

ДИПОЛИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹© 2025 г. И. В. Кильметова^а,*, Т. В. Кулевой^а, О. С. Сергеева^а, В. С. Скачков^а^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

* e-mail: irina.kilmetova@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

Обсуждаются возможные конструкции ондуляторной структуры на постоянных магнитах с переменным полем. В качестве материала был выбран редкоземельный (Rare Earth Permanent Magnet – REPM) сплав Nd-Fe-B, который имеет значительно более высокую остаточную намагниченность по сравнению со сплавом Sm-Co и способен обеспечить повышенную коэрцитивную силу. Среди наиболее эффективных конструкций, помимо гибридного дипольного магнита, на практике предпочтительно использовать неявный мультиполь как секторного, так и стержневого типа, а также изготовленный по технологии QSM. В работе представлены спектры распределения продольного поля в регулярной части различных ондуляторных структур.

DOI: 10.7868/S3034564225070207

1. ВВЕДЕНИЕ

В НИЦ “Курчатовский институт” планируется создать источник синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения с лазером на свободных электронах (СИЛА) [1]. Установка СИЛА представляет собой многопользовательскую междисциплинарную установку класса мегасайенс для исследований в ряде областей физики, химии, кристаллографии, материаловедения, биологии и медицины. Разрабатываемая ускорительная установка по своим характеристикам превосходит существующие в настоящее время накопители электронов: она предполагает чрезвычайно низкий горизонтальный эмиттанс (порядка $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$) пучка с энергией 6 ГэВ. При длине сгустка 3.4 мм это обеспечит минимальный размер источника СИ с высокой степенью когерентности и яркости, а расходимость составит всего около 1 мкрад.

В экспериментальном зале источника СИЛА предполагается разместить исследовательские станции и лаборатории. Основным типом

источников, планируемых для экспериментальных станций, являются ондуляторы *in-air* на редкоземельных постоянных магнитах (REPM) с периодом структуры $\lambda_u = 27\text{--}45 \text{ мм}$. Для некоторых станций потребуются ондуляторы *in-vacuum* с короткими периодами около 14–18 мм, а также вигглеры с высоким полем и короткие поворотные магниты. В табл. 1 приведены параметры основного типа ондуляторов на постоянных магнитах.

Таблица 1. СИЛА: параметры ондулятора U-27 [1]

REPM	Nd-Fe-B
Межполюсный зазор D_{ap} , мм	12
Количество периодов N_{per}	59
Период λ_u , мм	27
Поле в максимуме B_{max} , Тл	0.556
Энергия СИ, кэВ	6.386
Длина структуры L_u , мм	1593

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

2. АНАЛИЗ REPM-СИСТЕМ

Постоянный магнит из сплава Nd-Fe-B, который имеет значительно большую остаточную намагниченность $\mu_0 I$ по сравнению со сплавом Sm-Co, способен обеспечить также и повышенную коэрцитивную силу, что и определило наш выбор его в качестве материала для магнитных элементов ондулятора.

Среди наиболее эффективных конструкций, помимо гибридной системы, включающей в себя полюса из магнитомягких материалов, предпочтительно использовать неявнополюсную систему секторного или стержневого типа Split-pole семейства [2–5]. Разновидностью конструкций этого типа является система с бесконечным числом полюсов, вытянутая вдоль двух прямолинейных последовательностей магнитов [6]. Рассматриваемые здесь диполи выполнены по QSM-технологии [7].

В качестве объекта сравнения выбрана общеизвестная структура, внешний вид которой схематично представлен на рис. 1, где показаны пять периодов, построенных чередованием пар магнитов, образующих простейший диполь. (Стрелки обозначают правило изменения намагниченности в цепочках элементов магнитной структуры.) В такой системе возможно применение железного ядра снаружи, хотя в рамках системы Split-pole с ростом числа магнитов на период его эффективность быстро падает.

