

Научная статья

УДК 621.384.633.5

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-36-43

Результаты реконструкции магнитной системы циклотрона У400М*

Иван Анатольевич Иваненко¹, Игорь Владимирович Калагин²
Николай Федорович Осипов³, Василий Алексеевич Семин⁴
Владислав Борисович Зарубин⁵

Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Россия

¹ivan@jinr.ru

²kalagin@jinr.ru

³onik@jinr.ru

⁴seminva@jinr.ru

⁵vbz@jinr.ru

Аннотация

Изохронный циклотрон У400М был создан на базе классического циклотрона У300 и находится в эксплуатации с 1996 г. У400М предназначен для ускорения пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду A/Z 2.286 – 9 до энергии 80–6 МэВ/нуклон. Магнитная система циклотрона создана на базе электромагнита Ш-типа с диаметром полюса 4 м. Isoхронное поле создается 4 парами спиральных секторов. В 2022 г. проведена реконструкция У400М, включающая в себя замену основной обмотки магнита, проведение магнитных измерений и коррекции поля. В ходе измерений была проведена компенсация первой гармоники, а также коррекция среднего магнитного поля в области вывода пучка из циклотрона. При реконструкции применена автоматическая измерительная система, использующая 14 датчиков Холла.

Ключевые слова

изохронный циклотрон, электромагнит циклотрона, формирование магнитного поля

Для цитирования

Иваненко И. А., Калагин И. В., Осипов Н. Ф., Семин В. А., Зарубин В. Б. Результаты реконструкции магнитной системы циклотрона У400М // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 36–43. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-36-43

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

Results of Reconstruction of U400M Cyclotron Magnetic Structure

Ivan A. Ivanenko¹, Igor V. Kalagin², Nikolay F. Osipov³, Vasilii A. Semin⁴
Vladislav B. Zarubin⁵

Joint Institute for Nuclear Research
Dubna, Russian Federation

¹ivan@jinr.ru

²kalagin@jinr.ru

³onik@jinr.ru

⁴seminva@jinr.ru

⁵vbz@jinr.ru

Abstract

U400M isochronous cyclotron was created on the base of U300 classic cyclotron and is under operation at FLNR, JINR since 1996. U400M cyclotron is intended for accelerating the ion beams with $A/Z = 2.286 - 9$ to energy $W = 80 - 6$ MeV/nucleon. Cyclotron has H-type main magnet with 4-meter pole diameter and 4 pairs of spiral type sectors. In 2022 year, the reconstruction of cyclotron magnetic structure was held on. The reconstruction included the replacement of magnet main coil, mapping and correction of cyclotron magnetic field. In the frame of the mapping, the magnetic field was corrected to improve its average radial distribution and to compensate the first harmonic. For cyclotron magnetic field mapping the automatic measurement system, based on 14 Hall probes, was used.

Keywords

Isochronous cyclotron, cyclotron magnet, magnetic field formation

For citation

Ivanenko I. A., Kalagin I. V., Osipov N. F., Semin V. A., Zarubin V. B. Results of reconstruction of U400M cyclotron magnetic structure. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 36–43 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-36-43

Введение

Изохронный циклотрон У400М предназначен для ускорения пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду A/Z 2,286–9 до энергии 80–6 МэВ/нуклон [1]. Циклотрон был введен в эксплуатацию в 1996 г. В 2022 г. была проведена реконструкция электромагнита, включающая замену старой основной обмотки на новую, а также проведение измерений и коррекции рабочего магнитного поля. Магнитная система циклотрона создана на базе электромагнита Ш-типа с диаметром полюса 4 м. Основные параметры электромагнита приведены в табл. 1. Изохронное поле создается 4 парами спиральных секторов и варьируется в диапазоне 1,5–1,92 Тл. Магнит циклотрона имеет 8×15 корректирующих катушек, размещенных на поверхности секторов и предназначенных для оперативной коррекции магнитного поля.

