



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2024–14

Л.М. Ткаченко

**ПАКЕТ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ MULTIC
ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ
КОНФИГУРАЦИИ**

Протвино 2024

Аннотация

Ткаченко Л.М. Пакет компьютерных программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной геометрической конфигурации. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2024–14. – Протвино, 2024. – 64 с., рис. 23, табл. 18, библиогр. 30.

Представлено описание пакета компьютерных программ MULTIC, предназначенного для вычисления магнитных полей с учетом реальной зависимости магнитной проницаемости от поля в магнитопроводе. Пакет состоит из программ MULTIC2D для расчета двумерной геометрии магнита и MULTIC3D для вычисления поля пространственных геометрий магнитных систем произвольной конфигурации. Приводятся структура пакета, описание функций команд и значений параметров, примеры расчетов и анализ точности вычислений.

Abstract

Tkachenko L.M. Computer software package to calculate magnetic fields of arbitrary geometric configuration. NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2024–14. – Protvino, 2024. – p. 64, fig. 23, tables 18, refs.: 30.

The description of the MULTIC software package designed for calculating magnetic fields, taking into account the real dependence of the magnetic permeability on the field in the magnetic iron yoke, is presented. The package consists of the programs MULTIC2D for calculating the two-dimensional geometry of a magnet and MULTIC3D for calculating the field of spatial geometries of magnetic systems of arbitrary configuration. The structure of the package, a description of the function of commands and parameter values, examples of calculations and an analysis of the accuracy of calculations are given.

Оглавление

1. Постановка задачи	5
2. Структура программы.....	6
2.1 Система единиц	6
2.2 Управление программами	7
2.3 Формат команд	8
3. Задание геометрии магнита.....	9
3.1 Токовые элементы и элементы магнитопровода (команда DRAW).....	9
3.2 Трехмерная геометрия	12
Задание геометрии обмотки	12
Задание геометрии магнитопровода	20
Симметрия обмоток	26
Симметрия ферромагнетика	27
3.2. Изменение геометрии (Команды MODI и MOVE)	29
3.3 Удаление элементов (Команда ERAS)	30
3.4 Генератор сетки (Команда MESH)	30
4. Задание <i>B-H</i> данных (Команда BHDA).....	30
5. Вычисление магнитных моментов (Команда GETM).....	31
6. Задание постоянных магнитных моментов (Команда FIXI)	34
7. Вычисление поля (Команда GETB).....	35
8. Интегральные величины (Команда INTE)	40
9. Гармонический анализ поля и интеграла поля (Команда HARM).....	41
9.2 Азимутально-симметричные поля	44
10. Вычисление производных нелинейностей поля (команда DERH)	45
11. Эффективная длина магнита (команда LEFF).....	46
12. Вычисление магнитных сил (Команды FORI, FORC и GETF)	46
12.1 Сила, действующая на ферромагнетик (команда FORI)	46
12.2 Пондеромоторные силы (Команды GETF, FORC)	46
13. Печать параметров магнита (Команда PRIN).....	49
14. Графический вывод пучка электронов (Команда BEAM).....	49
15. Запись геометрии магнита в файл (Команда GEOM)	50

16. Вычисление потерь в магнитопроводе (Команда LOSF).....	50
17. Вычисление потерь в НТСП обмотке (Команда LOSC).....	51
18. Ввод таблицы критического тока $J(B)$ для ВТСП (Команда CURH)	53
19. Вычисление потерь в ВТСП обмотке (Команда LOSH).....	54
20. Вычисление нагрева ВТСП обмотки (Команда HEAT).....	55
21. Перечень используемых файлов программами.....	57
22.1 Двумерная задача	58
22.2 Трехмерная задача	59
Заключение	61
<i>Рукопись поступила 28 октября 2024 г.</i>	64

Введение

Пакет программ *MULTIC* [1 -5] предназначен для расчета линейных и нелинейных магнитных полей с произвольной геометрической конфигурацией токовых обмоток, магнитопроводов, магнитных экранов и других элементов конструкции магнитной системы. Структурная идеология пакета подобна программе *GFUN* [6].

Область применения: сверхпроводящие и резистивные дипольные, квадрупольные, секступольные и др. магниты в ускорительных системах и других физических и электрофизических установках; электрические генераторы и двигатели; магнитные системы на постоянных магнитах; магнитные системы томографов; магнитные системы регистрирующей, диагностирующей и измерительной аппаратуры и др.

