

Прототип дипольного магнита для источника синхротронного излучения АНКА

В.Л. Васильев, В.С. Кашихин, Ю.А. Мясников, А.В. Никифоровский,
Б.Н. Рождественский, Ю.П. Севергин, А.С. Сударушкин, Н.А. Шатиль, И.А. Шукейло
НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, С-Петербург, Россия

Источник синхротронного излучения АНКА [1] для Центра ядерных исследований в Карлсруэ является накопителем электронов с энергией 2.5 ГэВ, током пучка 100 мА и с критической длиной волны излучения 0.2 нм. Накопительное кольцо состоит из диполей и квадруполей. Прототип дипольного магнита был изготовлен в НИИ ЭФА им. Д.В.Ефремова (Россия) и передан в Карлсруэ (Германия) в конце июня прошлого года. Для снятия карты магнитного поля был оборудован стенд магнитных измерений распределения поля с помощью датчиков Холла. Для измерения гармонического состава интегрального поля использовалась система вращающихся катушек. Приведены результаты измерений.

Введение

Конструкция магнитов источника синхротронного излучения АНКА (рис. 1) определяется следующими соображениями: 1) низкое энергопотребление; плотность тока в катушках 4.8 А/мм²; 2) используется рейстрековая конфигурация катушек, поскольку она дешевле катушек, имеющих седлообразную форму; 3) высокая точность поля в рабочей области радиусом 25 мм. Расчеты поля были проведены в двумерном приближении с помощью программы POISSON. Магнитные измерения были выполнены методом гармонического анализа с помощью коротких катушек. Распределение магнитного поля также было промерено датчиками Холла.

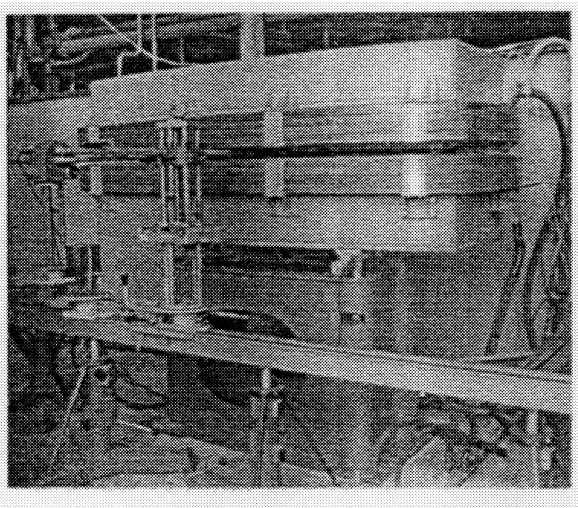


Рис. 1: Прототип основного дипольного магнита и стенд магнитных измерений.

Конструкция магнита

Табл. 1 содержит проектные параметры дипольного магнита [1], а на рис. 2 и 3 представлены его общие виды. Магнит С-образного типа имеет шихтованный магнитопровод, набранный из листовой стали, и водоохлаждаемую обмотку из медного проводника квадратного сечения с отверстием. Высота зазора между магнитными полюсами составляет 50 мм с учетом размера вакуумной камеры и технологических зазоров.

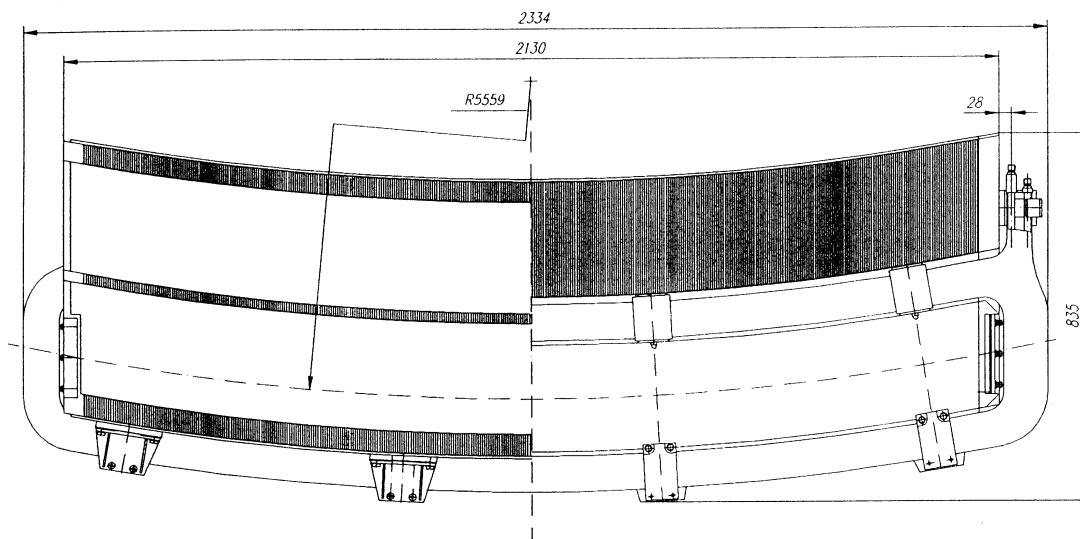


Рис. 2: Вид магнита сверху.

