

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЛОКОВ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*В. М. Амосков<sup>а</sup>, Т. В. Глушенкова<sup>а</sup>, Г. Г. Гульбемян<sup>б</sup>,  
Н. С. Знаменицкова<sup>а</sup>, И. А. Иваненко<sup>б, 1</sup>, В. Д. Казанцев<sup>а</sup>,  
Н. Ю. Казаринов<sup>б</sup>, И. В. Калагин<sup>б</sup>, М. В. Капаркова<sup>а</sup>,  
Н. А. Крылова<sup>а</sup>, В. П. Кухтин<sup>а</sup>, Е. А. Ламзин<sup>а</sup>, М. С. Ларионов<sup>а</sup>,  
А. А. Макаров<sup>а</sup>, А. Н. Неженцев<sup>а</sup>, Д. А. Овсянников<sup>б</sup>,  
Д. А. Овсянников (мл.)<sup>а</sup>, Н. Ф. Осипов<sup>б</sup>, М. В. Семёнова<sup>с</sup>,  
С. Е. Сычевский<sup>а</sup>, А. А. Фирсов<sup>а</sup>, Н. А. Шатиль<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>с</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>с</sup> ООО «ВАЛТАР МАГНИТ», Королев, Россия

Основная цель работы — создание квадрупольной линзы (КЛ) на постоянных магнитах (ПМ) для системы вывода пучка циклотрона ДЦ-140. Рассматриваются особенности разработки методики входного контроля ПМ с использованием математических моделей прецизионной магнитной системы линзы. Для предложенной конструкции КЛ разработаны элементы методики входного контроля ПМ и изготовлены приспособления и оборудование, необходимые для его проведения. Выполнен входной контроль партии ПМ; на основе полученных данных уточнена конфигурация линзы и расположение ПМ. Проведена сборка трех образцов КЛ: технологического (прототип), основного и контрольного.

The study is focused on the performance of permanent-magnet-based quadrupoles (PMQ) used for beam transportation and focusing in the DC-140 cyclotron. An inspection procedure is examined, that combines 3D field simulation and measurement for geometric and magnetic parameters of PM units. The results are used to guide practical measurement technique and instrumentation decisions. A set of supplied PM units has been measured and an optimum intramagnet PMQ configuration has been determined. As a result, the prototype, reference, and test magnets have been assembled.

PACS: 06.20.Dk; 07.55.Db; 29.20.Hm

---

<sup>1</sup>E-mail: ivan@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований ведутся работы по созданию циклотронного комплекса ДЦ-140, предназначенного для решения широкого круга прикладных задач. Для компенсации горизонтальной дефокусировки в системе вывода ДЦ-140 в области низкого уровня поля будет использована квадрупольная линза на постоянных магнитах. Необходимость использования ПМ в линзе обусловлена относительно малой величиной

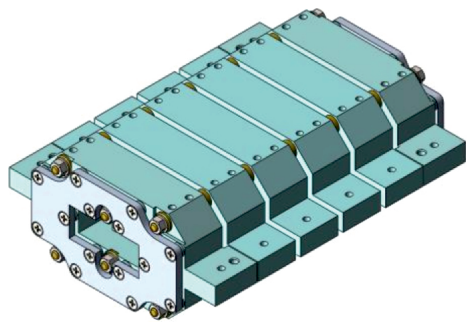


Рис. 1. Внешний вид РМҚ

рассеянного поля циклотрона, что, в свою очередь, препятствует созданию компенсирующего градиента магнитного поля с помощью стальных магнитных масс. Основная цель работы состоит в создании квадрупольной линзы на постоянных магнитах (РМҚ) с неизменным во времени распределением поля (рис. 1). В конструкции таких систем целесообразно применение высококоэрцитивных постоянных магнитов, которые характеризуются долговременной стабильностью магнитных свойств, отсутствием внутренних источников тепловыделения, удобством и надежностью эксплуатации.