Для задания геометрии обмоток в программах имеется база данных токовых элементов различной конфигурации. При расчете плоских полей могут использоваться наборы геометрических форм, состоящих из треугольников, четырехугольников, кольцевых или эллиптических секторов. Для пространственных задач база данных состоит из набора наиболее широко применяемых типов обмоток. База данных стандартных типов токовых элементов постоянно расширяется по мере появления новых геометрий обмоток. Для задания геометрии обмоточного блока, не совпадающего с базовым типом обмоток, предусмотрена возможность сборки из имеющегося набора элементарных токовых элементов.

Для задания геометрии магнетика имеется возможность автоматической генерации различных форм геометрических областей.

Зависимость магнитной проницаемости от величины поля для магнитных материалов берется из базы данных или определяется таблицами, заданными пользователем. Конструкция магнита может включать различные магнитные материалы.

Учет плоскостей симметрии в конструкции магнита позволяет существенно сократить объем входных данных и время вычислений, например, при наличии трех плоскостей симметрии достаточно описать один октант.

Для численного расчета магнитных полей формулировка задачи в виде интегральных уравнений имеет определенные преимущества по сравнению с эквивалентной краевой задачей:

- Снимается проблема граничных условий в случае "открытых" магнитных систем.
- Исчезают трудности с нанесением сетки на геометрические детали и зазоры с малыми размерами.
- Исключается из рассмотрения свободное пространство, что приводит к существенному сокращению объема расчетной сетки и др.

В трехмерных задачах эти преимущества становятся принципиальными.

Пакет *MULTIC* состоит из программ *MULTIC2D* для вычисления плоских магнитных полей и *MULTIC3D* для решения пространственных задач. Пакет написан на языке *FORTRAN-77*.

Программа эксплуатируется в ИВФЭ длительное время, постоянно совершенствуется и видоизменяется, в процессе разработки новых магнитных систем добавляются новые расширения расчетов параметров магнитов. Поэтому ее описание устарело и во многом не соответствует ее возможностям.

За последние годы появился графический язык *VRML* (Virtual Reality Modeling Language) [7], язык и формат файлов описания интерактивных трехмерных объектов и виртуальных миров. В связи с этим, функции команд **FRAM**, **MAP**, **RECO** выполняет обновленная команда **GEOM**, для которой уже не нужна программа *FEMPOST*. Отпала необходимость выдачи геометрии в формате *PS*. Также появилась новая команда **BEAM** [8], формирующая траекторию пучка электронов в формате *VRML*. Для просмотра файлов в формате *VRML* можно использовать программу просмотра *Vrml Viewer* [9]. Для графической обработки массивов данных, подготовленных командами **GETB**, **HEAT**,

LOSC, LOSH, можно воспользоваться приложениями *PAW* [10] и *ORIGIN* [11] предназначенными для обработки графической информации. Массивы данных в этих командах подготавливаются и записываются в отдельные файлы. Использование этих приложений позволило убрать собственную графическую часть программы.

1. Постановка задачи

Уравнения магнитостатики запишем в виде

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{J} + 4\pi \operatorname{rot} \vec{M}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (1)$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля; \vec{J} – плотность тока; \vec{M} – магнитный момент единицы объема ферромагнетика, связанный с индукцией через магнитную проницаемость $\mu(B)$:

$$\vec{M} = \frac{\mu-1}{4\pi\mu} \vec{B}. \quad (2)$$

Представим индукцию в виде

$$\vec{B} = \vec{B}_J + \vec{B}_M, \quad (3)$$

где \vec{B}_J – поле токов в свободном пространстве:

$$\vec{B}_J(\vec{r}) = -\frac{1}{c} \int_{V'} \frac{\vec{j}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' \quad (4)$$

Поле магнитных моментов \vec{M} удовлетворяет уравнениям

$$\operatorname{rot} \vec{B}_M = 4\pi \operatorname{rot} \vec{M}, \quad \operatorname{div} \vec{B}_M = 0 \quad (5)$$

и может быть представлена в виде

$$\vec{B}_M = \vec{\nabla}_r \int_{V'} \frac{\vec{M}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv'. \quad (6)$$

Из (2), (3) и (6) можно получить интегральное уравнение для плотности магнитного момента:

$$\vec{M}(\vec{r}) = \frac{\mu-1}{4\pi} \left[\vec{B}_J(\vec{r}) + \vec{\nabla}_r \int_{V'} \frac{\vec{M}(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' \right]. \quad (7)$$

Дискретизация этого уравнения и решение нелинейной системы алгебраических уравнений составляют основу численного алгоритма. При этом область ферромагнетика разбивается на элементарные объемы, состоящие из треугольных призм и тетраэдров, в каждом из которых плотность магнитного момента считается постоянной. Учет нелинейной зависимости магнитной проницаемости от поля $\mu(B)$ проводится по схеме простых итераций. Вычисление интеграла (4) для простых конфигураций обмоток проводится по

аналитическим формулам. В сложных геометриях проводится численное интегрирование по объему обмотки, используя метод, описанный в [12].