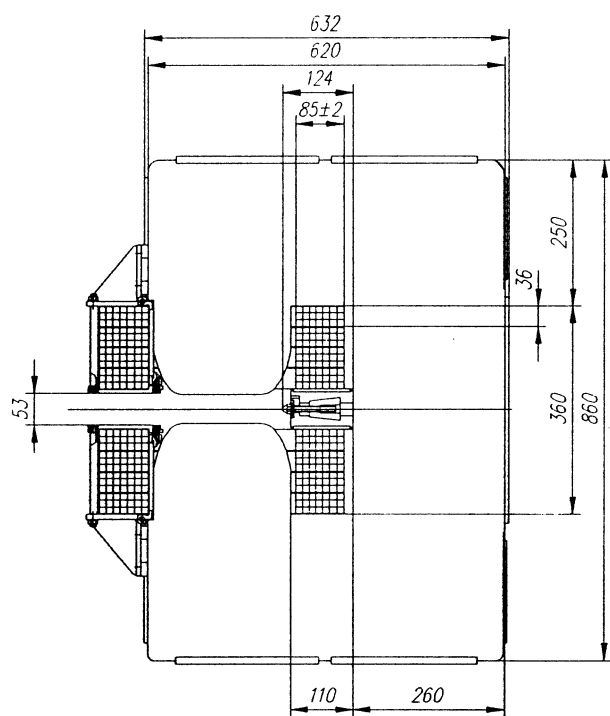


Рис. 3: Вид сбоку и конфигурация обмотки магнита.

Таблица 1.

Список параметров дипольного магнита накопительного кольца при 2.5 ГэВ.

Наименование	
Тип	C-тип, изогнутый
Угол поворота	$22 \cdot 5^\circ$
Индукция	1.5 Т
Воздушный зазор по орбите	50 мм
Радиус кривизны	5.559 м
Ширина рабочей области	50 мм
Высота рабочей области	40 мм
Неоднородность магнитного поля в рабочей области	$\leq \pm 5 \cdot 10^{-4}$
Ток	780 А
Падение напряжения	32 В
Число витков	80
Число секций	8
Проводник медный	15 мм × 15мм ∅ 7.3 мм
Перепад давления по воде	1 МПа
Расход воды	53 л/мин
Число контуров охлаждения	8
Вес магнитопровода	7600 кг
Вес обмотки	870 кг

При проектировании магнитопровода была проведена большая серия расчетов поля по программе POISSON. Форма полюса оптимизировалась так, чтобы минимизировать его базовую ширину, сохраняя требуемое качество поля и не допуская насыщения магнитопровода. Ширина основания полюса составляет 240 мм, что дает среднюю магнитную индукцию 1.5 Т при максимальном токе в обмотках возбуждения.

Магнитопровод

Магнитопровод магнита шихтованный из холоднокатанной низкоуглеродистой стали толщиной 1.5 мм, которая широко использовалась при изготовлении магнитов УНК [2]. Магнит имеет криволинейную форму с радиусом 5559 мм и набирался путем параллельного смещения листов стали.

Для сборки магнитопровода использовался специальный сборочный стенд. Пластины собирались по задней стороне вдоль брусьев, точно обработанных в соответствии с требуемой кривизной. Правильное размещение пластин обеспечивалось установкой системы изогнутых стальных секторов внутри области воздушного зазора магнитопровода. На концах магнитопровода устанавливались толстые торцевые пластины из той же стали. Торцевые пластины, шихтовка и пластины по бокам магнита сваривались друг с другом образуя монолитную структуру магнитопровода.

Штамповка производилась 500-тонным гидравлическим прессом. Отклонения профиля полюса от идеального контура вдоль края полюсного наконечника были менее 30 мкм. После сборки магнитопровода пакет листов опрессовывался с помощью шести 25-тонных гидравлических домкратов в горизонтальном положении. Поскольку пакеты симметричны относительно медианной плоскости, они периодически обстукивались вблизи центральной линии для снижения технологических ошибок.

Торцевая пластина магнитопровода имеет специальную конструкцию, которая позволяет изменять эффективную длину магнита посредством установки или удаления дополнительных слоев корректирующих пластин.

Обмотки

Обмотки дипольного магнита состоят из четырех плоских секций и размещаются на каждом из полюсов. Обмотки изготовлены из 15 мм медной шины квадратного сечения с каналом охлаждения диаметром 7.3 мм. Межвитковая и корпусная изоляция выполнены из стеклоленты. После намотки обмотки и ее проверки она заливается компаундом в вакуумно плотной пресс-форме под давлением. Окончательное отверждение эпоксидной смолы происходит в электрической печи. Все секции были тщательно испытаны. Каждая катушка за исключением выводных концов была погружена в воду. Постоянное напряжение величиной 10 кВ прикладывалось между выводами и ванной с водой в течение одной минуты. После завершения этих тестов каждая катушка была запитана током с целью нагрева ее до 70°C и затем охлаждена. Термоциклирование для испытания изоляции повторялось 50 раз.