Ширину магнитных элементов в этой структуре в целях наращивания поля обычно выбирают в несколько раз больше, чем межполюсный зазор. Такой подход приводит к возрастанию поперечного размера ондулятора, а эффективность использования постоянных магнитов на их краях, удаленных от рабочей области, оказывается низкой. Высокая дискретность таких систем в продольном распределении намагниченности является причиной появления в фурье-разложении поля гармоник более высокого порядка. Поэтому более высокая эффективность REPM-структуры в виде цепочки одинаковых магнитов с периодически чередующейся намагниченностью в продольном направлении проявляется в отсутствие требования моногармоничности спектра. В этом случае присутствие обертонов поля либо некритично, либо является неотъемлемым целевым параметром ондулятора.

При дискретности структуры, равной двум REPM-магнитам на период, и небольшом зазоре

D_{IM} между магнитами, фурье-разложение поля содержит, помимо доминирующей гармоники $n = 1$, еще и гармонику более высокого порядка частоты $n = 3$. Ее величина составляет порядка 1–2% от амплитуды основной, а пятая гармоника практически пренебрежимо мала.

Периодические структуры на упомянутых сосредоточенных диполях, включая систему QSM, весьма компактны. У них, в отличие от, например простейшей (рис. 1), источники магнитного поля окружают рабочую область вплоть до медианной плоскости. Однако они суще-

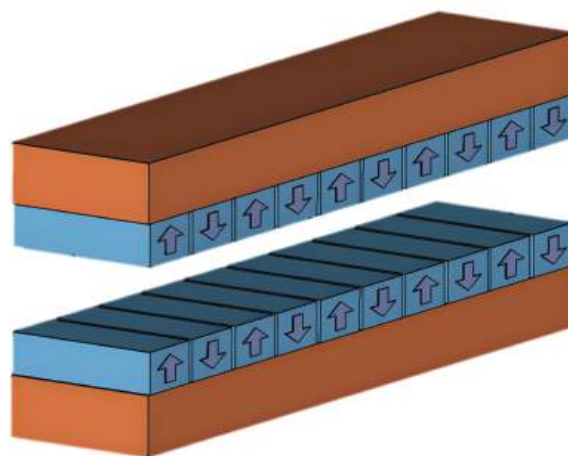


Рис. 1. Схема ондуляторной структуры на простейших диполях.

ственно усложняются для практики, когда необходимо обеспечить более плавное распределение намагниченности в продольном направлении из-за большого числа изменений геометрии магнитных элементов и в целом дипольной сборки. Исключением является стержневая система, которая благодаря унификации ее магнитных элементов еще сохраняет способность достаточно эффективно аппроксимировать плавное продольное распределение “силы” диполя.

3. СЕМЕЙСТВО КОНСТРУКЦИЙ QSM

Рассмотренные ниже REPM-диполи и примеры коротких секций периодической структуры на таких диполях рассчитаны и проанализированы в предположении, что концевые магниты ондулятора удалены и не дают своего вклада в поле, а период структуры принят в соответствии со спецификацией ондулятора U-27 установки СИЛА (табл. 1). Параметры расчетных моделей даны в табл. 2.

Таблица 2. Общие параметры REPM-диполей

Параметр	Значение
$\mu_0 I$, Тл	1.3
D_{ap} , мм	14
D_{IM} , мм	1
$L = \lambda_u/2 - D_{IM}$, мм	12.5

Обобщенное уравнение профиля ярма QSM $r_p(\varphi)$ произвольной мультипольности $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ и магнитного поля B , возбуждаемого диполем в случае $k = 1$, в цилиндрических координатах имеют вид:

$$\frac{1}{k} \frac{b_0}{\mu_0 I} r_p^k \sin k\varphi = r_p \cos(\varphi - \psi) + C,$$

$$B = \mu_0 I \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где b_0 – масштабный коэффициент, C – константа интегрирования, α и ψ – углы, которые профиль и намагниченность составляют с осью x соответственно.