Предварительные численные исследования позволили осуществить выбор конструкции линзы на основе постоянных магнитов квадратного сечения  $11 \times 11$  мм [1, 2] (см. рис. 3). Для открытых систем, как в данном случае, когда поле линзы формируется в основном постоянными магнитами, необходимо принимать во внимание разброс параметров блоков ПМ. Ввиду этого процедура формирования поля должна включать в себя этапы входного контроля параметров ПМ, группировки ПМ по параметрам и собственно синтеза магнитной системы с использованием усредненных индивидуальных данных о каждом блоке постоянных магнитов.

В АО «НИИЭФА» на основе оптимизационных расчетов была разработана конструкция квадрупольной линзы с требуемыми параметрами в предположении идентичных свойств блоков ПМ. При этом актуальным остается вопрос обеспечения достаточно высокой точности формирования градиента магнитного поля в рабочей области линзы [1–3]. Дальнейшие исследования, разработка и изготовление линзы базировались на учете реальных геометрических и магнитных характеристик ПМ и анализе их влияния на формирование поля в РМҚ.

В общем случае ошибку формирования поля (градиента поля) РМҚ определяют следующие составляющие [2]: 1) отклонение расчетного поля от требуемого поля, обусловленное конструктивными и техническими ограничениями РМҚ и параметрами ПМ; это отклонение находится расчетным путем в предположении заданных/оптимизированных параметров магнитной системы; 2) отклонение реального поля в рабочей области от расчетного, обусловленное неточностями изготовления и сборки магнитной системы и ее элементов, а также разбросом параметров ПМ, выпускаемых промышленностью.

Расчетные отклонения поля должны быть минимальными, чтобы увеличить диапазон допусков на изготовление элементов РМQ и ее сборку и, как следствие, уменьшить жесткость технологических требований на этапе производства [2]. Исходя из заданной величины погрешности градиента поля линзы, которая не должна превышать 1 %, было принято, что допустимая величина расчетного отклонения градиента поля, в свою очередь, не должна превышать 0,1 %. При этом погрешность расчетов ограничена величиной 0,01 %. На основании результатов входного контроля закупленной партии постоянных магнитов проведена корректировка магнитной системы с учетом измеренных параметров ПМ. Изготовлено три образца РМQ: технологический образец — для отработки технологии изготовления и сборки; основной — для установки в канале вывода циклотрона; контрольный — для периодических измерений с целью исследований зависимости свойств постоянных магнитов от времени, связанных с так называемым эффектом старения.

Входной контроль поставленной партии магнитов включал следующие испытания: 1) контроль геометрических размеров магнитов с использованием специально изготовленных калибров; 2) контроль направления вектора намагничивания магнитов с использованием специальной оснастки; 3) измерение величины магнитного поля на заданных расстояниях от магнита с использованием специальной оснастки с целью определения остаточной индукции и магнитной восприимчивости магнитов.

### КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Для проведения контроля геометрических размеров блоков постоянных магнитов был изготовлен измерительный калибр (рис. 2). В процессе измерений было установлено, что сечение всех блоков имеет плюсовой допуск. Поэтому был изготовлен дополнительный калибр с отверстиями со сторонами 11,01, 11,02, 11,03 и 11,04 мм для уточнения поперечных размеров магнитов. По результатам проведенных испытаний число отбракованных блоков магнитов составило 41 шт.

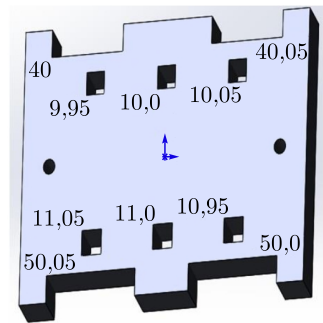


Рис. 2. Модель измерительного калибра, используемого при входном контроле

### КОНТРОЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА НАМАГНИЧИВАНИЯ

Исходя из требований к блокам ПМ отклонение вектора намагничивания от требуемого направления, коллинеарного со стороной квадратного сечения магнитов, не должно превышать  $\pm 1^\circ$ . Определение направления вектора намагничивания производилось следующим образом. Датчик поля располагается на расстоянии  $R$  от продольной оси магнита в центральной плоскости магнита (перпендикулярной этой оси)

