

Научная статья

УДК 621.384.665

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-57-63

Разработка магнитной системы на постоянных магнитах для энергосберегающего источника синхротронного излучения*

**Шамиль Бахадирович Лачынов^{1,2}, Николай Александрович Винокуров^{1,2}
Владимир Георгиевич Ческидов¹**

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

proton7956@gmail.com

Аннотация

Для дальнейшего улучшения параметров источников синхротронного излучения можно использовать новые технологии. Одной из них является применение постоянных магнитов при создании элементов магнитной системы накопителя. Это поможет исключить влияние нестабильности электропитания и вибраций, вызванных работой системы охлаждения на стабильность положения электронного пучка. Кроме того, использование постоянных магнитов позволит увеличить апертуру вакуумной камеры и, таким образом, упростить вакуумную и инжекционную системы накопителя, а также увеличить пороговые токи неустойчивостей. Статья посвящена разработке двух поворотных магнитов, фокусирующего и дефокусирующего, из которых состоит регулярная часть магнитной системы энергосберегающего компактного источника синхротронного излучения. Представлены конструкция и результаты моделирования магнитного поля.

Ключевые слова

постоянные магниты, электронный накопитель, электронно-оптические системы, лазер на свободных электронах.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках программы № 075-15-2021-1359 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования

Лачынов Ш. Б., Винокуров Н. А., Ческидов В. Г. Разработка магнитной системы на постоянных магнитах для энергосберегающего источника синхротронного излучения // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 57–63. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-57-63

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Development of a Permanent Magnet Magnetic System for an Energy-Saving Synchrotron Radiation Source

Shamil B. Lachynov^{1,2}, Nikolay A. Vinokurov^{1,2}
Vladimir G. Cheskidov¹

¹Institute of Nuclear Physics named after G. I. Budkera
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk National Research State University
Novosibirsk, Russian Federation

proton7956@gmail.com

Abstract

New technologies can be used to further improve the parameters of synchrotron radiation sources. One of them is the use of permanent magnets when creating elements of the magnetic storage system. This will help eliminate the influence of power supply instability and vibrations caused by the operation of the cooling system on the stability of the electron beam position. In addition, the use of permanent magnets will make it possible to increase the aperture of the vacuum chamber and, thus, simplify the vacuum and injection systems of the storage device, as well as increase the threshold instability currents. This work is devoted to the development of two bending magnets, focusing and defocusing, which make up the regular part of the magnetic system of an energy-saving compact synchrotron radiation source. The design and results of magnetic field modeling are presented.

Keywords

permanent magnets, electron storage ring, electron-optical systems, free electron laser

Funding

The research was carried out under the program No. 075-15-2021-1359 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation

Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Cheskidov V. G. Development of a permanent magnet magnetic system for an energy-saving synchrotron radiation source. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 57–63 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-57-63

Введение

Источники рентгеновского излучения используются во многих областях науки и медицины. Для большинства пользователей требуется достаточная для их задач интенсивность излучения в заданном диапазоне длин волн на образце или входном окне экспериментальной станции. Кроме того, обычно требуется малая угловая расходимость излучения в каждой точке образца (равная поперечному размеру источника излучения, деленному на расстояние от источника до образца). Поэтому хороший источник излучения не только должен быть достаточно мощным, но и иметь малые поперечные размеры. В этом случае говорят, что источник имеет высокую яркость, которая определяется как мощность излучения, деленная на площадь (источника или коллимирующего отверстия) и на телесный угол, в котором идут лучи. Сейчас наиболее яркими лабораторными источниками рентгеновского излучения являются пучки электронов высокой энергии, проходящие через сильное поперечное магнитное поле и испускающие так называемое синхротронное излучение (СИ), а также лазеры на свободных электронах [1; 2]. Для создания таких источников может быть использован электронный пучок с малыми (менее 0,1 мм) поперечными размерами, циркулирующий в специальной установке – электронном накопителе.