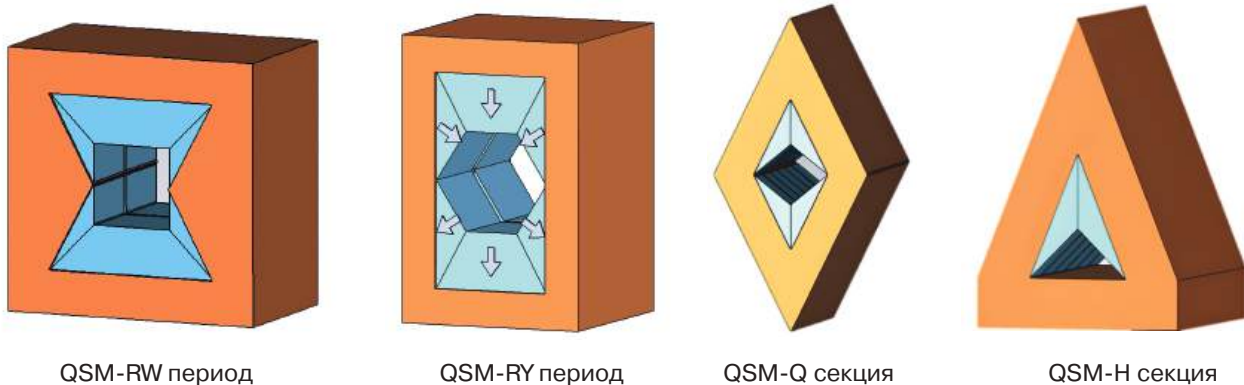
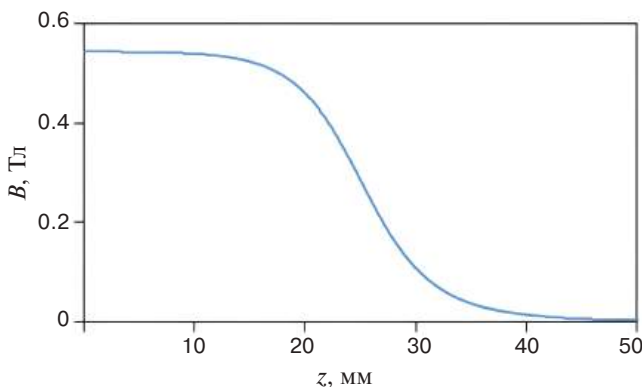
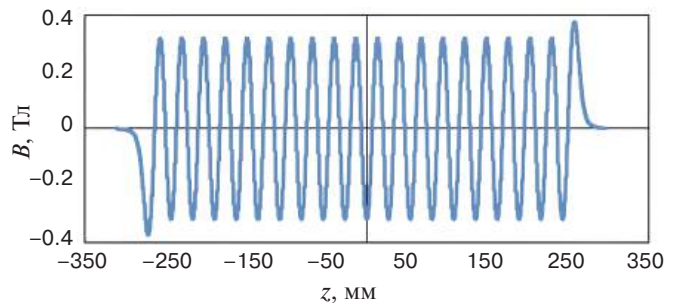
На рис. 2 показаны лишь некоторые исполнения периодических структур на магнитных

системах QSM. Все диполи этого семейства в случае бесконечной длины возбуждают идеальное однородное поле (1) во всем пространстве внутри ярма, окружающего снаружи постоянные магниты [7]. Так в центре одиночного диполя QSM-Q конечной длины при апертуре $D_{ap} = 14$ мм может быть достигнуто поле, близкое к однородному, величиной $B_{max} = 0.55$ Тл, а при длине магнита 50 мм оно распределено в продольном направлении, как показано на рис. 3.