Таблица 1

Основные параметры магнита циклотрона У400М

Table 1

Main parameters of the magnet of U400M cyclotron

Параметр	Значение
Размер магнита, м	$11 \times 4,2 \times 7,46$
Диаметр полюса, м	4
Зазор между полюсами, секторами, м	0,5; 0,1
Количество секторов на полюсе	4
Угловая протяженность сектора, градусы	42
Спиральность сектора, градусы	40
Количество радиальных корректирующих катушек	1
Максимальное поле, Тл	1,92
Максимальная мощность магнита, кВт	650

Замена основной обмотки

Основная обмотка электромагнита циклотрона У300, а позднее У400М использовалась с 1963 г. и в 2022 г. была заменена на новую. Как старая, так и новая обмотки наматывались медным проводником с внутренним отверстием под охлаждение. Одним из критериев выбора параметров новой обмотки послужил предельный ток имеющегося источника питания в 2500 А. Размер проводника новой обмотки был выбран исходя из задачи установки обмотки на магнит посекционно через рабочий зазор между секторами высотой 84 мм (табл. 2).

Таблица 2

Параметры старой и новой обмоток циклотрона У400М

Table 2

The parameters of the old and new main coils of U400M cyclotron

Основная обмотка	Старая	Новая
Поперечное сечение ш*в, м	0,755*1	0,633*0,816
Сечение проводника, м	0,046*0,046	0,050*0,035
Диаметр отверстия охлаждения, м	∅ 0,027	∅ 0,017
Плотность тока, I^*N/S , А/мм ²	0,834	1,162
Мощность, кВт	624	601

На рис. 1 представлены зависимости уровня магнитного поля в центре циклотрона от тока возбуждения старой и новой обмоток. Новая катушка имеет меньшее поперечное сечение и расположена ближе к полюсу магнита и его медианной плоскости. Такое смещение центра масс катушки приводит к небольшому изменению в радиальном наклоне среднего магнитного поля и в распределении рассеянного магнитного поля. Эти изменения могут быть скомпенсированы подбором уровня магнитного поля и корректирующими катушками [2].

Новая обмотка имеет дополнительную секцию, расположенную ближе к медианной плоскости магита. Эта секция имеет отдельный источник питания и предназначена для создания B_z – компоненты магнитного поля, с помощью которой будет осуществляться коррекция аксиального положения пучка в области его вывода из циклотрона.

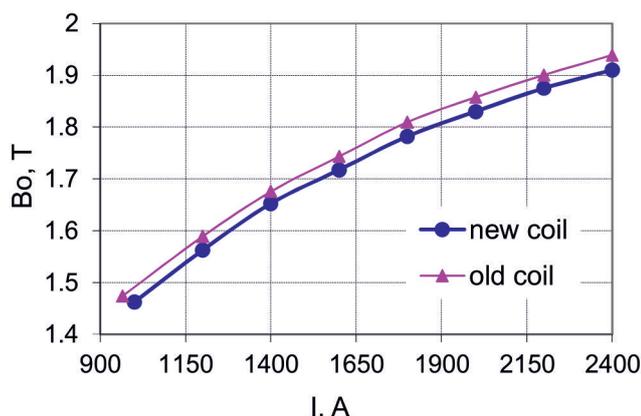


Рис. 1. Зависимость уровня магнитного поля в центре циклотрона от тока в основной обмотке

Fig. 1. The magnetic field at the cyclotron center in dependence on main coil current

Проверочное измерение магнитного поля

После замены основной обмотки циклотрона У400М была проведена серия проверочных магнитных измерений для сравнения с результатами измерений, проведенных в 1996 г. Результаты измерений показали хорошую повторяемость в радиальном распределении среднего магнитного поля (рис. 2). Отличие средних полей на радиусах до $R = 0,4$ м объясняется модернизацией центральной области, в том числе и магнитной структуры под систему внешней инжекции, проведенной в 2000 г.