С учетом того, что планируемые сейчас источники СИ будут работать через 10–20 лет, желательно существенно изменить (улучшить) их по сравнению с существующими. Одним из главных отличий нового источника излучения от существующих является отсутствие источников постоянного тока (и водяного охлаждения) у большинства элементов магнитной системы, использующих постоянные магниты. Разрабатываемые экспериментальные образцы

поворотных магнитов предназначены для проверки этого нового технического решения. Магнитные элементы такого типа можно применить для создания новых источников рентгеновского излучения и модернизации существующих электронных накопителей.

Магнитная система

Магнитовакуумная система накопителя с энергией 1,5 ГэВ состоит из двух длинных прямолинейных промежутков и двух полуколец. Регулярные части полуколец состоят из одинаковых пар магнитов – дефокусирующего, с углом поворота 9,5 градусов, полем 1 Тл и показателем спада 25, и фокусирующего, с углом поворота 2 градуса, полем $-0,4$ Тл и показателем спада 437,5.

Для достижения необходимых параметров магнитного поля оптимизировалась форма железных магнитопроводов. Оптимизированная форма магнитов показана на рис. 1 и 2.

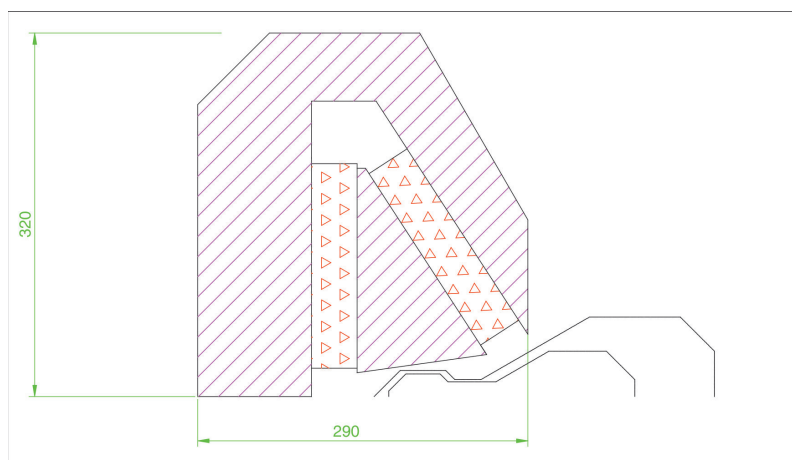


Рис. 1. Схема дефокусирующего магнита. Треугольная штриховка – постоянные магниты, косая – железный магнитопровод. Пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм

Fig. 1. Schematic of the defocusing magnet. Triangular hatching marks permanent magnets, oblique one marks the iron yoke. Dotted lines show aluminum vacuum chamber with vertical gap of 40 mm

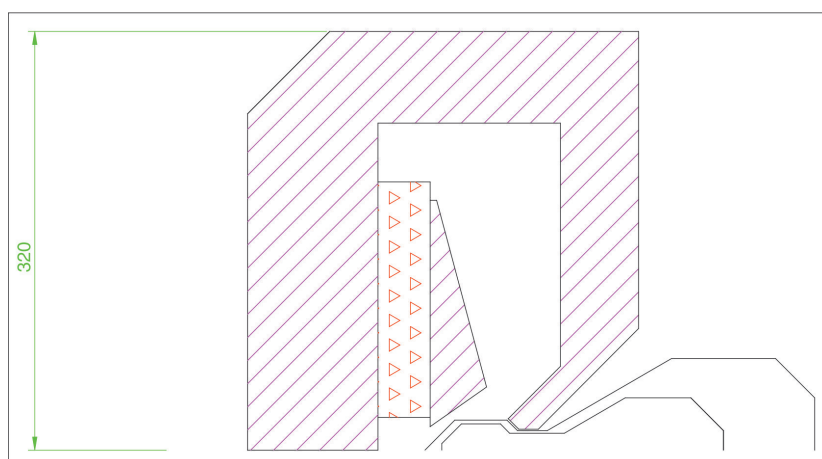


Рис. 2. Схема фокусирующего магнита. Треугольная штриховка – постоянные магниты, косая – железный магнитопровод. Пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм

Fig. 2. Schematic of the focusing magnet. Triangular hatching marks permanent magnets, oblique one marks the iron yoke. Dotted lines show aluminum vacuum chamber with vertical gap of 40 mm

Результаты расчетов магнитного поля в оптимальных вариантах магнитов, показанных на рис. 1 и 2, приведены на рис. 3 и 4.

