

# МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С ОСЕВОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ПОЛЯ

Чохели М.А., Клевец Н.И.

В настоящей статье представлены результаты проектирования и изготовления магнитной системы (МС) с осевой фокусировкой поля, а так же результаты измерений магнитного поля и проведено сравнение с расчетными данными.

## Введение

С усложнением электроннолучевых приборов появилась потребность создания магнитных полей со сложным распределением в рабочей области (РО). Известно ряд конструкций МС, формирующих в рабочей области поле с требуемым распределением [1].

Традиционно протяженные осевые магнитные поля создаются с помощью соленоидов, питаемых электрическим током. В таких системах электрический ток должен быть в высшей степени стабилизирован, поэтому конструктивно, а так же в эксплуатации такие системы сложны, так как требуют стабилизированного источника питания и охлаждения обмоток.

Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов с остаточной индукцией порядка 1,3 Тл, например, из сплава неодим-железо-бор, позволяет получать аксиальные магнитные поля до 0,7 - 0,8 Тл. Причем, масса таких МС значительно меньше, чем у электромагнитных соленоидов, создающих аналогичные поля.

При проектировании МС, создающих интенсивные аксиальные поля, приходится преодолевать специфические проблемы. Прежде всего, необходимо обеспечить закон распределения поля в рабочей области, требуемый для эффективной работы устройства. Вторая проблема связана с высокой стоимостью применяемых постоянных магнитов и при оптимизации конструкции МС выражается в требовании минимума расхода магнитов и технологичности конструкции изделия. Практический опыт изготовления МС с осевой фокусировкой не велик [2, 3, 4]. Эти устройства предназначены для работы на частотах излучения до 30 ГГц. Величина их осевого магнитного поля около 0,51 – 0,56 Тл, диаметр рабочей области колеблется от 80 мм до 173 мм. При этом масса МС равна 70 и 256 кг, соответственно [2].

Конструктивный подход к проектированию указанных выше систем принципиально одинаков и описан в [5].

Создание гиротронов, работающих на более высоких частотах излучения, требует увеличения уровня магнитного поля до 0,7 Тл. В данной статье описана МС, обеспечивающая указанный уровень поля и другие специальные требования, необходимые для эффективной работы гиротрона на частоте 34 ГГц.

## 2. Оптимизация МС

Согласно техническому заданию (ТЗ) на проектирование, МС гиротрона должна удовлетворять следующим требованиям:

Рабочая область должна состоять из четырех участков:

Участок диаметром 130 мм в катодной области (длина не нормируется).

Участок диаметром 100 мм и длиной 60 мм в катодной области.

Участок диаметром 60 мм и длиной до 220 мм в области с постоянным полем.

Участок диаметром 80 мм в коллекторной области (длина не нормируется).

Магнитное поле в РО должно удовлетворять следующим требованиям:

Величина магнитного поля в рабочей области  $H_0 = 0,69$  Тл.

Длина однородного участка магнитного поля в рабочей области при неоднородности  $\delta H_0 = 0,5\%$  равна 170 мм. Участок с постоянным полем должен располагаться симметрично относительно канала диаметром 60 мм.

В точке расположения катода, находящейся на расстоянии 90 мм от края канала диаметром 60 мм, поле должно иметь величину 0,045 Тл и градиент  $dH / dz = 0,40$  Тл/м .

Точка реверса магнитного поля со стороны коллектора должна быть на расстоянии 140 мм от края участка с однородным полем.

Магнитная система должна иметь минимально возможную массу при использовании магнитно-твердых материалов с остаточной индукцией до 1,35 Тл.

Конструкция МС должна быть технически реализуемой в условиях существующего производства. Для правильной математической постановки задачи, необходимо указать законы изменения поля от катода до области однородности и от области однородности до нуля (точки реверса).

При описании поля МС гиротрона необходимо учитывать особенности его поведения, вытекающие из уравнений Максвелла. В частности, поле МС в рабочей области должно описываться гармоническими функциями. Поля, описываемые другими функциями, не удовлетворяют уравнениям Максвелла и, следовательно, не могут наблюдаться на практике. Другими словами, такие поля не возможно создать.

Поле в промежутке от катода до РО можно описать полиномом третьего порядка. Коэффициенты этого полинома можно найти из граничных условий для поля и его производной.