Поперечное сечение обмотки преобразованием координат трансформируется в прямоугольную форму, образованную токовыми нитями в продольном направлении. Каждая токовая нить аппроксимируется ломаной кривой и ее разбиение определяется заданной точностью вычисления интеграла. Интегрирование вклада от каждой токовой нити по площади прямоугольника проводится с использованием 5-точечной квадратурной формулы. Точность численного интегрирования установлена в теле программ, но может меняться заданием определенных параметров.

2. Структура программы

Программа состоит из функциональных блоков следующего назначения:

- а) занесение геометрии магнита;
- б) вычисление магнитных моментов;
- в) вычисление магнитных полей или интегралов поля;
- г) гармонический анализ поля и его интегралов;
- д) вычисление пондеромоторных сил и запасенной энергии;
- е) вычисление потерь в ВТСП и НТСП обмотках;
- ж) определение нагрева ВТСП обмотки.

2.1 Система единиц

В программах используется смешанная система единиц: линейные размеры измеряются в сантиметрах, угловые – в градусах с положительным направлением против часовой стрелки, ток в Амперах, магнитная индукция в Гауссах, напряженность магнитного поля в Эрстедах, неоднородность поля в процентах. В таких системах единиц магнитная проницаемость не имеет размерности. Пондеромоторные силы на прямолинейной части обмотки и в программе *MULTIC2D* выдаются в килоГрамм/сантиметр, на лобовых частях – в килоГраммах, но при задании данных имеется параметр, позволяющий использовать в качестве единиц силы – Ньютоны. Запасенная энергия вычисляется в Джоулях или Джоуль/метр в плоских задачах.

2.2 Управление программами

Управление работой программ осуществляется с помощью набора команд, перечень которых приведен в табл. 1.

Таблица 1. Управляющие команды программы

Команда	Функция
BHDA	Ввод таблицы $B-H$ для магнетика
BEAM	Графический вывод пучка электронов
CURH	Ввод таблицы критического тока $J(B)$ для ВТСП
DERH	Вычисление производных нелинейностей поля
DRAW	Занесение геометрии магнита
END	Конец работы программы
ERAS	Удаление элементов проводника или магнетика
FORC	Вычисление сил на лобовых частях обмотки (<i>MULTIC3D</i>)
FORI	Вычисление сил в магнетике
FIXI	Задание магнитных моментов для постоянных магнитов
GEOM	Вывод геометрии магнита в формате wrl
GETB	Вычисление поля или интегралов поля в точке, вдоль линии, в узлах двумерной или трехмерной сетки
GETF	Вычисление сил на прямолинейных частях обмотки
GETM	Вычисление магнитных моментов
HARM	Гармонический анализ поля или интегралов поля
HEAT	Вычисление нагрева ВТСП обмотки
HELP	Вывод информации о функции команд и значении параметров
INTE	Вычисление интегралов поля по длине, площади или объему
LEFF	Определение эффективной длины магнита
LOSC	Вычисление потерь в НТСП обмотке
LOSF	Вычисление потерь в магнетике
LOSH	Вычисление потерь в ВТСП обмотке
MESH	Генератор сетки
MODI	Изменение геометрии обмотки
MOVE	Изменение геометрии магнитопровода
PRIN	Печать параметров магнита
READ	Чтение параметров магнита из файла
STOP	Переход к расчету новой геометрии магнита
WRIT	Запись параметров магнита в файл

Список всех управляющих команд с кратким описанием их функций и набором параметров можно получить по команде **HELP**. Программа *MULTIC2D* использует входной файл *INPUT2.DAT* с набором управляющих команд для ее работы. Результаты расчетов записываются в файл *OUTPUT2.LIS*. Для программы *MULTIC3D* эти файлы имеют

имена *INPUT3.DAT* и *OUTPUT3.LIS*. Диагностика о работе программ записывается в выходной файл с результатами и дублируется на экране при работе с терминала или записывается в протокольный файл при работе программ в пакетном режиме. Остальное использование файловой системы приводится ниже при описании соответствующих команд.

