

УДК 621.3.038.612

Расчеты и измерения магнитного поля многополюсных систем ЭЦР-источников ионов

Д.С. Подойников, Д.К. Пугачев, К.И. Берестов
 Научный руководитель: к.т.н. С.Л. Богомолов
 Объединенный институт ядерных исследований
 Россия, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6, 141980
 E-mail: podoinikov@jinr.ru

Calculations and measurements of magnetic field of the ECR ion sources' multipolar systems

D.S. Podoinikov, D.K. Pugachev, K.I. Berestov
 Scientific Supervisor: PhD., S.L. Bogomolov
 Joint Institute for Nuclear Research, Russia, Dubna, Joliot-Curie str., 6, 141980
 E-mail: podoinikov@jinr.ru

Abstract. *The research work is devoted to carrying out calculations and measurements of magnetic field of multipolar magnets, using the DECRIS-5M and DECRIS-PM ion sources as an example. Numerical simulations were carried out using the COMSOL Multiphysics software package, and magnetic field measurements of ion sources hexapole magnets were carried out using automated system for measuring magnetic fields of multipole elements, developed in FLNR JINR.*

Key words: *magnetic field, hexapole, ECR ion source, cyclotron.*

Введение

ЭЦР-источники ионов, используемые в качестве инжектора многозарядных тяжелых ионов, находят широкое применение при проведении прикладных и фундаментальных исследований в области ядерной физики. Для удержания плазмы в ЭЦР-источнике используется конфигурация магнитного поля «минимум В». При такой конфигурации магнитное поле минимально в центре плазменной камеры и возрастает во всех направлениях от центра. Конфигурацию магнитного поля «минимум В» получают суперпозицией аксиального магнитного поля, создаваемого соленоидами или кольцами из постоянных магнитов, и радиального магнитного поля, которое создается многополюсным магнитом со структурой Хальбаха [1].

В данной работе описывается проведение расчетов и измерений магнитных полей многополюсных систем на примере ЭЦР-источников ионов DECRIS-5M (находится в процессе создания для ускорительного комплекса DC-140 [2]) и DECRIS-PM (эксплуатируется в ускорительном комплексе DC-280 [3]).

Экспериментальная часть

Основные параметры рассматриваемых ЭЦР-источников представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ЭЦР-источников DECRIS-5M и DECRIS-PM

Параметр	DECRIS-5M	DECRIS-PM
СВЧ частота	18 ГГц	14 ГГц
Магнитное поле со стороны инжекции, B_{inj}	2,3 Т	1,3 Т
Минимальное магнитное поле в центре источника, B_{min}	0,55 Т	0,4 Т
Магнитное поле со стороны экстракции, B_{extr}	1,35 Т	1–1,1 Т
Радиальное магнитное поле, B_r	1,3 Т	1,05–1,15 Т
Внутренний диаметр плазменной камеры	74 мм	70 мм
Длина гексаполя	300 мм	263 мм

Магнитные системы рассматриваемых ЭЦР-источников представляют собой 24-секторные секступольные магниты (гексаполи). Моделирование и численные расчеты магнитных полей проведены с использованием программы конечно-элементного моделирования COMSOL Multyphysics. Вид 3D-моделей гексаполей представлен на рис. 1.