Значение производной поля (градиент) в точке расположения катода задано в ТЗ. Производная поля в РО гиротрона равна нулю (поле постоянно). Учитывая, что поле должно описываться непрерывной функцией, для рассматриваемого участка получаем

$$H(z) = a + bz + cz^2 + dz^3, \quad (1)$$

$$\frac{dH}{dz} = b + 2cz + 3dz^2. \quad (2)$$

Неизвестные коэффициенты в (1) и (2) находим из граничных условий, описываемых системой уравнений:

$$a + z_1b + z_1^2c + z_1^3d = H(z_1),$$

$$a + z_2b + z_2^2c + z_2^3d = H(z_2),$$

$$0 + b + 2z_1c + 3z_1^2d = \frac{dH(z_1)}{dz}, \quad (3)$$

$$0 + b + 2z_2c + 3z_2^2d = 0,$$

где  $z_1$  - координата точки расположения катода,

$z_2$  - координата начала рабочей области гиротрона.

На участке от конца РО гиротрона до точки реверса поле можно описать полиномом второго порядка:

$$H(z) = a + bz + cz^2. \quad (4)$$

Причем здесь коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  будут другими. Для их определения необходимо решить систему уравнений

$$a + z_3b + z_3^2c = H(z_3),$$

$$a + z_4b + z_4^2c = 0, \quad (5)$$

$$0 + b + 2cz_4 = 0,$$

где  $z_3$  - координата конца РО гиротрона,

$z_4$  - координата точки реверса поля.

Очевидно, что значения коэффициентов полиномов существенно зависят от координат опорных точек и величины поля в них. Распределение поля на оси МС гиротрона, удовлетворяющее требованиям ТЗ, показано на рисунке 1 (кривая 1).

Проектирование оптимальной конструкции МС состоит в определении значений всех параметров, характеризующих геометрию системы и свойств постоянных магнитов, обеспечивающих выполнение требований ТЗ.

В математической постановке задача расчета МС сведена к минимизации функционала (нормы разности требуемого и создаваемого МС поля)

$$\left\| \vec{B}_p - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_M} \left[ \frac{3(\vec{J}, \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{J}}{r^3} \right] dV \right\|_{L^2} = \inf, \quad (6)$$

где  $\vec{B}_p$  - поле, которое необходимо получить в рабочей области МС,

$V_M$  - объем МС,

$\vec{J}$  - намагниченность МС,

$\vec{r}$  - радиус-вектор, проведенный из точки интегрирования в точку наблюдения.

При этом варьировались геометрические параметры МС, величина и ориентация намагниченности блоков. Оптимизация МС выполнялась методом покоординатного спуска в интерактивном режиме. Для расчета поля МС использовалась программа ELCUT [6]. В результате были найдены все параметры, обеспечивающие удовлетворительное выполнение требований ТЗ. Подробное описание задачи и файлы модели приведены на сайте <http://www.tor.ru/elcut/articles/choheli/>. Вы можете самостоятельно провести анализ параметров оптимизированной МС с помощью бесплатной Студенческой версии программы ELCUT [6].

В частности, магнитные свойства постоянных магнитов, оказались следующими:

Остаточная индукция, Тл 1,17 - 1,35.

Коэрцитивная сила по индукции, кА/м 560 - 800.

Коэрцитивная сила по намагниченности, кА/м 1100 - 1400.

Полученная МС была исследована на устойчивость заданных характеристик к малым изменениям геометрических и физических параметров по методике, изложенной в [7]. В результате были определены технологические допуски на геометрические размеры блоков и на сборочные параметры МС.

### 3. Технологические особенности изготовления МС

При использовании традиционной технологии изготовления крупногабаритных МС, отдельные блоки МС (сборочные единицы) собирают из элементарных магнитов стандартных размеров и формы (прямоугольные параллелепипеды). При этом коэффициент использования магнитотвердого материала (отношение массы заготовки к массе сборочной единицы) составляет 1,5-1,6. При увеличении массы МС указанный способ становится экономически неприемлемым. В настоящей работе размеры сборочных единиц выбирались таким образом, чтобы они могли быть изготовлены и приготовлены к сборке с минимальными потерями на механическую обработку. Такой подход требовал дополнительных затрат на изготовление прессформы для блоков каждого типоразмера. Однако затраты на изготовление прессформ значительно ниже затрат на изготовление стандартных образцов постоянных магнитов, с которых затем при механической обработке снимается до 40-50 % массы.

