

УДК 621.384

РАДИАЦИОННОЕ СЖАТИЕ ЭМИТТАНСА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ “КЕНДЛ” С ПОМОЩЬЮ ВИГЛЕР-МАГНИТОВ

Т.Л. ВАРДАНЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения
Институт синхротронных исследований “КЕНДЛ”, Ереван, Армения

e-mail: tvardanyan@asls.candle.am

(Поступила в редакцию 18 июня 2014 г.)

Исследована возможность уменьшения эмиттansa пучка в накопительном кольце проекта источника синхротронного излучения «КЕНДЛ» с помощью виглер-магнитов, установленных в свободных прямолинейных участках магнитной структуры ускорителя. С помощью трека частиц в ускорителе рассчитана динамическая апертура нелинейных колебаний, вызванных виглерами, и предложена оптимальная конфигурация для существенного сжатия горизонтального эмиттansa пучка.

1. Введение

Достижение малых эмиттансов электронного пучка в современных накопителях электронов является одной из важных проблем для достижения высокой яркости синхротронного излучения [1,2]. Как известно [3], равновесный эмиттанс пучка в накопителях электронов определяется балансом радиационного затухания и квантовых флуктуаций поперечных колебаний частиц и определяется в основном магнитно-оптической структурой ускорителя. Без возмущения основной магнитно-оптической системы ускорителя дополнительное радиационное затухание в систему можно ввести с помощью специальных виглер-магнитов, устанавливаемых в свободных промежутках кольца [4,5]. Хотя такие магниты усиливают нелинейные эффекты в системе и приводят в общем случае к сужению динамической апертуры поперечных колебаний, при определенных условиях возможно значительное сжатие поперечного эмиттansa пучка с сохранением динамической апертуры кольца в допустимых пределах.

В настоящей работе исследована возможность применения виглер-магнитов для сжатия электронного пучка в накопительном кольце проекта источника синхротронного излучения “КЕНДЛ” [6]. Получены параметры виглер-магнита, при котором достижимо максимальное сжатие электронного пучка. Исследована динамическая апертура поперечных колебаний с помощью трека частиц в накопительном кольце.

2. Радиационное сжатие и квантовая раскачка колебаний с учетом виглер-магнитов

Как известно, горизонтальный эмиттанс пучка ε в накопителях электронов задается эффектами радиационного затухания $(d\varepsilon/dt)_R$ и квантовых флуктуаций $(d\varepsilon/dt)_Q$ поперечных колебаний частиц [3,7]:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_R = -2\varepsilon C_R J_x E^3 I_2, \quad \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_Q = c C_Q E^5 I_5, \quad (1)$$

где C_R , C_Q есть константы, приведенные в [7], E – равновесная энергия частиц, ρ – радиус закругления в поворотных магнитах, c – скорость света, J_x – декремент затухания горизонтальных колебаний, I_2, I_5 – синхротронные интегралы, определяемые как $I_2 = \langle 1/\rho^2 \rangle$ и $I_5 = \langle H/\rho^3 \rangle$, а усреднение $\langle f \rangle$ осуществляется по всем поворотным магнитам. Функция H определяется как

$$H = \beta \eta'^2 + 2\alpha \eta' \eta + \gamma \eta^2, \quad (2)$$

где η – функция дисперсии, β – бетатронная функция и (α, β, γ) – параметры Твиса. Равновесный эмиттанс пучка достигается при балансе вышеприведенных эффектов, т.е. $(d\varepsilon/dt)_R + (d\varepsilon/dt)_Q = 0$, и задается выражением

$$\varepsilon = C_q \frac{\gamma^2 I_5}{J_x I_2}, \quad (3)$$

где $C_q = 2.94 \times 10^{-13}$ м и γ – Лоренц-фактор электронов. При введении дополнительных виглер-магнитов в магнитную систему ускорителя формула (3) преобразуется к виду

$$\varepsilon_w = C_q \frac{\gamma^2 I_5 + I_{5w}}{J_x I_2 + I_{2w}}, \quad (4)$$

где I_{2w}, I_{5w} есть синхротронные интегралы вдоль виглер-магнитов. Нетрудно видеть, что эффективное уменьшение эмиттанса пучка возможно при условиях $I_{5w} \ll I_5$ и $I_{2w} \gg I_2$, которые накладывают определенные требования на параметры виглера и участок орбиты его установки. Физически эти условия соответствуют усилению радиационного затухания за счет I_{2w} при незначительном увеличении эффекта квантовой раскачки (I_{5w}).