Гармонический анализ новых измерений магнитного поля показал увеличение амплитуды первой гармоники по сравнению с 1996 г. (рис. 3). При этом фаза первой гармоники приобрела определенную направленность по радиусу (рис. 4). Это свидетельствует о наличии асимметрии магнитной системы У400М, возникшей вследствие долгой эксплуатации и серии модернизаций подсистем циклотрона, проведенных за это время. Амплитуда первой гармоники в 5–15 Гаусс может приводить к нежелательным резонансам и увеличивать нагрузку системы оперативной коррекции рабочего режима циклотрона.

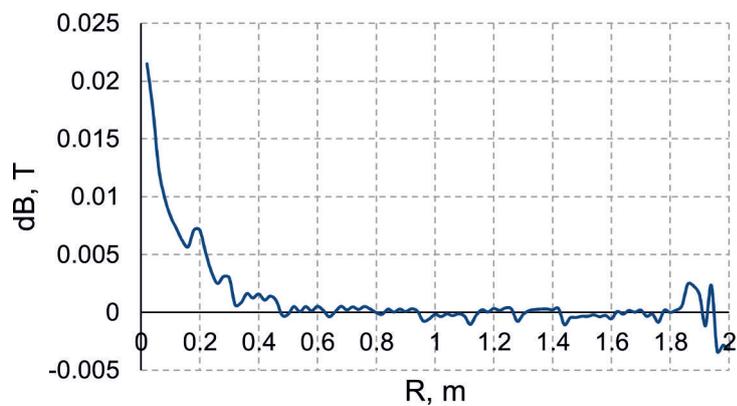


Рис. 2. Разница между радиальным распределением среднего магнитного поля из измерений за 1996 и 2022 гг.

Fig. 2. The difference between the average magnetic fields from results of 1996 and 2022 years mapping

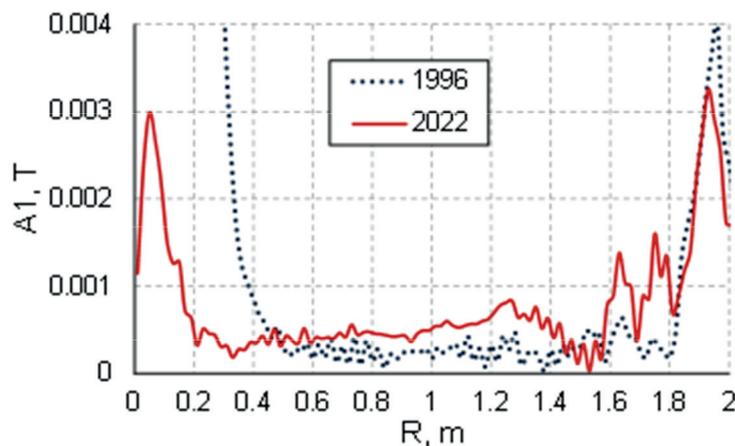


Рис. 3. Амплитуды первой гармоники магнитного поля из измерений за 1996 и 2022 гг.

Fig. 3. The first harmonic amplitudes of the magnetic fields from results of 1996 and 2022 years mapping

Коррекция магнитного поля

Оптимизация магнитного поля У400М имела две основные задачи. Во-первых, это компенсация высокого уровня амплитуды первой гармоники магнитного поля. Во-вторых, это повышение эффективного радиуса циклотрона за счет коррекции среднего магнитного поля в области радиуса вывода. Коррекция высокого уровня первой гармоники была осуществлена за счет установки боковых секторных шимм. Расчет места установки и профиля шимм осуществлен на базе векторного анализа и в соответствии с возможным свободным пространством между элементами магнитной, охлаждающей и ВЧ-систем (рис. 5).