Система измерения магнитного поля

Измерения магнитного поля были проведены оборудованием двух различных типов. Первый — это система датчиков Холла для измерения в средней плоскости магнита. Второй представляет собой измерительное устройство по определению интегральной гармонической компоненты для различных областей прототипа.

Определялось распределение магнитного поля вдоль теоретической орбиты ($R = 5.559$ м) и вдоль других орбит, имеющих радиус $R + \delta R$ (где $\delta R = \pm 0.01; \pm 0.025$ м). Такие измерения были проведены на четырех уровнях магнитного поля. Эти уровни составляли 0.18; 0.5; 1.3 и 1.5 Т. Интегральные поля для различных орбит были определены численным интегрированием по измеренным точкам. Система датчиков Холла обеспечивала относительную воспроизводимость $5 \cdot 10^{-5}$. Максимальные ошибки абсолютных и относительных измерений не превышали 10^{-3} и $5 \cdot 10^{-5}$ соответственно.

Система гармонических катушек использовалась для измерения поля относительно основной полюсной компоненты. Катушка в сборе имеет диаметр, который позволяет ей войти в зазор магнита и вращаться шаговым двигателем. Из-за кривизны магнита имеется ограничение на длину катушки. Поэтому длина катушки была выбрана равной 0.32 мм. В этом случае относительная ошибка измерения из-за разности между прямой гармонической катушкой и искривленным магнитом менее чем 10^{-5} . Для того чтобы покрыть полную длину диполя, измерения были выполнены в нескольких положениях. Интегральное поле было определено как сумма этих измерений. Система гармонических катушек обеспечивала относительную воспроизводимость $\leq 10^{-5}$. Максимальная ошибка относительных измерений не превышала $2 \cdot 10^{-5}$.

Результаты измерений показаны на рис. 4 и 5.

Заключение

Результаты магнитных измерений показывают хорошее качество поля для прототипа дипольного магнита. Все параметры магнита находятся в полном соответствии

со спецификацией. Конструкция, технология и оснастка могут быть использованы для производства магнитов источника синхротронного излучения АНКА.

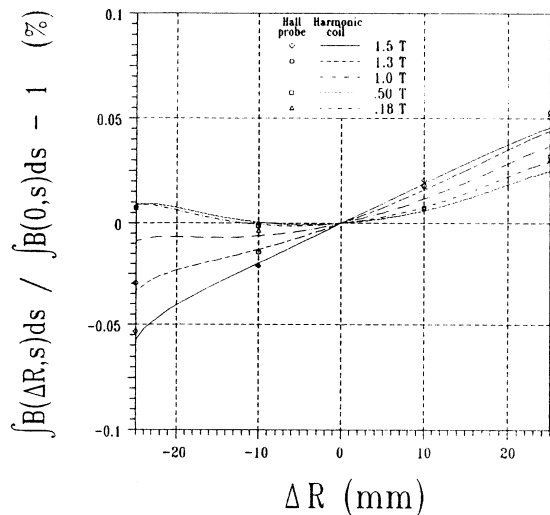


Рис. 4: Разница в магнитных длинах в зависимости от радиуса скругления для ряда уровней магнитного поля. (Результат является суммой измерений гармоническими катушками в позициях 1–8).

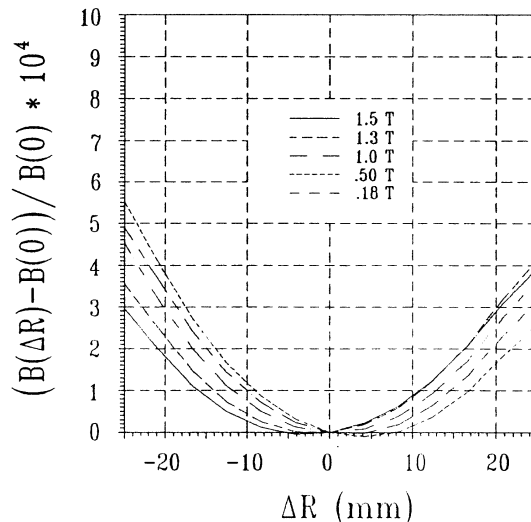


Рис. 5: Распределение поля в радиальном направлении в центральной области прототипа диполя как функция величины магнитного поля.

Список литературы

- [1] Conceptual Design Report of KfK Synchrotron Radiation Source, Efremov Research Institute, CYCLON, St.Petersburg, 1994.
- [2] V.S.Kashikhin, A.Yu.Konstantinov, M.N.Kosyakin, A.V.Nikiforovsky, A.V.Popov, G.N.Samsonov, P.V.Smirnov, A.S.Sudarushkin, V.A.Titov, V.A.Trofimov. "Dipole and Quadrupole Magnets for the first UNK Ring". IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, p. 167, №1, January 1992.