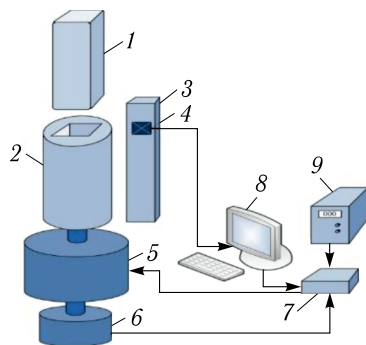


Рис. 3. Схема измерительной установки. 1 — постоянный магнит; 2 — оснастка для установки магнита; 3 — стойка для закрепления датчика Холла; 4 — датчик Холла; 5 — шаговый двигатель; 6 — абсолютный энкодер; 7 — драйвер шагового двигателя; 8 — компьютер с ЦАП-АЦП; 9 — блок питания

(рис. 3). Датчик ориентирован так, что нормаль к поверхности его чувствительной зоны направлена радиально от оси магнита. Магнит вращается в процессе измерений вокруг своей продольной оси так, что в системе координат магнита датчик описывает окружность, сохраняя радиальную ориентацию нормали [4].

Результат измерений представляет собой кривую зависимости нормальной компоненты поля относительно поверхности чувствительной зоны датчика от угла поворота. Данная характеристика имеет вид, близкий к синусоиде, причем тем ближе зависимость к синусоиде, чем больше радиус  $R$ . Максимум этой кривой должен соответствовать углу, вдоль которого направлен вектор намагничивания ПМ.

Точность определения угла отклонения  $\alpha$  вектора намагничивания от требуемого направления зависит от: 1) точности углового положения нормали  $\gamma$  чувствительной зоны датчика вдоль радиального направления от оси магнита; 2) точности выставления «нуля» углового положения датчика на рабочей оси магнита  $\beta$ ; 3) точности совпадения оси вращения магнита с продольной осью магнита  $\delta$  (и  $\chi$ ); 4) точности определения углов поворота  $\psi$  относительно нулевого угла; 5) процедуры обработки показаний датчика с целью получения гладкой зависимости и нахождения экстремальных значений; 6) выбора оптимального расстояния  $R$  (при больших  $R$  кривая ближе к синусоиде, но сигнал слабее, при малых  $R$  сигнал сильнее, но кривая более сложная и ее максимум сложнее интерпретировать); 7) учета внешнего поля (геомагнитного и других сторонних полей).

Можно показать, что компоненты поля в точке  $(R, 0)$  запишутся как

$$H_x = H_r \approx \frac{m}{2\pi R^3} \left( \cos \varphi + \frac{3}{4} \delta (3 \cos (2\varphi + \chi) + \cos \chi) \right), \quad (1)$$

$$H_y = H_\varphi \approx \frac{-m}{4\pi R^3} (\sin \varphi + 3\delta \sin (2\varphi + \chi)), \quad (2)$$

где  $m$  — удельный (на единицу длины) магнитный момент магнита;  $R$  — расстояние от оси вращения до чувствительной зоны датчика;  $\varphi = \alpha + \beta + \psi$  — угол отклонения вектора намагничивания от направления на датчик;  $\alpha$  — искомое отклонение вектора намагниченности в магните от нормали;  $\beta$  — неизвестное отклонение «технического нуля» (т. е. рабочей оси магнита в положении, когда датчик поворота показывает «0»;  $\psi$  — показания датчика угла поворота;  $\delta = \Delta R/R$  — относительное отклонение оси магнита от оси вращения;  $\chi$  — угол отклонения оси магнита от оси вращения относительно направления вектора намагниченности.

Показания датчика при этом равны  $H_p = H_r \cos \gamma + H_\varphi \sin \gamma$ , где  $\gamma$  — неизвестный угол отклонения направления нормали датчика от радиального направления.

Максимум измеряемой компоненты достигается при угле  $\varphi = \alpha + \beta + \psi \approx -\gamma/2 - (9/2)\delta \sin \chi$ , т.е. при показаниях угла поворота  $\psi = -\alpha - \beta - \gamma/2 - (9/2)\delta \sin \chi$ . Тогда  $\alpha = -\psi - \beta - \gamma/2 - (9/2)\delta \sin \chi$ , но углы  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\chi$  и несоосность  $\delta$  изначально неизвестны и дают соответствующий вклад в ошибку определения  $\alpha$ . В частности, для определения угла намагничивания  $\alpha$  в магните с точностью  $0,1^\circ$  углы  $\beta$ ,  $\gamma$  также не должны превышать  $0,1^\circ$ , а несоосность  $\Delta R$  (при  $R = 30$  мм) должна быть не больше  $0,01$  мм, что технически трудно осуществить.