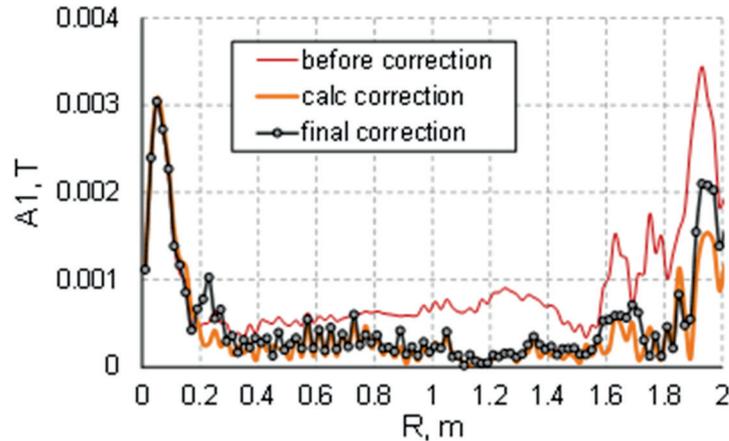


Рис. 4. Амплитуды первой гармоники магнитного поля до и после коррекции, а также результаты расчета компенсации первой гармоники

Fig. 4. The first harmonic amplitudes of the real magnetic field before and after correction as well as result of calculation of this correction

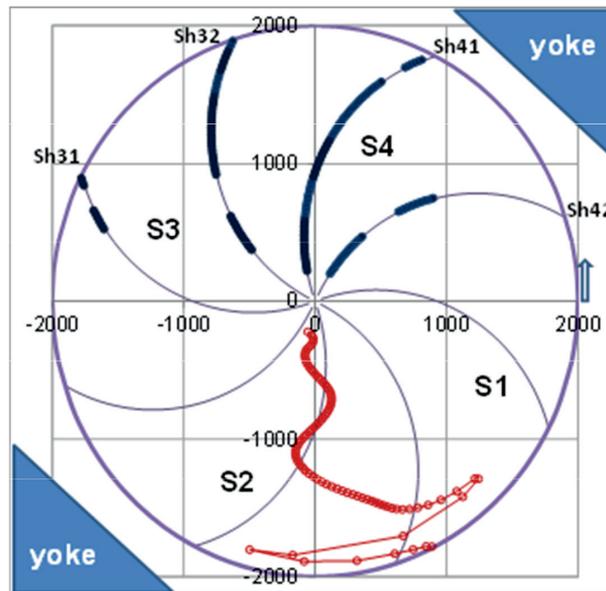


Рис. 5. Расчетная позиция боковых секторных шимм Sh31, Sh32, Sh41, Sh42 на секторах S3 и S4.

Линия с кружками – фаза первой гармоники магнитного поля из измерений за 2022 г.

Fig. 5. The calculated position of the shims Sh31, Sh32, Sh41, Sh42 at the sectors S3 and S4.

Line with circles – phase of the first harmonic of the magnetic field from results of mapping of 2022.

Вид боковых шимм, установленных на секторах циклотрона, обозначен цифрой 2 на рис. 6. После установки секторных боковых шимм проведена серия измерений магнитного поля, результаты которых показали, что амплитуду первой гармоники удалось уменьшить до приемлемых значений 2–3 Гаусса в основной области ускорения (рис. 4). Лучших результатов, особенно на внешних радиусах, добиться невозможно по технологическим причинам и прежде всего из-за отсутствия достаточного места для размещения шимм. Гармонический анализ результатов новых измерений магнитного поля показал увеличение амплитуды первой гармоники по сравнению с 1996 г. (см. рис. 3). При этом фаза первой гармоники приобрела определенную направленность по радиусу (рис. 5). Это свидетельствует о наличии асимметрии магнитной системы У400М, возникшей вследствие долгой эксплуатации и серии модернизаций подсистем циклотрона, проведенных за это время.

Оптимизация магнитного поля У400М имеет две основные задачи. Во-первых, это компенсация высокого уровня амплитуды первой гармоники магнитного поля. Во-вторых, это повышение эффективного радиуса циклотрона за счет коррекции среднего магнитного поля и его вариации в области радиуса вывода.



Рис. 6. Долинные шиммы (1), размещенные на полюсах, и боковые шиммы (2), установленные на секторах магнита У400М

Fig. 6. Valley shims (1) are placed on the poles, sector shims (2) are placed on the U400M magnet sectors.

