

КОНСТРУКЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СПИРАЛЬНОГО ОНДУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДОМ

О. А. Шевченко^{а, 1}, Н. А. Винокуров^{а, б}, Я. В. Гетманов^{а, б}

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН ведутся работы по созданию нового плоского ондулятора с переменным периодом и увеличенной апертурой. Магнитные блоки этого ондулятора можно также использовать для создания спирального ондулятора с переменным периодом. Представлены результаты расчетов магнитного поля такого спирального ондулятора.

At the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, work is underway to create a new flat undulator with a variable period and an enlarged aperture. The magnetic blocks of this undulator can also be used to create a variable period spiral undulator. The results of calculations of the magnetic field of such a spiral undulator are presented.

PACS: 41.60.–m; 85.70.Ec

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН разрабатывается проект лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на электронном накопителе. Одним из главных узлов ЛСЭ является ондулятор. Так как высшие гармоники спонтанного ондуляторного излучения вызывают дополнительный нагрев зеркал оптического резонатора ЛСЭ, для ЛСЭ на электронном накопителе предпочтительно использование спирального ондулятора [1]. При этом большая часть мощности спонтанного излучения идет вне конуса с углом раствора $1/\gamma$, где γ — релятивистский фактор электронов. Поэтому для того чтобы все излучение выходило из вакуумной камеры ондулятора, апертура последней должна быть достаточно большой. Кроме того, большая апертура обеспечивает большую вакуумную проводимость и, следовательно, скорость откачки из длинной трубы.

Для изменения длины волны ондуляторного излучения предполагается применить конструкцию относительно нового типа — ондулятор с переменным периодом [2–4].

¹E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ БЕСКОНЕЧНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОДИНАКОВЫХ БЛОКОВ

Рассмотрим магнитное поле, создаваемое бесконечной последовательностью магнитных блоков, в которой каждый последующий блок получается из предыдущего путем смещения вдоль продольной оси z на расстояние a и поворота на угол ϕ вокруг этой оси. Очевидно, что скалярный потенциал этого поля удовлетворяет условию симметрии

$$\psi(r, \alpha, z) = \psi(r, \alpha - \varphi, z - a). \quad (1)$$

Здесь (r, α, z) — координаты точки в цилиндрической системе координат. Раскладывая потенциал в ряд Фурье по α и учитывая (1), получим следующее выражение (2):

$$\begin{aligned} \psi(r, \alpha, z) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_n(r, z) \exp[in\alpha] = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} v_{mn}(r) \exp \left[in \left(\alpha - \frac{\varphi}{a} z \right) + im \frac{2\pi}{a} z \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Здесь учтено, что $U_n(r, z) \exp(inz\varphi/a)$ — периодическая функция по z с периодом a . Накладывая на потенциал дополнительные условия симметрии

$$\psi(r, \alpha, z) = \psi(r, -\alpha, -z), \quad \psi \left(r, \frac{\pi}{2} + \alpha, z \right) = -\psi \left(r, \frac{\pi}{2} - \alpha, -z \right), \quad (3)$$

из (2) можно легко получить следующее окончательное выражение:

$$\psi(r, \alpha, z) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ v_{m,2n-1} \cos \left[(2n-1) \left(\alpha - \frac{\varphi}{a} z \right) + m \frac{2\pi}{a} z \right] \right\}. \quad (4)$$

Для того чтобы потенциал (4) был периодической функцией z , необходимо выполнение условия $\varphi = 2\pi p/q$, где p и q — целые числа. В этом случае период $\lambda_w = qa$.

Вблизи оси ондулятора из (4) для потенциала получается разложение

$$\psi(r, \alpha, z) \approx r \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_m \cos \left[\alpha + \left(m - \frac{p}{q} \right) \frac{2\pi}{a} z \right], \quad (5)$$

из которого можно легко найти поле на оси

$$B_r(0, \alpha, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_m \cos \left[\alpha + \left(m - \frac{p}{q} \right) \frac{2\pi}{a} z \right]. \quad (6)$$

В частном случае при $p = 1, q = 3$ из (6) получается поле (7), первая гармоника которого имеет круговую поляризацию и период $\lambda_w = 3a$, а следующей идет вторая гармоника с противоположным направлением поляризации:

$$\begin{aligned} B_r(0, \alpha, z) &= B_0 \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3a} z \right) + B_1 \cos \left(\alpha + 2 \frac{2\pi}{3a} z \right) + \\ &+ B_{-1} \cos \left(\alpha - 4 \frac{2\pi}{3a} z \right) + B_2 \cos \left(\alpha + 5 \frac{2\pi}{3a} z \right) + \dots \quad (7) \end{aligned}$$

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ОНДУЛЯТОРА

Для моделирования использовалась программа Radia [5]. Результаты представлены на рис. 1–4.

