного расчета величин  $L$  и  $l_0$ .

В синхротроне ФИАН с энергией  $\sim 0,6$  ГэВ, применительно к которому рассматривается данный метод, интерференционные эффекты возбуждаются путем создания в середине одного из промежутков симметрично относительно его центра участка с небольшим отрицательным магнитным полем /3/. В этом случае пучки СИ, генерируемые в трех точках промежутка (в центре и на обоих краях), практически соосны и наблюдаемая интерференционная картина обладает достаточно большой видностью. При таком способе возбуждения ИСИ, специфическом для синхротрона с короткими промежутками и большими полями рассеяния в них, величина  $L$  может быть определена с помощью соотношения

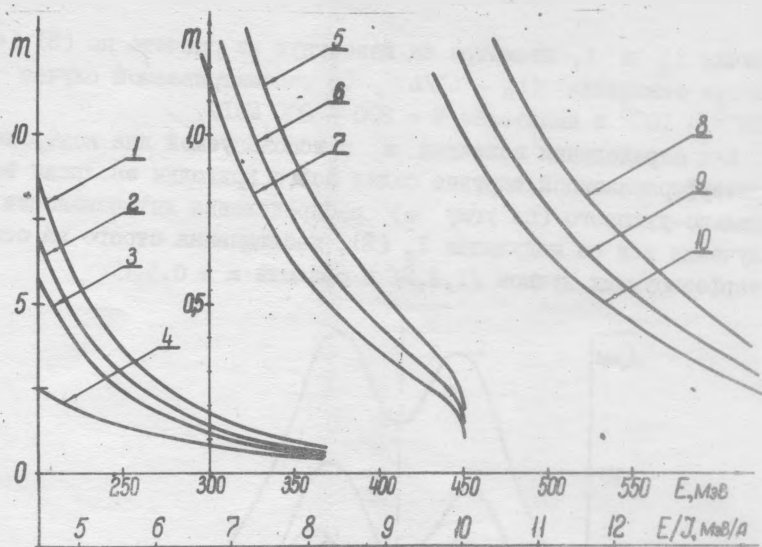
$$\int_0^{L/2} H(l) dl = 0, \quad (3)$$

где  $H(l)$  - распределение магнитного поля по горизонтальной координате  $l$ , отсчитываемой от центра промежутка. Величина  $l_0$  определяется соотношением

$$l_0 = 2 \int_0^{L/2} dl \left[ 1 - \left[ (300/\beta E) \int_0^1 H(\eta) d\eta \right]^2 \right]^{-1/2}, \quad (4)$$

где  $E$  - в эВ,  $H$  - в Э,  $l$  - в см.

На рис. 1 для синхротрона ФИАН, с его распределением поля рассеяния в промежутках ( $\sim 600$  Э в центре при  $E = 0,6$  ГэВ) и комплектом безжелезных корректирующих катушек для создания отрицательного поля (с постоянными  $II,7$  Э/А в центре промежутка