Естественным следствием формулы (4) для оптимального уменьшения эмиттанса является установка виглер-магнитов в прямолинейных бездисперсионных участках кольца с $\eta = 0$. Однако, виглер-магниты являются источниками дополнительной дисперсии, что необходимо учесть при расчете квантовых флуктуаций при излучении частиц в этих магнитах. Предполагая синусоидальное магнитное поле в виглере, $B(z) = B_w \cos k_p z$, и учитывая, что в бездис-

персионных участках обычно $\alpha = 0$, $\beta = \beta_0 = \text{const}$ и $\beta_0 \gg 2\pi / k_p$, нетрудно получить выражения для интегралов I_{2w} и I_{5w} :

$$I_{2w} = \pi N_w \frac{\theta_w}{\rho_w}, \quad I_{5w} \approx \frac{1}{2} N_w \beta_0 \frac{\theta_w^3}{\rho_w^2}, \quad (5)$$

где $\theta_w = 1 / (k_p \rho_w)$ – угол поворота траектории за один полюс виглер-магнита, N_w – число периодов виглер-магнита. Анализ формул (4) и (5) показывает, что для эффективного уменьшения эмиттанса следует использовать длинные виглер-магниты с сравнительно слабым полем и малым периодом $\lambda_p = 2\pi / k_p$. В предельном случае для большого числа периодов виглера ($N_w \rightarrow \infty$) формула (3) преобразуется к виду

$$\varepsilon_w \approx \frac{1}{2} C_q \frac{\gamma^2}{J_x} \beta_0 \frac{\theta_w}{\rho_w}.$$

Для исследования сжатия эмиттанса в реальном накопительном кольце с помощью дампинг виглеров необходимо проводить численное моделирование с учетом воздействия виглер-магнитов на динамическую апертуру ускорителя.

3. Моделирование эффектов виглер-магнитов в накопительном кольце

“КЕНДЛ” – это проект источника синхротронного излучения на энергию 3 ГэВ, магнитная структура накопительного кольца которого состоит из 16 двухповоротных бездисперсионных ячеек периодичности с длиной длинного свободного промежутка в 4.8 м [6]. Проектный эмиттанс пучка 8.4 нм рад в накопительном кольце ускорителя достигается введением дополнительной дисперсии в 0.2 м в длинных свободных промежутках. В системе с нулевой дисперсией горизонтальный эмиттанс пучка составляет 16 нм рад. Влияние виглер-магнитов на эмиттанс пучка и динамическую апертуру исследованы как

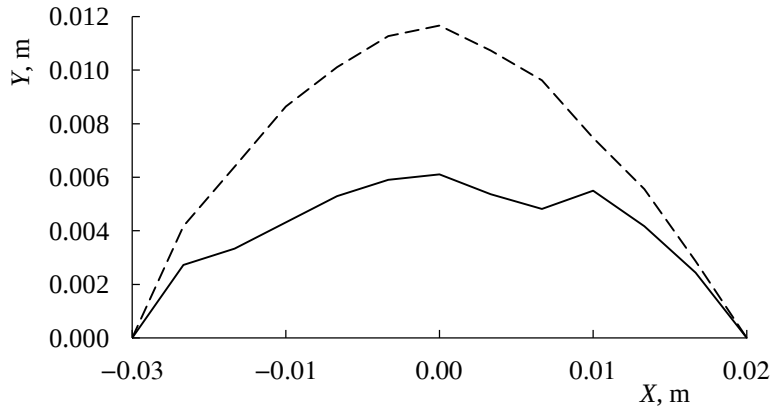


Рис.1. Динамическая апертура проектного виглера CANDLE, пунктирная линия соответствует случаю нулевой дисперсии.