В рассматриваемой МС было определено 10 типоразмеров блоков. В результате коэффициент использования магнитотвердого материала составил 1,20– 1,25.

В экономическом плане такое решение позволило, во-первых, снизить затраты магнитотвердого материала на изготовление МС на 30%, во-вторых, снизить трудовые затраты также на 25-30%.

Чистый вес магнитной системы (без арматуры) составил 375 кг. В результате принятых технологических решений временные затраты на изготовление составили 12 месяцев.

Изготовленная МС приведена на рис. 2.

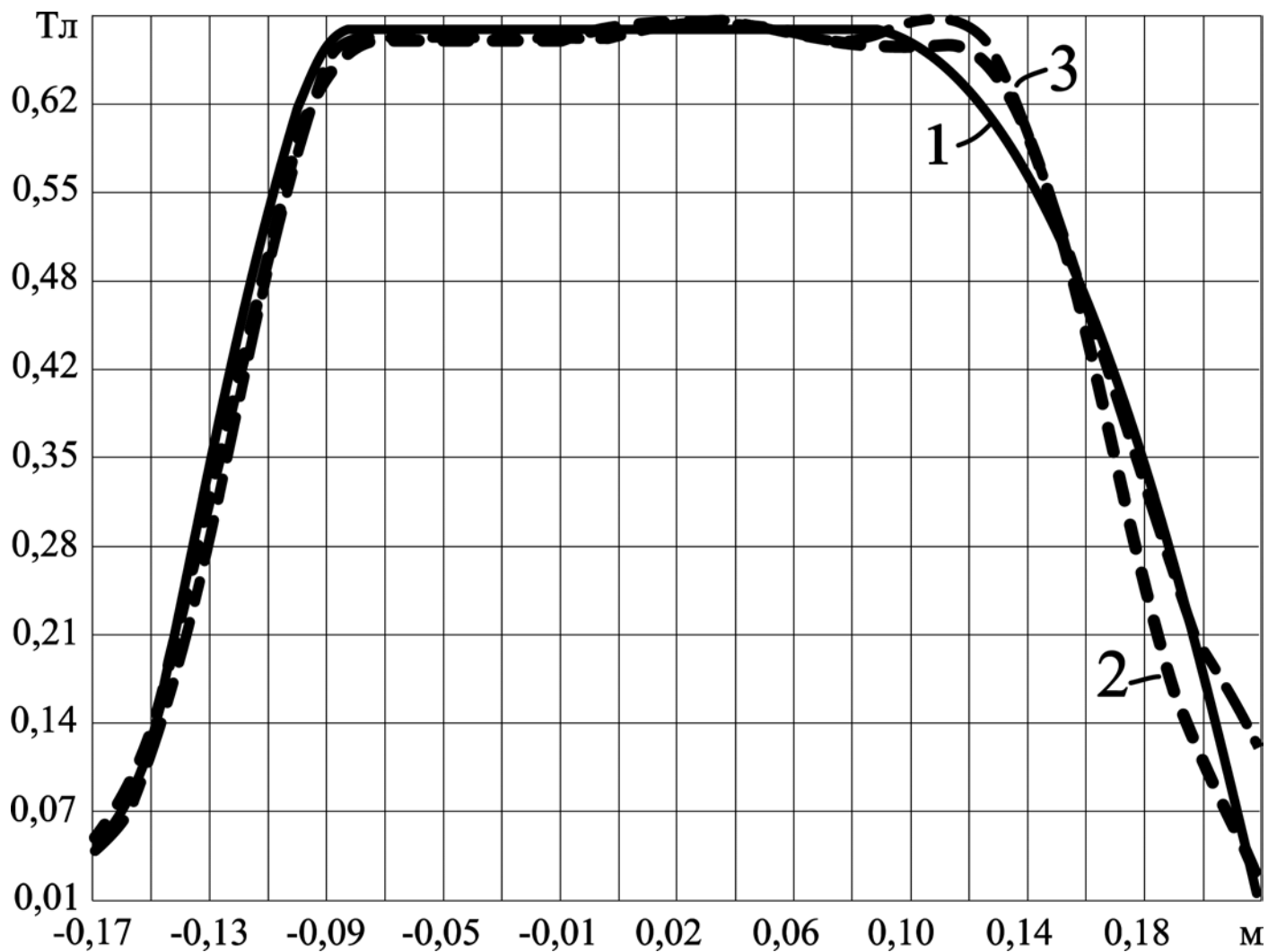


Рис. 1. Распределение поля на оси МС:

1 – требуемое по ТЗ, 2 – полученное при оптимизации, 3 – измеренное

Результаты измерения магнитного поля в рабочем объеме магнитной системы приведены на рис.