Компенсация высокого уровня первой гармоники была осуществлена за счет установки боковых секторных шимм. Расчет места установки и профиля боковых секторных шимм осуществлен на базе векторного анализа и в соответствии со свободным для размещения шимм пространством между элементами магнитной, охлаждающей и ВЧ-систем (см. рис. 5). Вид боковых секторных шимм, установленных на секторах циклотрона, обозначен на рис. 6 цифрой 2.

До коррекции среднее магнитное поле циклотрона У400М имело меняющийся с уровнем поля радиальный спад в области радиуса вывода, что ограничивало эффективность циклотрона. Коррекция поля была осуществлена при помощи установки долинных шимм на поверхность полюсов в пространстве между секторами. Долинные шиммы имеют форму дуг, размещенных на радиусах 1,8–1,995 м, высотой 16 мм. Долинные шиммы оказывают двойной эффект на магнитное поле. С одной стороны, их установка поднимает среднее магнитное поле, что позволяет увеличить эффективный радиус циклотрона на 10–17 мм. С другой стороны – уменьшает вариацию азимутального распределения магнитного поля, что меняет форму изохронного распределения, приближая ее к реальному среднему полю (рис. 7).

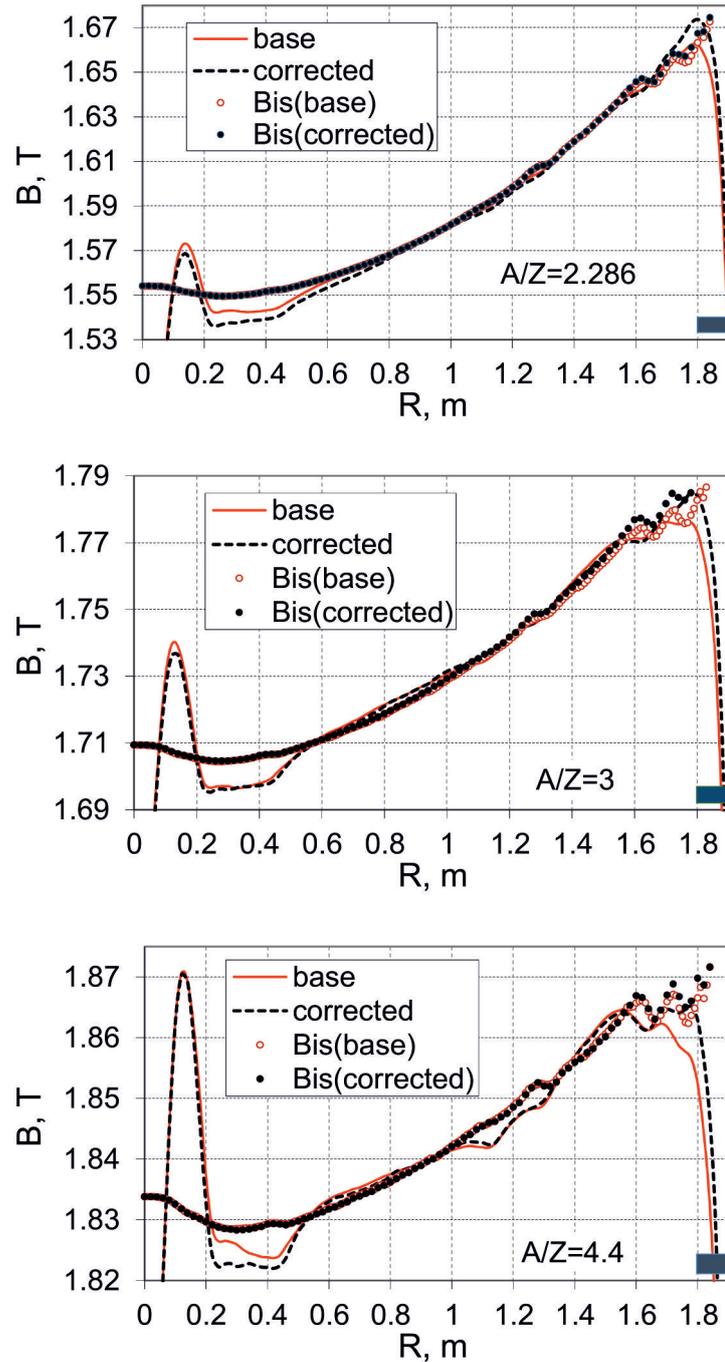


Рис. 7. Сравнение радиальных распределений среднего магнитного поля (линии) и изохроны (кружки) для режимов ускорения ионов с $A/Z = 2,286, 3$ и $4,4$ до (base) и после (corrected) установки долинных шимм

Fig. 7. The comparison of radial distributions of the average magnetic fields (lines) and isochronous fields (circles) for operating modes for acceleration of ions with $A/Z = 2,286, 3$ and $4,4$ before (base) and after (corrected) valley shims placing.

Система измерения магнитного поля

Для измерения магнитного поля циклотрона У400М использовалась автоматическая система магнитных измерений, использующая 14 датчиков Холла [4]. Радиальный диапазон из-

мерений 2240 мм с шагом 20 мм. Азимутальный диапазон измерений 90° или 360° с шагом 1° или 2° . При использовании 14 датчиков время измерений карты поля $90^\circ/1^\circ$ составляет около 40 минут, $360^\circ/1^\circ$ – около 6 часов.

Заключение