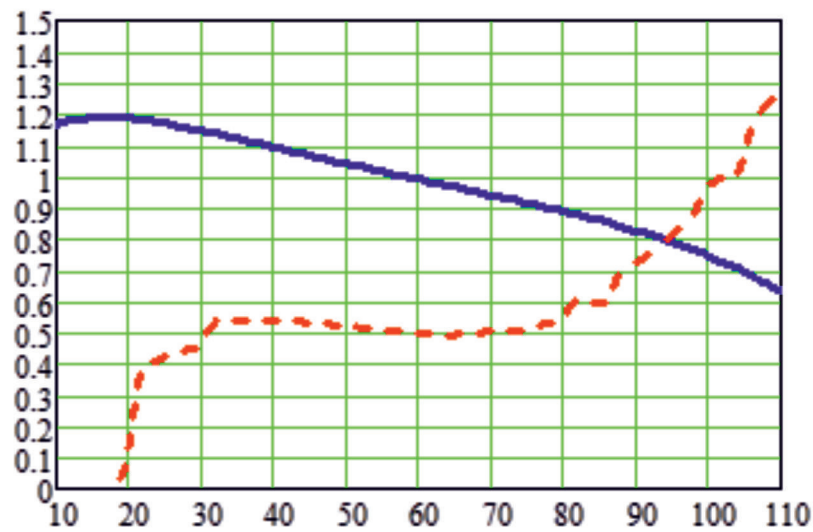


Рис. 3. Зависимость поля (Тл, сплошная линия) и фокусирующего «градиента», деленного на 10 и взятого с обратным знаком (Тл/м, пунктирная линия) дефокусирующего магнита от горизонтальной поперечной координаты (мм)

Fig. 3. Dependence of the field (T, solid line) and the focusing “gradient”, divided by 10 and taken with the opposite sign, (T/m, dotted line) of the defocusing magnet on the horizontal transverse coordinate (mm)

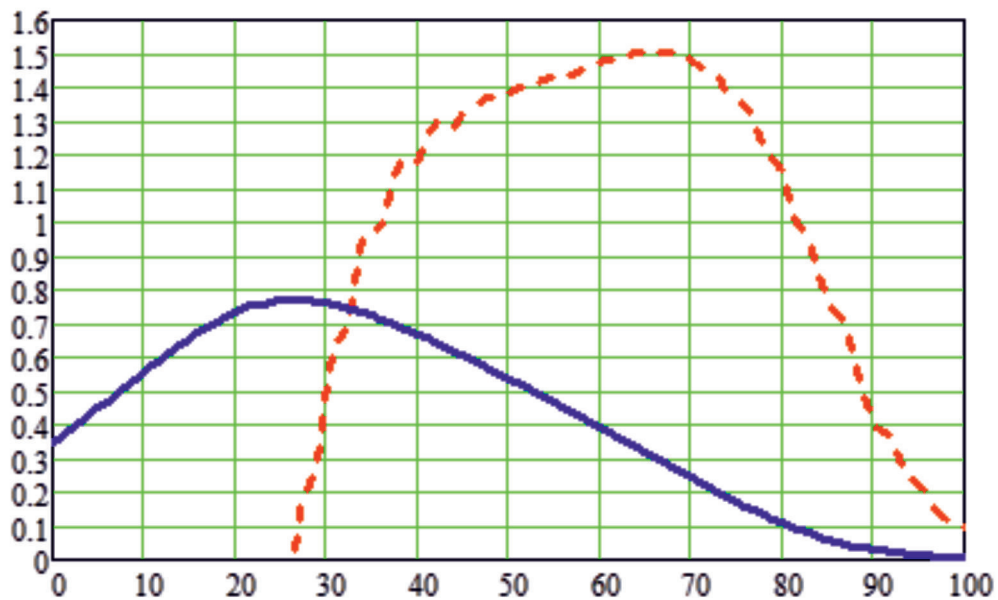


Рис. 4. Зависимость поля, взятого с обратным знаком (Тл, сплошная линия) и фокусирующего «градиента», деленного на 10 (Тл/м, пунктирная линия) фокусирующего магнита от горизонтальной поперечной координаты (мм)