Существенное отличие этих систем от наиболее распространенных, простейших, показанных на рис. 1, в том, что магнитный материал окружает рабочую область со всех сторон и только отношение D_{ap}/λ_u является фактором, ответственным за снижение поля в экстремумах.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЯ ОТ ДЛИНЫ ПЕРИОДА И ШИРИНЫ СТРУКТУРЫ

Так в периодической структуре $N_{per} = 20$, $L_u = 540$ мм с теми же диполями QSM-Q распределение поля имеет вид, показанный на рис. 4; $B_{max} = 0.32$ Тл.

**Рис. 2.** Разновидности периодических структур на магнитах QSM-системы.**Рис. 3.** Типичное распределение поля в одиночном QSM-диполе конечной длины.**Рис. 4.** Типичное распределение поля в ондуляторной секции QSM-Q-диполей.

Если фиксировать ширину рабочей области в медианной плоскости, то экстремальное поле на оси ондулятора с QSM-диполями падает с уменьшением периода, особенно когда $\lambda_u/2 \sim D_{ap}$. На рис. 5 эта зависимость показана в диапазоне изменения периода $\lambda_u = 20\text{--}60$ мм.

Напротив, если при фиксированном D_{ap}/λ_u уменьшать ширину w рабочей области в медианной плоскости, то экстремальное поле на оси ондулятора с QSM-диполями возрастает, особенно когда $\lambda_u/2 \sim w$. На рис. 6 эта зависимость показана в диапазоне изменения ширины $w = 10\text{--}30$ мм.

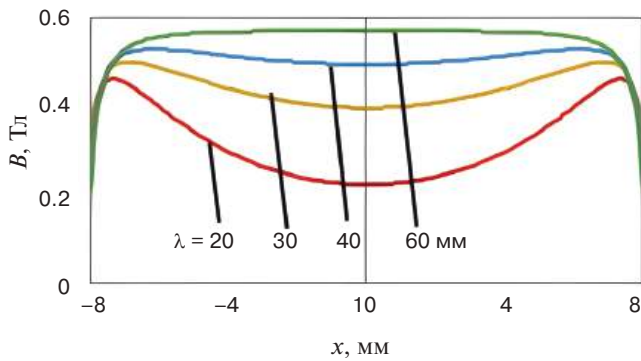


Рис. 5. Падение максимума осевого поля ондулятора при уменьшении периода.

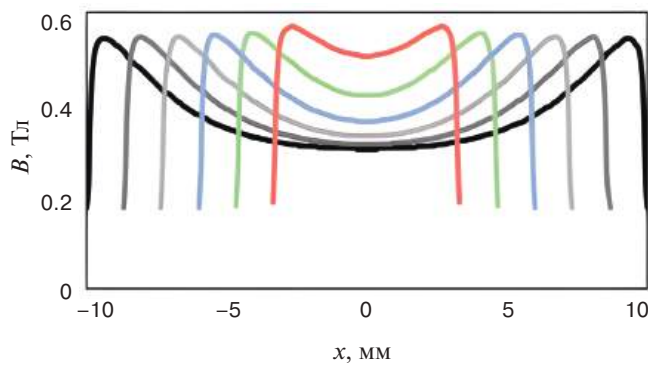


Рис. 6. Возрастание осевого поля в экстремуме по мере сужения ширины рабочей области w .

Экстремум поля, возникающий вблизи $x = 0$, имеет форму седла, причем полный перепад величины поля в рассмотренном диапазоне составляет не менее чем полтора раза. Этот механизм позволяет противостоять снижению поля в окрестности седла при уменьшении периода, причем непостоянство поля здесь составляет менее 0.02% в пределах площади шириной $\Delta x = \pm 100$ мкм (примерно 5-кратный диаметр пучка e^-).

5. ГАРМОНИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Гармонические спектры идеализированных моделей простых и ондуляторных QSM-структур схожи и содержат короткий список гармоник высших порядков: кроме доминирующей первой, а также третьего обертона на уровне 1–2% от первой, присутствуют лишь следы других гармоник высшего порядка.