С тем чтобы практически исключить влияние ошибок  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\chi$  и  $\delta$ , процедура с вращением магнита повторяется два раза: один раз с магнитом в исходном положении и второй раз — с повернутым на  $180^\circ$  вокруг рабочей оси. Для каждой из двух измеренных зависимостей  $H_1(\psi)$ ,  $H_2(\psi)$  выделяются первые гармоники и находятся углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , на которых они достигают максимума. Окончательно угол  $\alpha$  находится как их полуразность:  $\alpha = (\psi_2 - \psi_1)/2$ .

Магнит закреплен на валу шагового двигателя и вращается, а датчик магнитного поля установлен на определенном расстоянии. Шаговый двигатель и стойка с датчиком Холла находятся на едином основании. Для установки создана оснастка для соосности шкива и магнита. Управление вращением и измерениями осуществляется с помощью разработанного ПО. Угловое разрешение определяется количеством шагов двигателя за один оборот, в данном случае — 3200 шагов. Таким образом, угол поворота за один шаг равен  $360^\circ/3200 = 0,1125^\circ$ . На рис. 3 показана схема установки для проведения измерений.

Пробные повторные измерения на ряде магнитов продемонстрировали воспроизводимости определения угла  $\alpha$  на уровне  $\pm(0,01-0,02)^\circ$ . Результаты измерений направлений намагниченности 623 магнитов, прошедших контроль геометрических параметров, представлены на рис. 4.

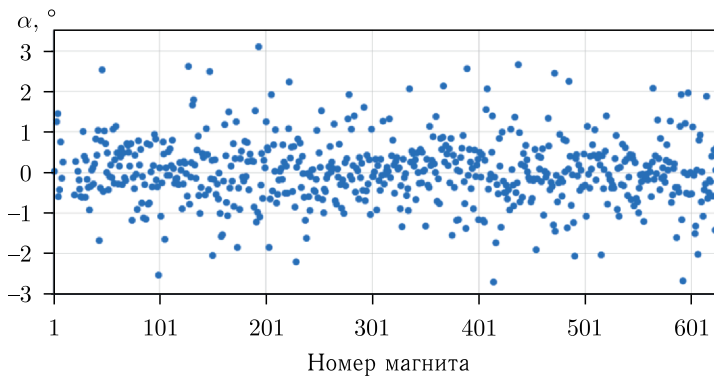


Рис. 4. Результаты измерений направлений намагниченности магнитов, прошедших контроль геометрических параметров.  $\alpha$  — угол отклонения вектора намагниченности от нормали

Большая часть магнитов имеет отклонение вектора намагниченности в пределах  $\pm 1^\circ$  и удовлетворяет предъявляемым требованиям к магнитам. 105 магнитов (18% от 580) имеют отклонение больше  $1^\circ$ , из них 20 магнитов (3%) — больше  $2^\circ$ .

## КОНТРОЛЬ ВЕЛИЧИНЫ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

На начальном этапе методика определения остаточной индукции  $B_r$  и магнитной восприимчивости блоков ПМ базировалась на предположении об однородности их свойств во всем объеме блока магнита. Для дальнейшего развития методики использовались результаты численного 3D-моделирования распределения магнитного поля вокруг постоянного магнита в форме прямоугольного параллелепипеда  $11 \times 11 \times 50$  мм с варьруемой от 0 до 0,1 величиной восприимчивости  $\chi$ .

Задача формулировалась следующим образом. Для каждого блока ПМ из партии в количестве 630 шт. определить остаточную индукцию  $B_r$  и магнитную восприимчивость  $\chi$ . Затем путем выборки определить три набора ПМ по  $26 \times 6 = 156$  шт. с наиболее близкими характеристиками для изготовления трех образцов РМQ.