2.3 Формат команд

Команда состоит из четырехсимвольного кодового слова, за которым в произвольном порядке следует список параметров [13]. Здесь и далее имена команд и параметров выделены жирным шрифтом. Команда должна начинаться с первой позиции в строке и не иметь внутри себя пробелов. Имя параметра определяется по первым четырем символам. Значения параметров имеют свободный формат, пробелы игнорируются:

$$\{\text{Команда}\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{имя} \\ \text{параметра} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{значение} \\ \text{параметра} \end{array} \right\}, \dots, \left\{ \begin{array}{l} \text{имя} \\ \text{параметра} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{значение} \\ \text{параметра} \end{array} \right\}.$$

В именах команд и параметров можно использовать как заглавные, так и малые буквы. Значения параметров могут задаваться как в числовой форме, так и в символьной. Числовая форма распознается в любом формате с плавающей и фиксированной точкой, совместимом с соответствующим заданием числа в FORTRAN. Максимальное число значащих цифр в числовом поле параметра определяется типом ЭВМ, цифры, превышающие максимальное число, игнорируются. Символьное значение параметра должно начинаться с буквы, его длина ограничена 8 символами. Как правило, символьное значение должно совпадать с соответствующим словарным значением параметра. Исключение составляет задание имени файла как параметра. При этом расширение файла либо не задается, а встроено в теле программ, либо задается другими параметрами.

Команды **END**, **STOP** параметров не имеют, команды **HELP**, **READ**, **WRIT** имеют другой формат:

HELP команда

READ имя файла

WRIT имя файла

Команды **READ** и **WRIT** используют файлы в двоичном формате. Для обмена информацией между различными типами ЭВМ можно использовать команды **READF** и **WRITF**, которые работают с форматными файлами.

Для задания команд **DRAW, GETB, HARM, MODI, FORC** требуется более 80 символов. В этом случае они делятся на строки. Эти команды заканчиваются терминатором **\$\$**, который ставится в начале следующей строки. Если строка начинается с символа **#**, то она воспринимается как строка-комментарий.

3. Задание геометрии магнита (Команды **DRAW, MODI, MOVE, MESH** и **ERAS**)

Каждый элемент тока или магнитопровода характеризуется кодами, определяющими его тип материала **MATE**, геометрическую форму **SHAPE** и тип симметрии **SYMM**. В трехмерной геометрии геометрическая форма обмотки определяется параметром **END**. Элементы тока и магнитопровода имеют независимую нумерацию, которая устанавливается автоматически при задании геометрии во входных данных.

3.1 Токовые элементы и элементы магнитопровода (команда **DRAW**)

Занесение токовых элементов и элементов ферромагнетика производится командой **DRAW**.

Тип элемента определяется параметром **MATE**:

MATE = 0, проводники с плотностью тока **J**;

MATE = 1, проводники с током **I**;

MATE = 2, элементы магнитопровода с постоянной магнитной проницаемостью μ ;

MATE = 3 ÷ 12, элементы ферромагнетика с переменной магнитной проницаемостью μ .

В последнем случае для каждого нового материала магнитопровода командой **BHDA** необходимо предварительно ввести кривую намагничивания в виде таблицы **B-H**.

Можно задавать до 10 различных областей магнитопровода с разными магнитными свойствами, включая элементы с постоянными магнитами. Если заданы параметры **I** или **J**, параметр **MATE** можно опустить. Для **MULTIC2D** число токовых элементов **NCMAX** не должно превышать 2000, максимальное число элементов ферромагнетика **NFMAX** равно 3000. Для **MULTIC3D** максимальное число элементов равно 1500 и 2500 соответственно. При необходимости максимальное число элементов можно переустанавливать в файле **MAGNET2.F** (программа **MULTIC2D**) или **MAGNET.F** (программа **MULTIC3D**) в операторе

PARAMETER (NFMAX=2500, NCMAX=1500)

3.1.1 Двумерная геометрия

В двумерной геометрии элементы проводника состоят из простых геометрических фигур, определяемых параметром **SHAPE**:

SHAPE = 0, прямоугольник с шириной **A** и высотой **B**, возможно задание

- в декартовой системе координат: **X1**, **Y1** – нижний левый угол прямоугольника, **ANGLE** – угол поворота относительно оси **X** (рис. 1a);
- в полярной системе: **R**, **ANGLE** – координаты середины стороны прямоугольника, (рис. 1b);

