

ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ МОДИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. А. Горбунов

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Обсуждается возможность перестройки ускорителей электронов старших поколений для эффективного использования их в качестве источников синхротронного излучения. Среди прочих положительных эффектов, связанных с применением вигглера в ускорителе, оценивается возможность использования боковых лепестков излучения для разделения нескольких экспериментов на одном пучке. Приведен анализ когерентных эффектов для систем с большим коэффициентом ондуляторности.

The possibility of reconstruction of old generation electron colliders for an effective use as synchrotron radiation sources is discussed. Among other positive features related with using the wiggler in the accelerator, the possibility of using lateral petals of the radiation for a division of several experiments on one beam is estimated. The analysis of coherent effects for systems with the large undulatority coefficient is presented.

PACS: 29.20.dk

ВВЕДЕНИЕ

Современная архитектура ускорителей позволяет снимать синхротронное излучение высокого спектрального качества с большого числа участков траектории рабочего пучка. Но существует вопрос повышения эффективности использования для этих целей уже имеющихся машин, изначально предназначенных для работы в физике высоких энергий. На таких машинах очень не просто, с точки зрения геометрии их конструкции, расположить большое количество экспериментов. Благодаря компактным размерам и высокой мощности современных вигглеров их можно использовать в ускорителях старших поколений. Такой способ модернизации ускоряющих систем может привести к значительному улучшению качества синхротронного излучения и адаптации для одновременного проведения нескольких экспериментов. Подобная реконструкция ускорителя должна отвечать таким требованиям, как:

- невысокая стоимость в сравнении со стоимостью самой машины;
- установка новых устройств без ущерба для параметров пучка;
- проведение модернизации совместно со штатным расписанием использования ускорителя.

Использование вигглера в излучающей системе не является новым изобретением, его стандартно используют для достижения большей жесткости кванта излучения и для повышения спектральной яркости.

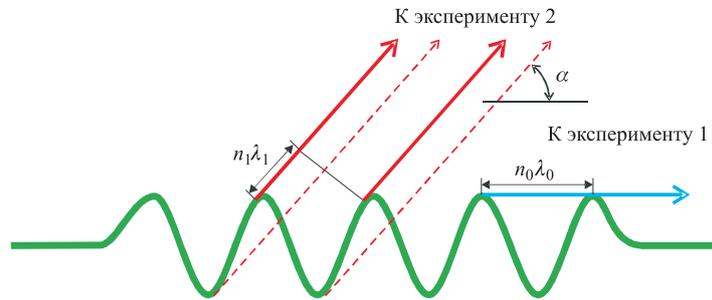


Рис. 1. Излучение вигглера (схематично)

Вигглер может обладать большим коэффициентом ондуляторности, обеспечивающим значительное искривление траектории заряженной частицы. В такой ситуации можно использовать эффекты, связанные с боковыми лепестками диаграммы направленности. При достаточной удаленности от источника это позволит синхротронным излучением несколько независимых экспериментов. Оценить максимальный угол отклонения луча от равновесной орбиты можно из геометрических соображений (рис. 1).

Вигглер — периодическая структура, а значит радиус кривизны и угол касательной к траектории меняются вдоль его продольной координаты. Следовательно, под различными углами можно наблюдать излучение различного спектрального состава.

Жесткость излучения вигглера увеличивается вследствие уменьшения радиуса кривизны траектории излучателей, а повышение спектральной яркости связано с когерентным сложением полей излучения от разных участков орбиты пучка. Использование этих эффектов может повысить качество источника синхротронного излучения.

1. КОГЕРЕНТНОСТЬ ДЛЯ ОДНОЧАСТИЧНОЙ МОДЕЛИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Существует несколько определений понятия когерентности. Так, этот термин часто используется, чтобы выделить необходимое условие возникновения интерференции или подчеркнуть свойства сфазированных излучателей в ондуляторной системе. Общим и основополагающим является тот факт, что в любом случае идет речь о сохранении фазовых соотношений поля излучения различных излучателей.

Довольно непривычным может оказаться применение этого термина в отношении одиночного излучателя и его собственной электромагнитной волны. От качеств излучающей системы зависит способность заряженной частицы сохранять фазовый сдвиг испускаемой волны с различных участков траектории. Таким образом, когерентность может быть отнесена и к одночастичной модели излучателя, несмотря на то, что обычно интерференция предполагает когерентность нескольких (минимум двух) излучателей и обуславливается группировкой многих независимых частиц.

Условие когерентности — постоянство фазового положения частицы в волне. Такая ситуация является частным случаем более общей формулировки: если на разных участках траектории на длине формирования спектрально-угловой компоненты излучения проскальзывание фазы между волной и частицей достаточно близко к 2π , то такое излучение когерентно, по крайней мере, частично когерентно.