Отклонение поля периодической структуры на QSM-диполях от точного синусоидального поведения амплитуды B_{max} индицирует появление около 1–2% несовершенства, являющегося вкладом гармоник более высокого порядка (рис. 7).

Сравнение спектра амплитуд поля на оси структуры с QSM-диполями, изображенного левыми столбиками на рис. 8, со спектром поля простейшей структуры, показанной на рис. 8 (правые столбики) показывает их полную идентичность.

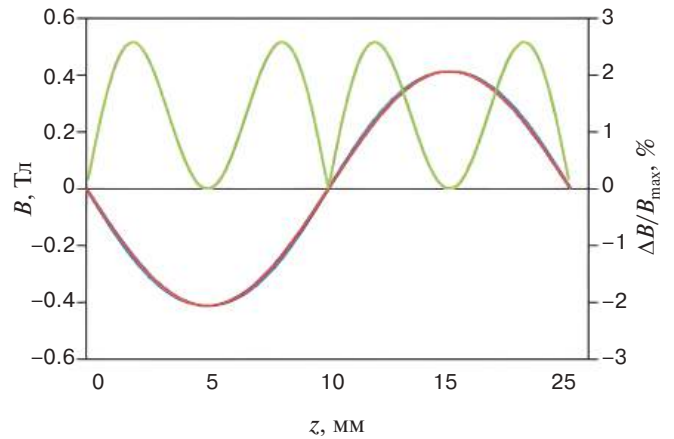


Рис. 7. Типичное распределение поля на периоде QSM-ондулятора и отклонение от строго синусоидального правила.

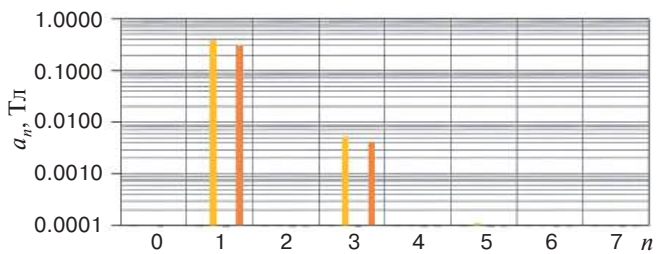


Рис. 8. Спектры структур на QSM–RWR-диполях и на простейших диполях.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Периодическая структура ондулятора с QSM-диполями обладает компактностью. Благодаря гибкости конструкции QSM-диполя возможно оптимизировать структуру ондулятора по величине поля в окрестности седла, либо укоротить период структуры λ_u . При длине периода $\lambda_u = 27$ мм можно обеспечить поле до $B_{\max} = 0.5$ Тл и более. Вариация поля в окрестности седла периодической QSM-структуры составляет менее 0.01% от B_{\max} благодаря малому сечению электронного пучка. Содержание гармоник высшего порядка неоптимизированных QSM-структур – такого же порядка, что и у простых структур с дискретностью, равной 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kovalchuk M.V., Blagov A.E., Marchenkov N.V., Senin R.A., Targonski A.V.* // J. Cryst. 2022. V. 67. P. 726.
<https://doi.org/10.31857/S0023476122050071>
2. *Герберг А.Н., Мухо С.Б., Рабинович Я.Д., Скачков В.С.* // ПТЭ. 1980. № 1. С. 49.
3. *Скачков В.С.* // ПТЭ. 1980. № 3. С. 34.
4. *Скачков В.С.* // ПТЭ. 1980. № 3. С. 37.
5. *К. Halbach.* // NIM. 1980. V. 169. P. 1.
6. *Halbach K., Chin J., Hoyer E., Winick H., Cronin R., Yang J., Zambre Y.A.* Permanent Magnet Undulator For SPEAR, PAC-1981.
7. *Skachkov V.S.* // NIM A. 2003. V. 500. № 1-3. P. 43.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01991-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01991-5)