Завершена реконструкция магнитной системы циклотрона У400М. Замена основной обмотки электромагнита циклотрона на новую не оказала существенного влияния на рабочие параметры ускорителя. Проведенные после замены обмотки поверочные измерения магнитного поля показали наличие большой, до 10–15 Гаусс, амплитуды первой гармоники. Осуществлена коррекция первой гармоники, в результате которой удалось снизить амплитуду до приемлемых 2–3 Гаусс в основной области ускорения. На втором этапе коррекции проведена оптимизация среднего магнитного поля в диапазоне радиусов 1,6–1,8 м. Финальное измерение магнитного поля показало увеличение эффективного радиуса циклотрона на 10–17 мм, в зависимости от уровня поля. При этом сближение среднего поля с изохронным улучшило фазовое движение пучка перед его выводом из циклотрона.

Список литературы / References

1. **Gulbekian G. et al.** Status of JINR FLNR cyclotrons. In *Proc. of 14th Int. Conf. on Heavy Ion Accelerator Technology*, Lanzhou, China. DOI: 10.18429/JACoW-HIAT2018-MOOXA01
2. **Gulbekian G. et al.** The reconstruction of U400M cyclotron complex. The influence of the new main coil parameters on the cyclotron magnetic field. *PEPAN Lett.*, 2018, vol. 15, no. 7(219), pp. 770–774.
3. **Ivanenko I. et al.** Reconstruction of U400M cyclotron. Upgrade of U400M cyclotron magnetic structure. In *Proc. of 12th International Particle Accelerator Conference*, Brazil, May 2021. DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB187
4. **Ivanenko I. et al.** Measuring system for FLNR cyclotrons magnetic field formation. In *Proc. of 25th Russian Particle Accelerator Conference*, St. Petersburg, Russia, November 2016.

Информация об авторах

Иван Анатольевич Иваненко, кандидат технических наук

Игорь Владимирович Калагин, кандидат технических наук

Николай Федорович Осипов, начальник отдела

Василий Алексеевич Семин, начальник отдела

Владислав Борисович Зарубин, конструктор первой категории

Information about the Authors

Ivan A. Ivanenko, Candidate of Science.

Igor V. Kalagin, Candidate of Science

Nikolay F. Osipov, Head of Department

Vasily A. Semin, Head of Department

Vladislav B. Zarubin, Designer, Category I

*Статья поступила в редакцию 08.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023;
принята к публикации 29.11.2023*

*The article was submitted 08.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023;
accepted for publication 29.11.2023*