Методика восстановления параметров постоянных магнитов основывалась на следующих предположениях: 1) блок ПМ имеет однородные свойства (постоянный по величине и направлению вектор остаточной индукции  $B_r$  и постоянную по величине магнитную восприимчивость  $\chi$ ) во всем объеме ПМ; 2) магнитная восприимчивость  $\chi$  — изотропная характеристика, т. е. намагниченность в любой точке магнита, определяется как  $M = M_r + \chi H$ .

Для разработки методики восстановления параметров блоков ПМ выполнено численное моделирование 3D-поля одиночного магнита заданных размеров с  $B_r = 1,2$  Тл и двумя вариантами магнитной восприимчивости:  $\chi = 0$  (идеальный ПМ без размагничивания) и  $\chi = 0,1$  (типичное значение для ПМ Nd-Fe-B). Расчеты выполнены с использованием программного комплекса КОМПOT [5] на конечно-элементной 3D-модели большой размерности. Оцениваемая погрешность определения поля  $10^{-4}$  (0,01 %).

Измерения проводились с использованием оснастки, которая представляет собой немагнитный параллелепипед с четырьмя прецизионными (вырезанными на станке с ЧПУ) квадратными  $11 \times 11$  мм отверстиями. Центры этих отверстий (относительно центра оснастки) располагаются в точках  $x_1 = -20$  мм,  $x_2 = -7$  мм,  $x_3 = -x_2 = 7$  мм,  $x_4 = -x_1 = 20$  мм. В центр оснастки помещается однокомпонентный датчик Холла, измеряющий поле в направлении  $X$  (рис. 5 и 6).

В процессе измерений каждый магнит последовательно вставляется в каждое из четырех отверстий так, что его вектор намагничивания совпадает с положительным направлением оси  $X$  (условно — северным полюсом), и в каждом положении фиксируются показания датчика. Эти измерения нумеруются как положения № 1, 2, 3 и 4, и им соответствует положительное поле ( $B_1, B_2, B_3, B_4$ ). Затем магнит вставляется южным полюсом, и измерения в каждом из четырех отверстий повторяются в том же порядке. Это измерения в положениях № 5, 6, 7 и 8, и им соответствует отрицательное поле ( $B_5, B_6, B_7, B_8$ ). Считая, что в пределах малого смещения  $\pm \Delta x$  чувствительной зоны датчика поведение поля  $B_x(x)$  линейно, можно существенно повысить точность определения поля в заданных координатах  $x_1$  и  $x_2$  относительно центра магнита:  $B_x(x_2) = (B_1 - B_8)/2$ ,  $B_x(x_1) = (B_2 - B_7)/2$ ,  $B_x(-x_1) = (B_3 - B_6)/2$ ,  $B_x(-x_2) = (B_4 - B_5)/2$ .

Таким образом, описанная процедура измерения позволяет снизить требования на точность позиционирования датчика в направлении  $X$  (в направлении поля):  $|\Delta x| < 0,5$  мм. Такая же точность позиционирования может быть принята по другим осям:

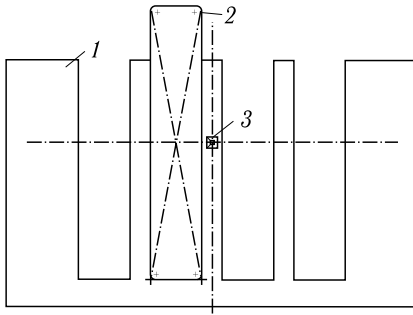


Рис. 5. Схема измерения для определения остаточной индукции. 1 — приспособление для измерения индукции магнита; 2 — постоянный магнит; 3 — датчик Холла

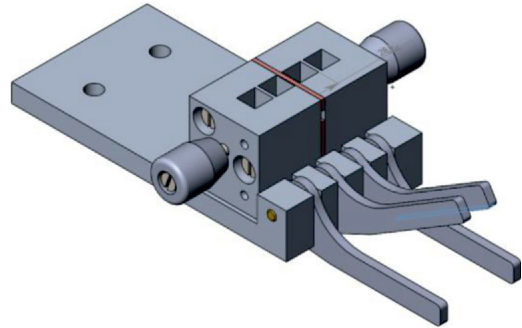


Рис. 6. Приспособление для установки магнита и измерения магнитной индукции в четырех фиксированных положениях

$|\Delta y| < 0,5$  мм,  $|\Delta z| < 0,5$  мм, так как поле на оси  $X$  (оси симметрии магнита) в этих направлениях имеет экстремум ( $\partial B_x / \partial y = 0$ ,  $\partial B_x / \partial z = 0$ ).