Повышение коэффициента ондуляторности увеличивает относительную интенсивность высоких гармоник, а следовательно, и требования к стабильности фазовых соотношений. Другими словами, когерентные эффекты очень чувствительны ко всем изменениям параметров излучающей системы: в одном случае изменения могут повлиять на угловое распределение, в другом — привести к полному сбою когерентности. Высокие номера гармоник — это своего рода высокое временное разрешение в процессе образования поля излучения.

Ускоритель со встроенным вигглером генерирует излучение, формирование которого можно условно разделить на три характерных временных интервала; соблюдение условий когерентности на каждом из них значительно влияет на картину излучения.

Первый (самый длинный) интервал связан с обращением заряженных частиц по кольцу синхротрона; этого времени более чем достаточно для нарушения фазовых соотношений поля излучения. Сохранение когерентности на многих периодах обращения заряженной частицы по ускорителю представляется невыполнимым, так как требует оптической точности обращения электрона по орбите. В связи с этим когерентность синхротронного излучения практически возможна лишь на невысоких гармониках частоты обращения [1]. Поле по этому времени просто усредняется, а энергия излучения от N оборотов равна сумме энергий от одного оборота заряженных частиц по кольцу ускорителя.

Второй — время пролета по вигглеру; поля в этом случае могут сохранять пространственную и временную когерентность, благодаря чему возможно повышение спектральной мощности излучения вплоть до квадрата числа периодов вигглера. Сохранение фазовых соотношений между волной и частицей на протяжении движения вдоль нескольких периодов вигглера позволяет под определенными углами наблюдать интерференционные максимумы гармоник интересующих нас номеров. Характерный в этом случае линейчатый спектр излучения сохраняется, если случайный набег фазы частицы на длине вигглера примерно кратен 2π . Набег фазы, отличающийся от этих значений, влияет на угловое распределение, но не на спектр излучения. Это требование к излучающей системе существенно, так как значительно повышает ее эффективность.

Третий — время свечения, за которое наблюдатель фиксирует излучение от одного периода вигглера. В общем случае частица может настолько быстро менять свою фазу, что не будет когерентна с собственной волной излучения даже на соседних участках вигглера. Для наблюдателя, находящегося под определенным углом, спектр такого излучения ничем не отличается от синхротронного. Наблюдение высоких номеров гармоник может быть затруднено ввиду их малой интенсивности. Качественно зависимость поля в дальней зоне от времени для одного периода вигглера представлена на рис. 2 с учетом изменения характера излучения при увеличении коэффициента ондуляторности.

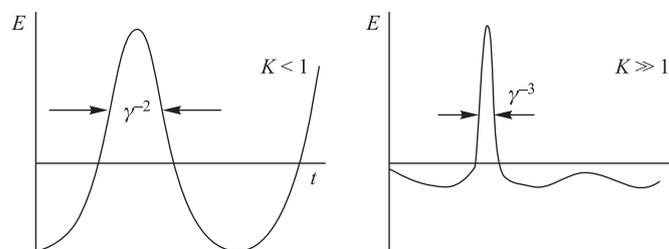


Рис. 2. Поле излучения в дальней зоне для различных значений коэффициента ондуляторности

Чем больше энергия пучка, тем большей жесткости кванта можно добиться, установив в систему вигглер. Но для пучка высокой энергии нужны сильные магнитные поля, так как именно кривизна орбиты вносит вклад в излучение жестких квантов.

2. СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВОЙ СОСТАВ ИЗЛУЧЕНИЯ ВИГГЛЕРА

Предположим для простоты, что траекторией пучка в вигглере является несколько периодов синусоиды. Тогда из соотношения амплитуды поперечных колебаний и волнового числа можно произвести оценку максимального угла отклонения излучения — это есть максимальный угол касательной к траектории:

$$\operatorname{tg}\alpha \leq \frac{2\pi A}{L}, \quad (1)$$

где A и L — амплитуда и период колебаний излучателя в вигглере соответственно. Излучение происходит с небольшого участка траектории, касательная к которому лежит внутри телесного угла $1/\gamma^2$ относительно наблюдателя. Это излучение пропорционально квадрату радиуса кривизны данного участка траектории. Для синусоидальной траектории излучателей очевидно, что под разными углами наблюдения будет излучаться разная мощность и разная частота излучения, так как радиус кривизны является хоть и плавной, но функцией продольной координаты (угла наблюдения). В смысле эффективного разделения излучения одновременно для разных экспериментов наибольший интерес представляют траектории с резким изменением радиуса кривизны. Поэтому традиционные представления об излучении электрона с круговой орбиты [4] здесь мало применимы.