Fig. 4. Dependence of the field taken with the opposite sign (T, solid line) and the focusing “gradient” divided by 10 (T/m, dotted line) of the focusing magnet on the horizontal transverse coordinate (mm)

Как показано на рис. 4, фокусирующий «градиент» $\partial B_y / \partial x$ в рабочей области (50–70 мм) растёт с ростом поперечной горизонтальной координаты x , причем $\partial^2 B_y / \partial x^2 \approx 50$ Тл/м². Такой секступоль служит для снижения абсолютной величины горизонтального хроматизма.

Эскизы механической конструкции поворотных магнитов

Общие виды поперечных сечений магнитов показаны на рис. 5 и 6.

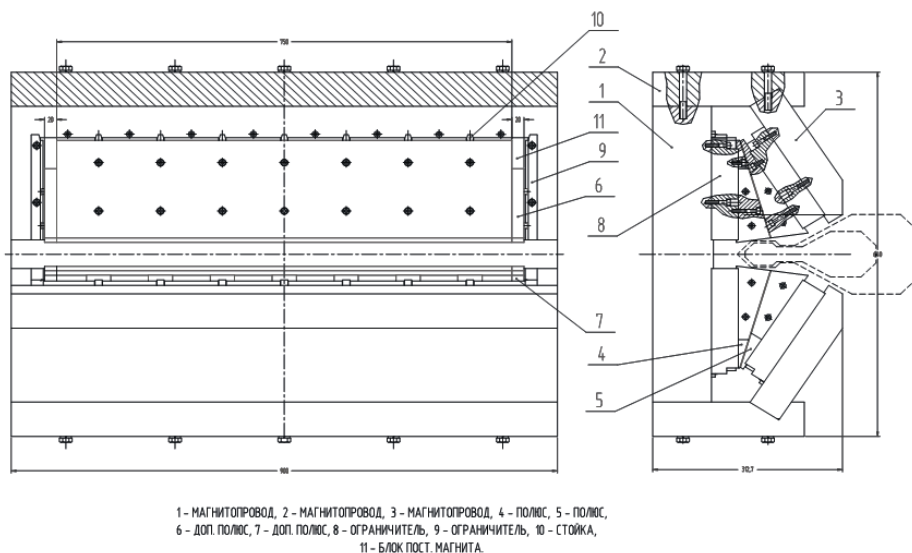


Рис. 5. Общий вид дефокусирующего магнита. Справа – поперечное сечение, на котором пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм
Fig. 5. General view of the defocusing magnet. On the right is a cross-section, in which the aluminum vacuum chamber with a vertical gap of 40 mm is shown as a dotted line

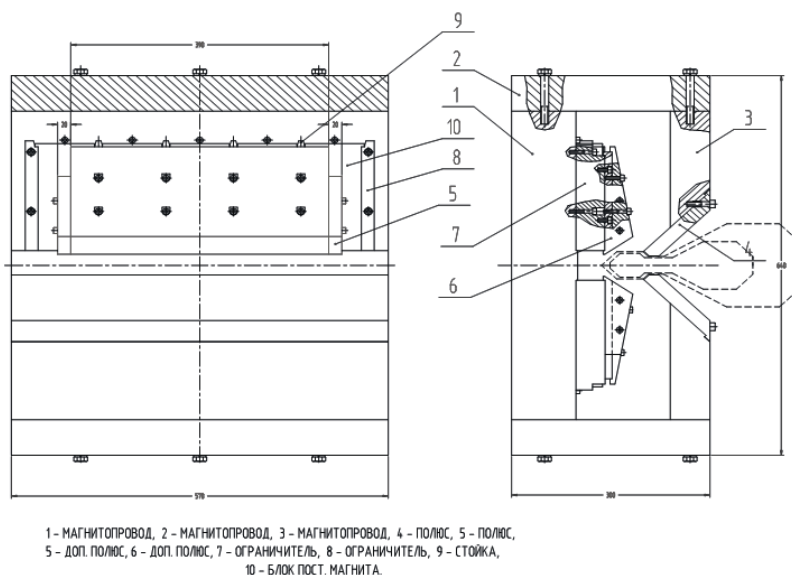


Рис. 6. Общий вид фокусирующего магнита. Справа – поперечное сечение, на котором пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм
Fig. 6. General view of the focusing magnet. On the right is a cross-section, in which the aluminum vacuum chamber with a vertical gap of 40 mm is shown as a dotted line