1. Среднеквадратичное отклонение расчетного значения поля от требуемого составило 15%, измеренного – 23%.

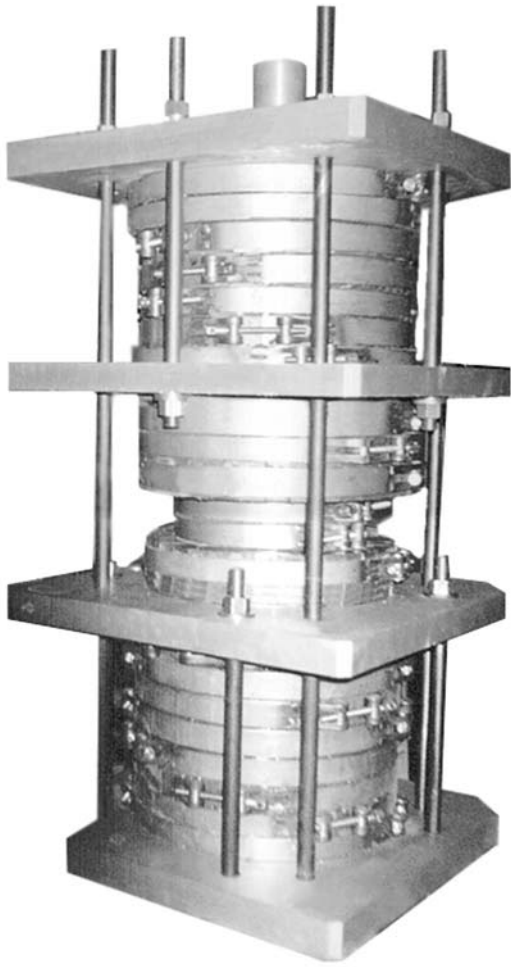


Рис. 2. Магнитная система гиротрона

## Выводы

Использование высококоэрцитивных постоянных магнитов из сплава неодим-железо-бор позволяет изготовить магнитную систему гиротрона с величиной осевого магнитного поля порядка 0,7 Тл.

В процессе изготовления МС были разработаны технологические приемы изготовления крупногабаритной МС со сложной топографией магнитного поля, которые позволили снизить материальные и трудовые затраты.

## Литература

1. Takeo Takeda, Ken Ohashi, Masakatsu Honshima and Toshiyuki Kikunaga Nd-Fe-B Permanent Magnet Circuit for a 28 GHz CW Gyrotron, Magnetic Materials R&D Center, Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. Taki fu Fuui, 915, Japan.
2. Ken Ohashi, Teruaki Tobita and Kazunori Kakuno, PM tipe gyrotron for ceramic sintering, Shin Etsu Chemical Co. Ltd. Toshiyuki Kikunaga Mitsubishi Electric Co. Ltd.
3. T. Kikunaga, H. Asano, K. Hemmi, F. Sato and T. Tsukamoto, A 28 GHz CW Gyrotron with a Permanent Magnet System Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp. Tsukaquchi Honmachi 8-1-1, Amaqasaki, Hyogo 661 Japan,
4. <http://www.vtsnet.ru/elmag/>
5. John P. Clarke, Herbert A. Leupold Electronics Technology and Devices Laboratory (AABCOM) Fort Monmouth, N. Jersey 07703-5203, IEEE Trans. On Magn., 1986, v.2 № 5, p. 1063-1065 Shaping of cylindrically symmetric magnetic fields with permanent magnets.
6. <http://www.tor.ru>
7. Курбатов П.А., Курбатов Ю.В. Автоматизация проектирования систем с постоянными магнитами. Электротехника № 9, 1999. - С. 23-27.