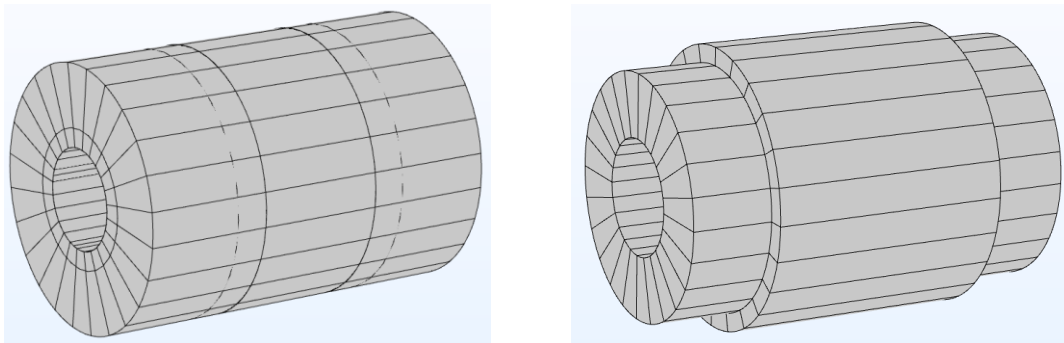


Рис. 1. 3D-модели гексаполей: слева – DECRI5-5M, справа – DECRI5-PM

Измерения магнитного поля проведены с помощью автоматизированной системы измерения магнитных полей мультиполюсных элементов, система управления и программное обеспечение которой разработаны в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Измерение магнитных полей производится с помощью датчика Холла. Датчик располагается на штанге требуемой длины. Штанга механически устанавливается параллельно оси системы на требуемый радиус в диапазоне 15–75 мм. Штанга с датчиком, оставаясь параллельной оси системы, имеет возможность азимутального поворота вокруг оси в диапазоне 0–360° с заданным шагом (минимальный шаг – 1°) при помощи шагового двигателя. Штанга с датчиком и механизмом азимутального поворота установлена на трехкоординатную юстировочную платформу линейного шагового двигателя, который обеспечивает линейное перемещение датчика вдоль оси системы с заданным шагом (минимальный шаг – 1 мм). После каждого шага происходит остановка датчика для измерения поля, затем производится следующий шаг. Управление линейным и азимутальным перемещениями и измерение поля обеспечивается с помощью программного обеспечения, разработанного в среде LabVIEW, вольтметра и блока управления датчиком и шаговыми двигателями.

Внешний вид системы измерения магнитных полей приведен на рис. 2.

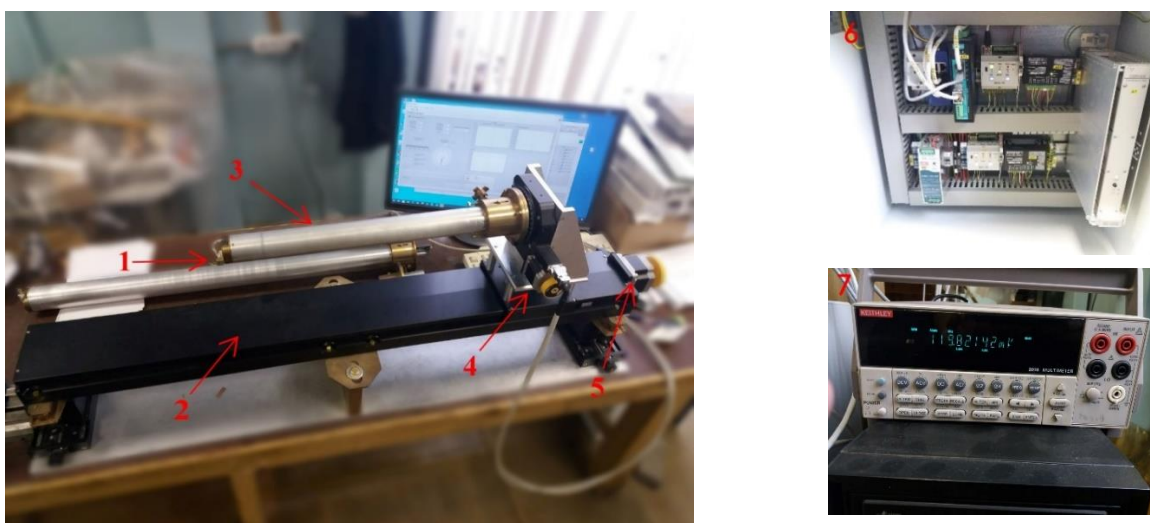


Рис. 2. Система измерения магнитных полей мультиполюсных элементов:
1 – датчик Холла, 2 – юстировочная платформа, 3 – штанга,
4, 5 – шаговые двигатели, 6 – блок управления, 7 – вольтметр

Результаты

Расчеты и измерения магнитной индукции проведены на радиусе 37 мм для гексаполя источника DECRIS-5M и 35 мм для гексаполя источника DECRIS-PM, что соответствует внутренней стенке плазменной камеры. Результаты представлены на рис. 3 и рис. 4.