Полученные значения  $B_x$  в точках  $x_1 = 7$  мм и  $x_2 = 20$  мм могут быть использованы для восстановления  $B_r$  и  $\chi$  по описанной выше методике. Схема проведения измерения магнитной индукции на фиксированных расстояниях от поверхности магнита приведена на рис. 5. Измерение индукции производится датчиком Холла, предварительно откалиброванным с погрешностью не хуже  $\pm 0,02$  мТл.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной НИР [1–3] сформирован технический облик квадрупольной линзы на постоянных магнитах. Сформулированы требования к блокам ПМ, которые представляют собой прямоугольные параллелепипеды, намагниченные коллинеарно одной из коротких сторон. С использованием трехмерных математических моделей разработаны методики контроля геометрических размеров ПМ, величины и направления вектора намагничивания, а также остаточной индукции и магнитной восприимчивости. В силу достаточной универсальности разработанные методики могут быть использованы при организации процедуры входного контроля широкой номенклатуры ПМ, выпускаемых промышленностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amoskov V.M., Vasiliev V.N., Gaponok E.I., Gulbekyan G.G., Edamenko N.S., Ivanenko I.A., Kazarinov N.Y., Kalagin I.V., Kaparkova M.V., Kukhtin V.P., Lamzin E.A., Makarov A.A., Nezhentzev A.N., Ovsyannikov D.A., Ovsyannikov D.A., Jr., Osipov N.F., Rodin I.Yu., Sytchevsky S.E., Firsov A.A. Modelling and Design of Permanent Magnet Multipoles for Beam Transport and Focusing. I. Selection of Optimal Design and Parameters // Bull. of Saint Peterburg Univ. Appl. Math. Comput. Sci. Control Processes. 2021. V. 17, Iss. 4. P. 313–329.

2. Амосков В. М., Васильев В. Н., Гапионюк Е. И., Гульбежян Г. Г., Едаменко Н. С., Иваненко И. А., Казаринов Н. Ю., Калагин И. В., Капаркова М. В., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Макаров А. А., Неженцев А. Н., Овсянников Д. А., Овсянников Д. А., мл., Осипов Н. Ф., Родин И. Ю., Сычевский С. Е., Фирсов А. А., Шатиль Н. А. Особенности разработки мультипольных элементов на основе постоянных магнитов для систем транспортировки заряженных частиц. Уточненная методика выбора конфигурации линзы // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Прикл. математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18, вып. 4. С. 454–472.
3. Kukhtin V., Firsov A., Kaparkova M., Lamzin E., Larionov M., Makarov A., Nezhenetev A., Rodin I., Shatil N., Gulbekyan G., Ivanenko I., Kazarinov N., Kalagin I., Osipov N., Edamenko N., Ovsyannikov D., Sytchevsky S. Simulation and Design of the Permanent Magnet Multipole for DC140 Cyclotron // Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conference. 2021. P. 99–101.
4. Arslanova D., Gavrish Y., Gaponok E., Grosheva A., Knyazev N., Kukhtin V., Lamzin E., Nezhenetev A., Ovsyannikov A., Ovsyannikov D., Sytchevsky S., Znamenshchikova N. Feasibility Study of Permanent Magnet Dipoles for SILA Facility // Cybernet. Phys. 2023. V. 12, No. 4. P. 252–256.
5. Doinikov N. I., Lamzin E. A., Sytchevsky S. E. On Computation of 3D Magnetostatic Fields of Electrophysical Apparatus Magnet Systems // IEEE Trans. Magnet. 1992. V. 28, No. 1. P. 908–911.

Получено 28 октября 2024 г.