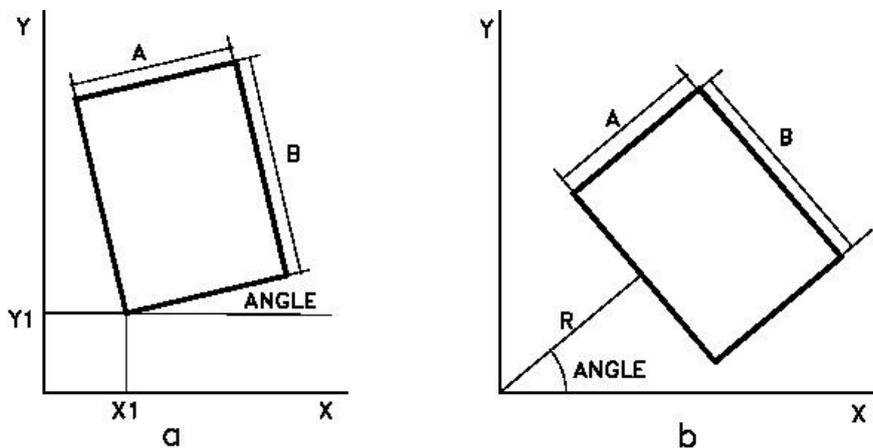


Рис. 1. Прямоугольник, **SHAPE** = 0.

SHAPE = 1, равнобедренный треугольник с основанием **A**, высотой **B**, углом **ANGLE** между основанием и осью **X** и координатами нижнего левого угла **X1**, **Y1** (рис. 2a);

SHAPE = 4, произвольный треугольник с вершинами **X1**, **Y1**, **X2**, **Y2**, **X3**, **Y3** (рис. 2b), нумерация вершин произвольна;

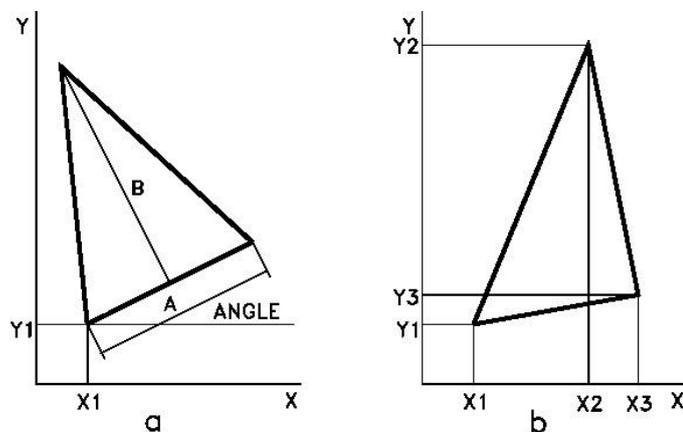


Рис. 2. Треугольник, **SHAPE** = 1 (a); **SHAPE** = 4 (b).

SHAPE = 2, кольцевой сектор, заданный параметрами **R** – внутренний радиус, **A** – радиальная толщина, **PHI**, **ALPHA** – начальный и конечный углы (рис.3а); если задан дополнительный параметр **R1**, то кольцевой сектор превращается в эллипсный с внутренними полуосями **R** вдоль оси **X** и **R1** вдоль оси **Y**;

SHAPE = 3, произвольный четырехугольник с вершинами **X1, Y1, X2, Y2, X3, Y3, X4, Y4** (рис.3б), нумерация вершин может быть по часовой или против часовой стрелки;

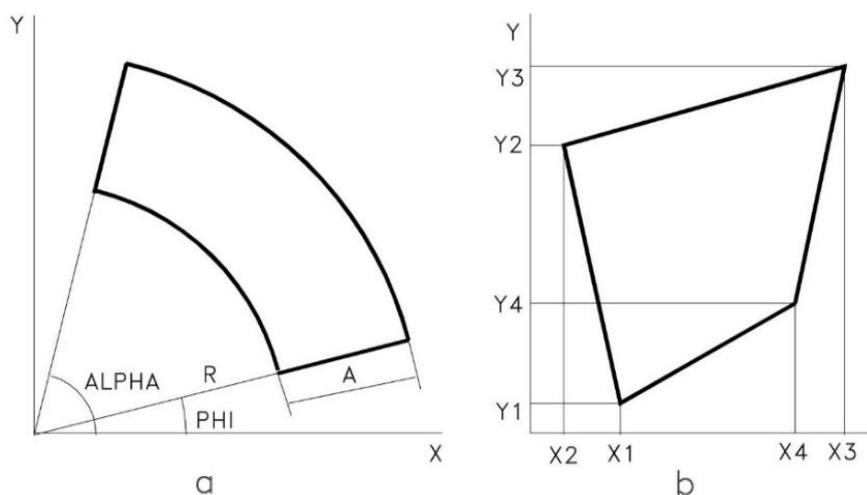


Рис. 3. Кольцевой сектор, **SHAPE = 2** (а) и четырехугольник, **SHAPE = 3** (б).