для проектного виглера длиной 2.2 м, полем 3 Т и числом периодов 10 для генерации синхротронного излучения, так и для различных конфигураций дампинг виглеров (рис.1). Расчеты проводились с помощью программы трека частиц в ускорителях “ELEGANT” [8].

Проектный виглер предназначен для генерации интенсивного синхротронного излучения в жесткой области рентгеновского излучения. Расчеты показывают, что его наличие приводит к уменьшению эмиттанса пучка на 10% для бездисперсионного варианта магнитной системы и к увеличению эмиттанса на 5% для дисперсионного варианта магнитной системы ускорителя.

Для целевого сжатия эмиттанса рассмотрено влияние трех виглеров с полями в 2.5 и 3 Т и общей длиной 12 метров на эмиттанс и динамическую апертуру пучка. Для этих виглеров число периодов меняется от 20 до 200, что соответствует длине периода от 20 до 2 см. Результаты исследований приведены в табл.1. Как и предполагалось, наилучший эффект получается при малых периодах виглера, хотя при заданной длине виглер-магнитов их влияние на уменьшение эмиттанса незначительно. На рис.2 приведены динамические апертуры поперечных колебаний при различных режимах работы ускорителя.

Табл.1. Влияние виглеров на эмиттанс пучка в зависимости от периодов.

Число периодов	Виглер 2.5 Т	Виглер 3 Т
	Эмиттанс, нм рад	Эмиттанс, нм рад
20	11.81	10.75
50	11.75	10.54
80	11.74	10.53
200	11.72	10.52
Без виглера	16	16

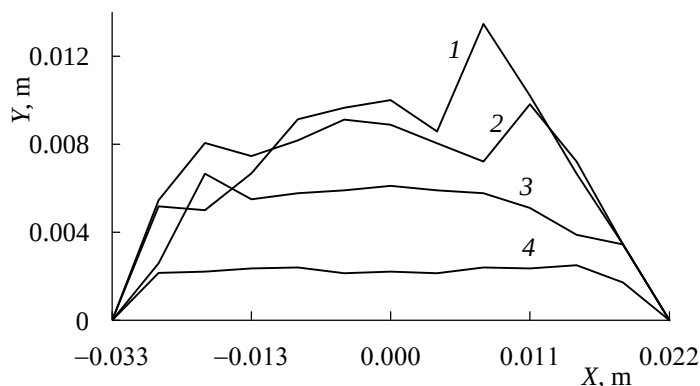


Рис.2. Динамическая апертура для 20 (1), 50 (2), 80 (3), 200 (4) периодов при мощности виглера 2.5 Т.

Как видно, при числе периодов виглер-магнита порядка 80 (длина периода 5 см) наблюдается резкое уменьшение динамической апертуры вертикальных колебаний. Поэтому наиболее оптимальным вариантом является виглер с полем 2.5 Т и длиной периода 8 см (50 периодов). При этом проектный эмиттанс уменьшается приблизительно в 1.4 раза.

Исследовано также поведение эмиттанса в зависимости от магнитного поля виглера. На рис.3 приведена зависимость эмиттанса пучка от поля виглер-магнита. Длина периода виглера составляет 15 см. Как видно из рисунка, при поле виглера в 5.7 Т достигается минимальный горизонтальный эмиттанс пучка, равный 7.4 нм рад, что приблизительно в два раза меньше проектного значения (16 нм рад) для бездисперсионной магнитной системы. Реализация такой схемы предполагает использование сверхпроводящих виглер-магнитов. Кроме того, необходимо иметь в виду существенное уменьшение вертикальной динамической апертуры ускорителя, что потребует дополнительных октупольных линз в кольце.