Поле излучения от одного участка вигглера задается выражением [2]

$$U = \frac{\sqrt{3}cw}{2\pi\omega(1-\beta\mathbf{e}\mathbf{t})} \left[\mathbf{t}K_{1/3}(w) - 2i\mathbf{n}\sqrt{\frac{1-\beta\mathbf{e}\mathbf{t}}{\sqrt[3]{2}\beta\mathbf{e}\mathbf{t}}}K_{2/3}(w) \right], \quad (2)$$

где $w = \frac{\omega\rho}{3\beta c} \sqrt{\frac{8(1-\beta\mathbf{e}\mathbf{t})^3}{\mathbf{e}\mathbf{t}}}$; \mathbf{e} — вектор наблюдения; \mathbf{t} , \mathbf{n} — касательный и нормальный орты сопровождающей системы координат; ρ — локальный радиус кривизны, ω — ондуляторная частота. И $\mathbf{E} \propto [\mathbf{e}[\mathbf{U}\mathbf{e}]]$.

Спектр излучения на участке вигглера имеет вид, характерный для синхротронного излучения.

При соблюдении условий когерентного сложения полей от нескольких периодов ондулятора под любым углом, удовлетворяющим неравенству (1), будет наблюдаться интерференционная картина (рис. 3).

На графике пунктиром представлен спектр излучения без интерференционных эффектов от одного периода вигглера, сплошной линией — интерференционная картина для пяти периодов вигглера.

Расположение максимумов на интерференционной картине различно для разных номеров гармоник под разными углами наблюдений α .

Для параметров синхротрона «Пахра» [3] из графика на рис. 4 видно, что сдвиг полюс гармоник сдвинут на 0,005 рад, это позволяет при удалении от источника на 20 м разместить независимые эксперименты на расстоянии 5 см друг от друга. Возможность

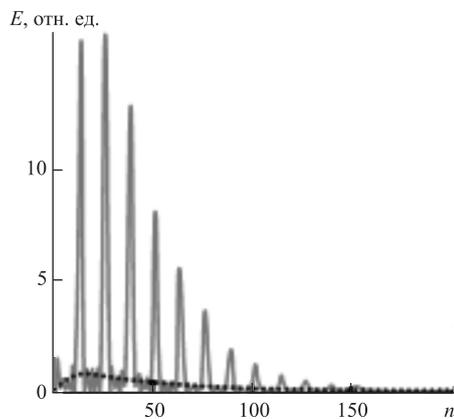


Рис. 3. Интерференционный эффект в ондуляторном излучении

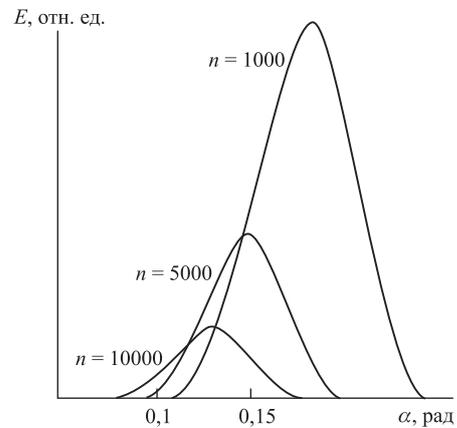


Рис. 4. Наблюдение излучения различных номеров гармоник

разделения излучения напрямую зависит от коэффициента ондуляторности. Изменение этого параметра резко меняет угловую направленность излучения и его спектральный состав. Использование частотных фильтров также поможет разделить излучение на небольшом расстоянии от установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для использования в качестве синхротронного источника ускоритель должен удовлетворять набору специальных требований. Следует помнить, что в нашем случае вопрос эмиттанса пучка стоит особенно остро и накладывает ряд своих ограничений. В этом смысле пучок должен быть достаточно качественным, в противном случае потери тока сделают невозможным функционирование не только узла излучателя, но и всей машины. Сильный вигглер является сильным масс-спектрометром — это усугубляет вопрос продольного эмиттанса размытого по энергии пучка.

Основная же трудность — это сопряжение магнитного поля вигглера с полем ускорителя. По-видимому, применение вигглеров с большим полем (сверхпроводящих) будет возможно лишь в квазиаккумуляторном режиме синхротрона с переводом пучка в вигглер с помощью байпаса по достижении квазистационарной энергии.

Выражаю благодарность А. Н. Лебедеву за предложенную идею модернизации ускорителей и А. В. Серову за ознакомление с ускорителем «Пахра».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nodvick J., Saxon D. // Phys. Rev. 1954. V. 96. P. 180.
2. Buts V.A., Lebedev A.N., Kurilko V.I. The Theory of Coherent Radiation by Intense Electron Beams. Springer, 2006.
3. Serov A. V. Working of Synchrotron «Pakhra» in the Operation Mode of Synchrotron Radiation Source // RuPAC, 2008.
4. Landau L., Lifshitz E. The Classical Theory of Fields. Oxford: Pergamon Press, 1968.