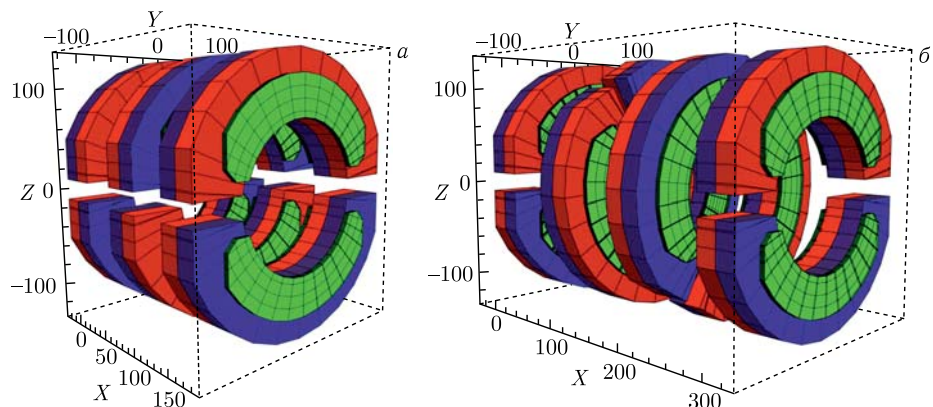


Рис. 1. Примеры ондуляторов, построенных из отдельных одинаковых блоков: а) плоский ондулятор; б) спиральный ондулятор

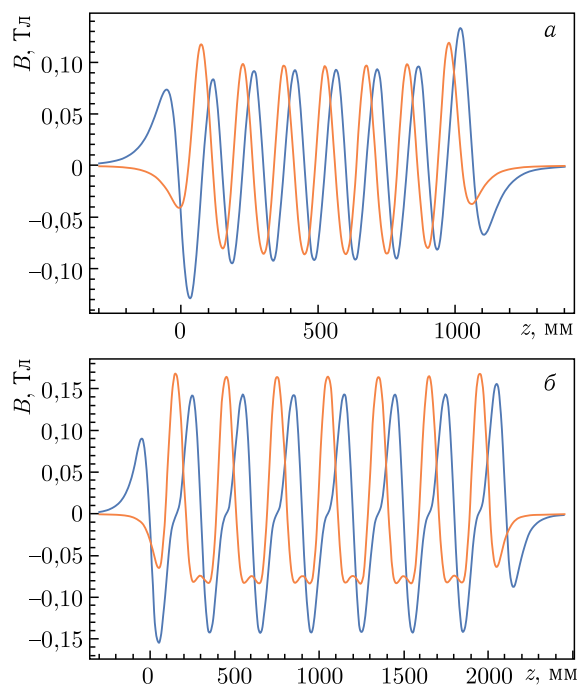


Рис. 2. Зависимость вертикальной и горизонтальной компонент магнитного поля от продольной координаты в спиральном ондуляторе: а) при минимальном (150 мм) и б) максимальном (300 мм) периодах

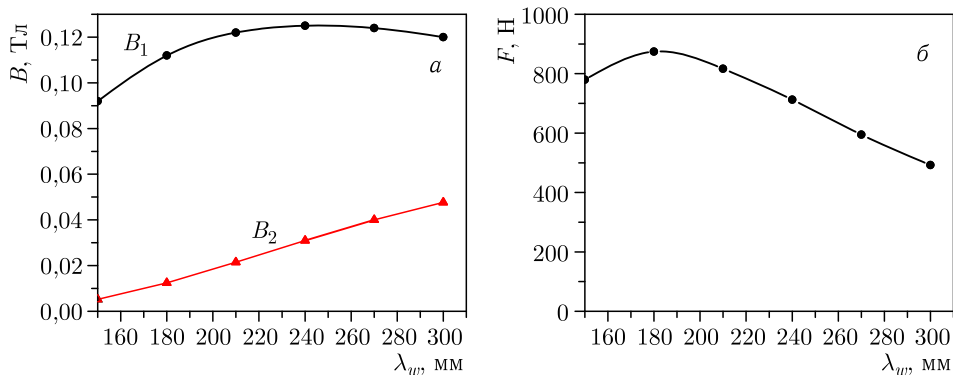


Рис. 3. Зависимость амплитуд первой и второй гармоник магнитного поля (а), а также силы расталкивания, действующей между соседними блоками (б), от периода