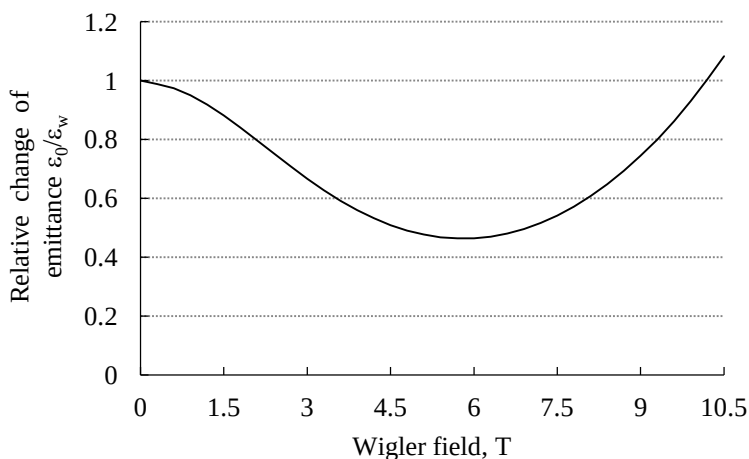


Рис.3. Зависимость относительного изменения эмиттанса от мощности виглера от 0.3 до 10 Т для периода 15 см. Минимальный эмиттанс 7.42 нм рад при 5.7 Т.

4. Заключение

Исследована возможность уменьшения горизонтального эмиттанса электронного пучка в накопительном кольце проекта “КЕНДЛ” с помощью демпфирующих виглер-магнитов. С помощью трека частиц в ускорителе исследована динамическая апертура поперечных колебаний для различных конфигураций виглер-магнитов. Анализ полученных результатов показывает, что уменьшение эмиттанса в 1.5 раза с сохранением достаточной апертуры поперечных колебаний достижимо с использованием виглер-магнитов с полем в 2.5 Т.

ЛИТЕРАТУРА

1. **H. Wiedemann.** Synchrotron Radiation. Springer, Berlin, 2003.
2. **V. Tsakanov, H. Wiedemann** (eds). Brilliant Light in Life and Material Sciences, Springer, Netherlands, 2007.
3. **M. Sands.** The Physics of Electron Storage Rings. SLAC-121, Stanford, USA, 1971.
4. **M. Borland, L. Emery.** Proc. Particle Accel. Conf. 2007, Albuquerque, USA, p.1124, 2007.
5. **M. Tischer et al.** Damping Wigglers at the Petra 3 Light Source. Proc. 11 European Particle Accel. Conf., Genoa, Italy, p. 2317, 2008.
6. **V. Tsakanov et al.** Rev. Sci. Instrum., **73**, 1411 (2002).
7. **H. Wiedemann.** Particle Accelerator Physics. Springer, Berlin, 2007.
8. **M. Borland.** Phys. Rev. STAB, **4**, 070701 (2001).

ՎԻԳԼԵՐ ՄԱԳՆԻՍԵՐԻ ՄԻՋՈՑՈՎ ՓՆՋԻ ԷՄԻՏԱՆՍԻ ՄԱՐՄԱՆ ԷՖԵԿՏԸ
«ՔԵՆԴԼ»-ԿՈՒՏԱԿԻՉ ՕՂԱԿՈՒՄ

S.L. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

Առաջարկվող աշխատությունում հետազոտվել է «ՔԵՆԴԼ» սինքրոտրոնային լույսի աղբյուրի պրոեկտի կուտակիչ օղակում փնջի էմիտանսի փոքրացման հնարավորությունը մագնիսական համակարգի ուղիղ, ազատ հատվածներում վիզեր մագնիսների օգտագործման միջոցով: Արագացուցչում մասնիկների վիրտուալ թողարկման միջոցով հաշվվել է վիզեր մագնիսների առաջացրած ոչ գծային տատանումների դինամիկ ապերտուրան և արաջարկվել հորիզոնական էմիտանսի զգալի փոքրացման օպտիմալ կոնֆիգուրացիա:

DAMPING VIGGLER EFFECT IN CANDLE STORAGE RING

T.L. VARDANYAN

In this paper discussed the possible improvements in emittance of “CANDLE” synchrotron light facility project storage ring that could result from the use of damping wigglers in drift spaces of accelerator magnetic structure. With particle track dynamic aperture of non linear oscillations caused by wiggler magnets is calculated. The optimal configuration for significant compression of the horizontal beam emittance is proposed.