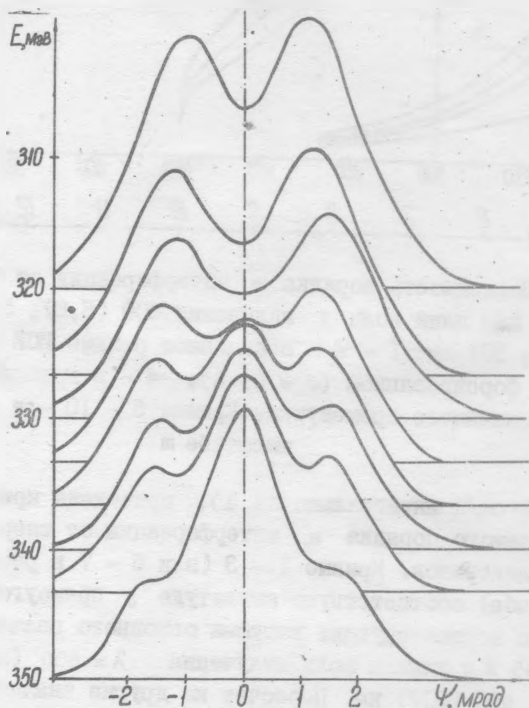


Р и с. I. Зависимость порядка  $m$  интерференции от энергии  $E$  электронов для длин волн  $\lambda$  излучения 600 (5,8), 500 (2, 6,9) и 400 (3,7, 10) нм: 1 - 7 - в основном режиме ИСИ ( $J = 45$  А), 8 - 10 - в форсированном ( $J = 65$  А), 4 - в приближении идеального прямолинейного промежутка. Кривые 5 - 10 - в растянутом масштабе  $m$

или  $344,0$  Э·см/А интегрально по 1), приведены кривые зависимости ожидаемого порядка  $m$  интерференции от энергии  $E$  ускоряемых электронов. Кривые 1 - 3 (или 5 - 7 в растянутом по  $m$  масштабе) соответствуют амплитуде  $j$  прямоугольного импульса тока корректирующих катушек основного расчетного режима ИСИ  $J = 45$  А и длинам волн излучения  $\lambda = 600$  (кривые 1;5), 500 (2;6), 400 (3;7) нм. Пересчет на другие значения  $j$  или  $\lambda$  может быть произведен с помощью дополнительной оси  $E/J$  аналогично кривым  $m(E)$  8,9,10 (в растянутом по  $m$  масштабе), вычисленным для тока  $J = 65$  А и значений  $\lambda = 600, 500$  и 400 нм. Кривая 4 на рис. I, вычисленная в упрощающем предположении отсутствия поля рассеяния ( $l_p = L$ ) для  $\lambda = 578$  нм, подтверждает необходимость для целей контроля  $E$  численного расчета

величин  $l_0$  и  $L$ , несмотря на известную из расчета по (3) (4) малость отношения  $(l_0 - L)/L$  (в рассматриваемом случае  $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$  в диапазоне  $E = 200 - 300$  МэВ).

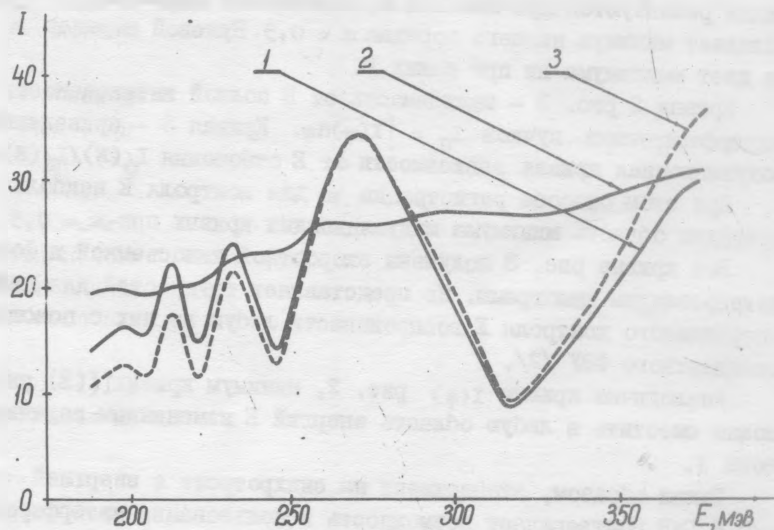
Для определения величины  $m$  в используемой для контроля  $E$  интерференционной картине более всего пригодны эволюция вертикально-углового (по углу  $\psi$ ) распределения интенсивности  $I$  излучения или ее модуляция  $I_0(E)$ , наблюдаемая строго на оси интерферирующих пучков /1,2,3/ в области  $m = 0,5$ .