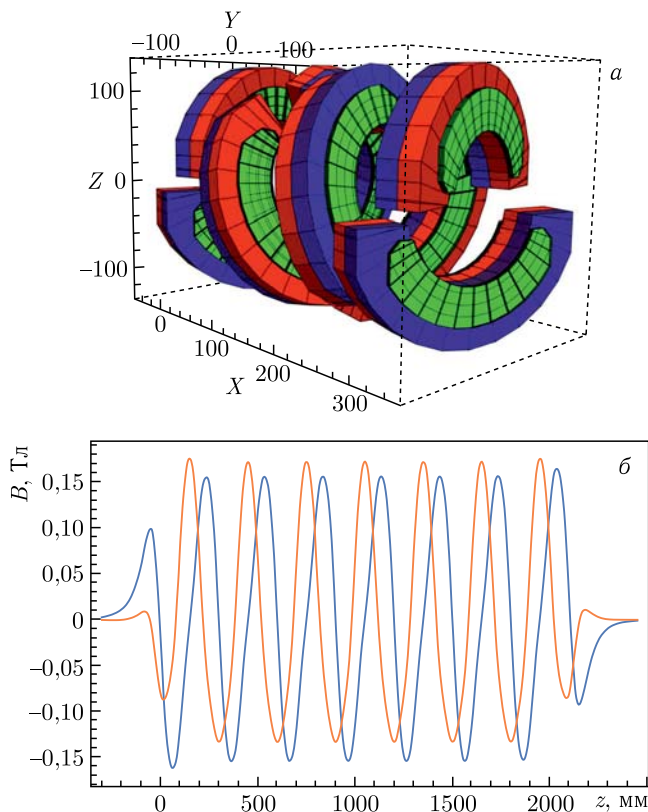


Рис. 4. Компенсация второй гармоники путем разворота верхней и нижней половинок магнитного блока друг относительно друга в случае больших периодов: а) оптимизированная геометрия ондулятора; б) распределение поля на оси. Для максимального периода 300 мм амплитуда второй гармоники может быть уменьшена с 40 до 15 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкция ондулятора, основанная на использовании отдельных одинаковых магнитных блоков, оказалась очень гибкой. Используя данный подход, можно построить ондулятор с переменным периодом и переменным числом периодов, а также ондулятор с регулируемой поляризацией магнитного поля. Конструкция такого ондулятора легко масштабируется на меньшие периоды, поэтому ее можно использовать в ондуляторах, предназначенных для коротковолновых источников излучения.

Некоторые технические проблемы еще предстоит решить. К ним относятся минимизация высших гармоник и более точный учет сил отталкивания. Еще одна проблема, которую необходимо решить, — это разработка механической конструкции, обеспечивающей вращение блоков.

Работа выполнена при поддержке исследовательской программы № 075-15-2021-1359 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vinokurov N. A.* Free Electron Lasers with Electron Storage Rings // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 308. P. 24–27.
2. *Vinokurov N. A., Shevchenko O. A., Tcheskidov V. G.* Variable-Period Permanent Magnet Undulators // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2011. V. 14. 040701.
3. *Vinokurov N. A., Levichev E. B.* Undulators and Wigglers for the Production of Radiation and Other Applications // Phys. Usp. 2015. V. 58, No. 9. P. 850–871.
4. *Davidyuk I., Shevchenko O. A., Tcheskidov V. G., Vinokurov N. A.* Magnetic and Mechanical Design of Large-Aperture Variable-Period Permanent Magnet Undulator // Nucl. Instr. Meth. A. 2019. V. 915. P. 36–39.
5. *Chubar O., Elleaume P., Chavanne J.* A Three-Dimensional Magnetostatics Computer Code for Insertion Devices // J. Synchrotron Radiat. 1998. V. 5, No. 3. P. 481–484.

Получено 18 ноября 2022 г.