Для получения магнитного поля используются плитки из материала неодим-железо-бор $90 \times 90 \times 40$ мм³. Каждая плитка магнитного материала притягивается к железному магнитопроводу с силой около 3 кН. Поэтому для облегчения сборки каждый железный полюс поворотных магнитов разделен на две части, правую и левую, как показано на рис. 5 и 6. При сборке часть полюса закрепляется на основном магнитопроводе, а затем плитка магнитного материала вставляется в зазор между двумя железными деталями – основным магнитопроводом и половиной полюса. В фокусирующем магните разделение полюсов позволяет скорректировать поле в рабочем зазоре без полной разборки магнита.

Кроме того, на входной и выходной частях полюсов имеются съемные железные накладки толщиной 20 мм (см. левые части рис. 5 и 6). Их замена на накладки другой толщины позволяет скорректировать магнитную длину по результатам измерения магнитного поля.

Основные параметры поворотных магнитов

Дефокусирующий магнит поворачивает электроны с энергией 1,5 ГэВ на угол $9,5^\circ$, а фокусирующий – на угол -2° . Таким образом, каждое полукольцо накопителя представляет собой последовательность поворотов на $7,5^\circ$ с фокусирующей системой ФОДО и средним радиусом 26,55 м. Основные параметры поворотных магнитов представлены в таблице.

Основные параметры поворотных магнитов

Basic parameters of bending magnets

Магнит	Фокусирующий	Дефокусирующий
Угол поворота при энергии электронов 1,5 ГэВ, град	-2	9,5
Магнитное поле, Тл	-0,4	1
Фокусирующий градиент, Тл/м	13,7	-5,0
Магнитная длина, м	0,436	0,829
Вертикальная апертура, мм	50	46
Длина, м	0,57	0,9
Ширина, м	0,3	0,313
Высота, м	0,64	0,64
Масса, кг	600	1000

После изготовления в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН детали экспериментальных образцов поворотных магнитов будут доставлены в лабораторию для сборки. После сборки будут проведены измерения магнитного поля и сравнение результатов измерений с расчетными значениями.

Заключение

Энергосберегающие недорогие и простые в обращении источники рентгеновского излучения могут быть построены при больших университетах и использоваться для мультидисциплинарных исследований и обучения студентов и аспирантов. Наличие таких источников качественно изменит уровень научно-технологических разработок в больших университетах, так как последние не только получают постоянный доступ к излучению, но и смогут модернизировать свои источники в соответствии с потребностями конкретных экспериментов с использованием рентгеновского излучения.

Список литературы

1. **Винокуров Н. А., Левичев Е. Б.** Ондюляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений // УФН. 2015. Т. 185, № 9. С. 917–939.
2. **Винокуров Н. А., Шевченко О. А.** Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН // УФН. 2018. Т. 188, № 5. С. 493–507.

References

1. **Vinokurov N. A., Levichev E. B.** Undulators and wigglers for production of radiation and other applications. *Phys. Uspekhi*, 2015, vol. 58 (9), pp. 850–871. (in Russ.)
2. **Vinokurov N. A., Shevchenko O. A.** Free electron lasers and their development at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS. *Phys. Uspekhi*, 2018, vol. 61, pp. 435–448. (in Russ.)

Сведения об авторах

Лачынов Шамиль Бахадирович, аспирант, инженер-исследователь

Винокуров Николай Александрович, профессор, заведующий лабораторией

Ческидов Владимир Георгиевич, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Shamil B. Lachynov, Postgraduate student, Researcher-Engineer, Assistant Lecturer

Nikolay A. Vinokurov, Professor, Head of the Laboratory

Vladimir G. Tscheskidov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;
принята к публикации 25.04.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023;
accepted for publication 25.04.2024*