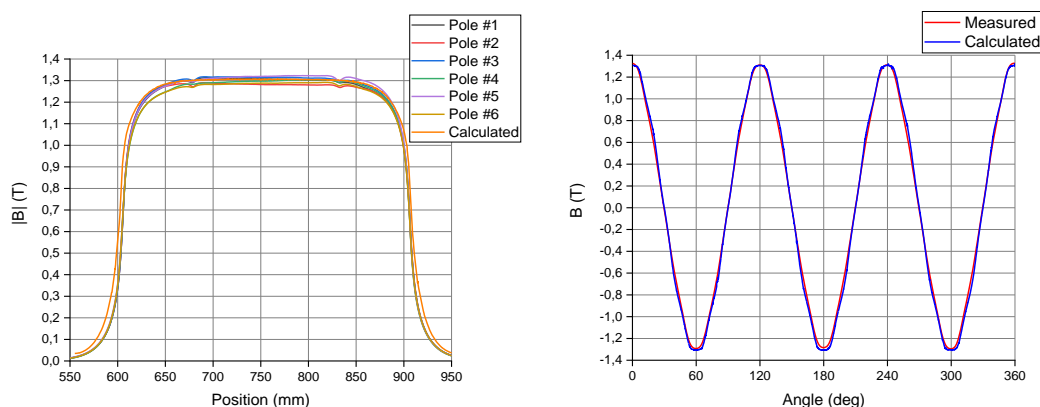


Рис. 3. Результаты расчетов и измерений магнитного поля для гексаполя источника DECRIS-5M: слева – осевое распределение радиального магнитного поля вдоль полюсов гексаполя, справа – азимутальное распределение радиального магнитного поля в центре гексаполя

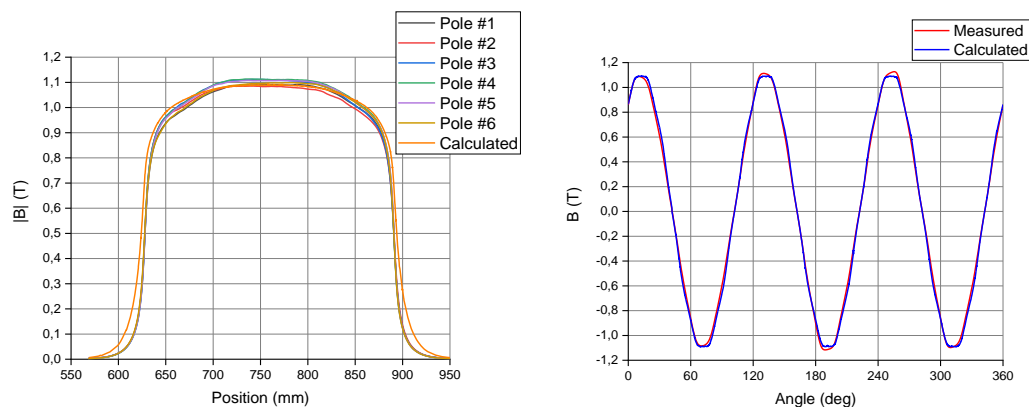


Рис. 4. Результаты расчетов и измерений магнитного поля для гексаполя источника DECRIS-PM: слева – осевое распределение радиального магнитного поля вдоль полюсов гексаполя, справа – азимутальное распределение радиального магнитного поля в центре гексаполя

Заключение

Проведены расчеты и измерений магнитного поля гексаполюсных магнитов ЭЦР-источников ионов DECRIS-5M и DERCIS-PM. Максимальное отклонение расчетных результатов от проведенных измерений не превышает 2 % и 3,5 % для источников DECRIS-5M и DERCIS-PM, соответственно. Максимальный разброс значений магнитного поля по полюсам составляет $\leq 2,5$ %.

Список литературы

1. Halbach K. Strong Rare Earth Cobalt Quadrupoles // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1979. – Vol. 26, № 3. – P. 3882–3884.
2. Mitrofanov S. et al. FLNR JINR accelerator complex for applied physics researches: state-of-the-art and future // Proceedings of 22nd Int. Conf. on Cycl. and their Appl. – 2019. – P. 358–360.
3. Gulbekyan G. et al. Development of FLNR JINR heavy ion accelerator complex in the next 7 years. New DC-280 cyclotron project // Proceedings of IPAC. – 2011. – P. 2700–2702.