Р и с. 2. Эволюция вертикально-углового (по  $\psi$ ) распределения интенсивности СИ в интерференционной картине ( $\sigma$ -компонент,  $\lambda = 578$  нм), вызванная изменением  $E$  при ускорении электронов

На рис. 2 приведена вызванная ИСИ и зарегистрированная скоростной киносъемкой эволюция  $I(\psi)$  в его  $\sigma$ -компоненте

при  $\lambda = 578 \pm 9$  нм в диапазоне  $E = 320 - 340$  МэВ. Видна сильная зависимость характера распределения  $I(\psi)$  от энергии ускоряемых электронов: место минимума при  $\psi = 0$  для  $\leq 330$  МэВ, обусловленного 0,5-м порядком интерференции (реализуется точно при  $E = 320$  МэВ) занимает и быстро увеличивается с энергией максимум, обусловленный нулевым порядком интерференции. Минимум  $I$ , момент появления максимума  $I$  (при  $\psi = 0$  и рост его видности могут быть зарегистрированы известными методами /3/ и затем использованы для определения  $E$  по кривым рис. 1 или соотношениям (1), (2) непосредственно. Относительная точность регистрации величины  $m = 0,5$ , очевидно, не ниже 0,1%



Р и с. 3. Интерференционная модуляция  $I(E)$  интенсивности СИ в относительных единицах ( $\sigma$ -компонент,  $\lambda = 575$  нм) в процессе изменения  $E$ ; 1 - на оси интерферирующих пучков ( $I_0$ ), 2 - в интеграле по вертикальному углу ( $I_{II}$ ), 3 - в отношении  $I_0/I_{II}$

Изменением величины тока  $j$  вся интерференционная картина может быть смещена в любую область энергий  $E$ . В частности

(см. кривую 9 рис. 1), при  $J = 65$  А и  $\lambda = 500$  нм,  $m = 0,5$  реализуется при максимальной эксплуатационной энергии синхротрона  $E \sim 580$  МэВ, что обеспечивает возможность оперативного контроля описываемым методом также максимальной энергии синхротрона.

На рис. 3 кривая 1 — экспериментальная модуляционная кривая  $I_0(E)$  интенсивности (в относительных единицах) синхротронного излучения на общей оси интерферирующих пучков при  $J = 45$  А. Эта кривая также может быть использована для контроля энергии  $E$ . Здесь видны 4 максимума целых порядков интерференции (1 — 4) и 4 минимума полужелтых порядков (0,5 — 3,5). Более высокие порядки реализуются при меньших  $E$ . Наибольшей видностью ( $\sim 0,6$ ) обладает минимум низшего порядка  $m = 0,5$ . Нулевой порядок  $m$  не дает максимума ни при каких  $E$ .

Кривая 2 рис. 3 — зависимость от  $E$  полной интенсивности интерферирующих пучков  $I_{\Pi} = \int I(\psi) d\psi$ . Кривая 3 — приведенная модуляционная кривая зависимости от  $E$  отношения  $I_0(E)/I_{\Pi}(E)$ .

При этом способе регистрации  $m$  для контроля  $E$  наиболее пригодна область минимума модуляционных кривых при  $m = 0,5$ .

Все кривые рис. 3 получены скоростной киносъемкой и фотометрированием кинограмм. Не представляет трудностей для целей оперативного контроля  $E$  воспроизвести любую из них с помощью стандартного ФЭУ /2/.

Аналогично кривым  $I(\psi)$  рис. 2, минимум кривых  $I(E)$  рис. 3 можно сместить в любую область энергий  $E$  изменением величины тока  $J$ .

Таким образом, эксперимент на синхротроне с энергией  $\sim 0,6$  ГэВ подтверждает возможность использования интерференции синхротронного излучения для оперативного контроля энергии ускоренных электронов с точностью  $\leq 1\%$ .

Авторы благодарны Ю. М. Александрову, П. А. Кирейко, В. Н. Махову, В. Е. Писареву, Ю. Н. Пономареву, М. Н. Якименко за помощь и обсуждения.

Поступила в редакцию  
31 августа 1981 г.

### Л и т е р а т у р а

1. М. М. Никитин и др., Письма в ЖТФ, 5, № 14, 843 (1979).
2. М. М. Никитин и др., ЖЭТФ, 79, вып. 3 (9), 763 (1980).
3. З. Л. Артемьева и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № II, 58 (1981).
4. Ю. М. Александров и др., Препринт ФИАН № 168, 1980 г.