Для генерации регулярно расположенных элементов используются параметры **NX, NY, DX, DY** (**SHAPE = 0, 1, 3, 4**) и **NR, NPHI, DR, DPHI** (**SHAPE = 2**). Параметр **SHAPE = 0** или **SHAPE = 2** можно опустить.

SHAPE = 21, Проводник с поперечным сечением в вид круга с радиусом **RAD1**, координаты центра проводника в цилиндрической системе координат равны **R, PHI**, либо в декартовой системе координат **XC, YC**. Генерация элементов производится либо параметрами **NX, NY, DX, DY**, либо параметрами **NR, NPHI, DR, DPHI**.

SHAPE = 22, полый проводник нуклотроновского типа [14]. Внутренний и наружный радиусы задаются параметрами **RAD1** и **RAD2**, координаты центра проводника в цилиндрической системе координат равны **R, PHI**, либо в декартовой системе координат **XC, YC**. Генерация элементов производится либо параметрами **NX, NY, DX, DY**, либо параметрами **NR, NPHI, DR, DPHI**. Между двумя радиусами расположены витки диаметром **RAD2 – RAD1**. Ток **I** задается в одном витке.



Рис. 4. Проводник с поперечным сечением в вид круга, **SHAPE** = 21 (a). Полый проводник нуклотроновского типа, **SHAPE** = 22 (b).

3.2 Трехмерная геометрия

Задание геометрии обмотки

Геометрия обмоток в программе *MULTIC3D* задается в локальной системе координат X', Y', Z' . Связь локальной и глобальной систем X, Y, Z устанавливается параметрами **XC, YC, ZC, ANGLE**, где первые три параметра определяют центр локальной системы координат, а последний параметр задает ее поворот вокруг глобальной оси Z . Для более сложных ориентаций обмотки в пространстве можно воспользоваться углами Эйлера **T, P, S**. По умолчанию локальная система координат совпадает с глобальной.

Типы обмоток в трехмерном случае определяются параметром **END**:

END = 0, соленоид (рис.5); **R1** и **R2** – внутренний и наружный радиусы; **H1** и **H2** – начальная и конечная продольные длины. Возможна генерация обмоток вдоль радиального **DR, NR** и продольного **DZ, NZ** направлений.

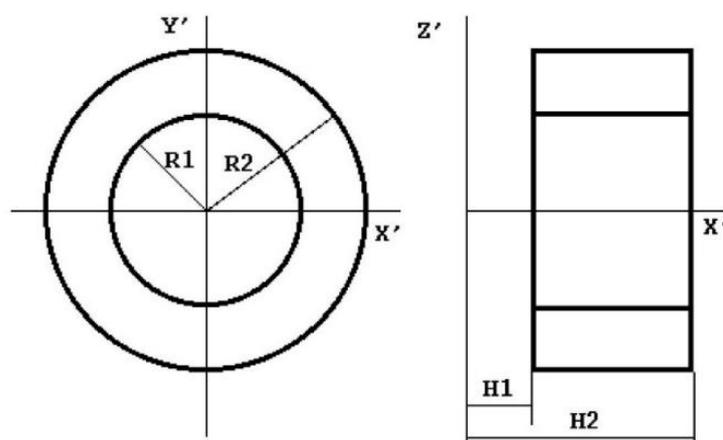


Рис. 5. Соленоид, **END** = 0.

END = 1, обмотка типа *RACETRACK* (рис.6а). В поперечном сечении прямоугольник с параметрами **X1**, **Y1** – координаты нижнего левого угла; **A**, **B** – ширина и высота прямоугольника. Длина прямолинейной части от центра магнита до закругления – **H1**, минимальный радиус закругления – **R**. Возможно задание нестандартного типа обмотки *RACETRACK* типа равнобедренной трапеции в плоскости *X'Z'* (рис.6b), у которой боковые прямолинейные брусья с полудлиной **H1** не параллельны между собой, а составляют угол \pm **ALPHA** с осью *Z'*. В этом случае минимальные радиусы закруглений при меньшем и большем основаниях трапеции задаются соответственно параметрами **R1** и **R2**.

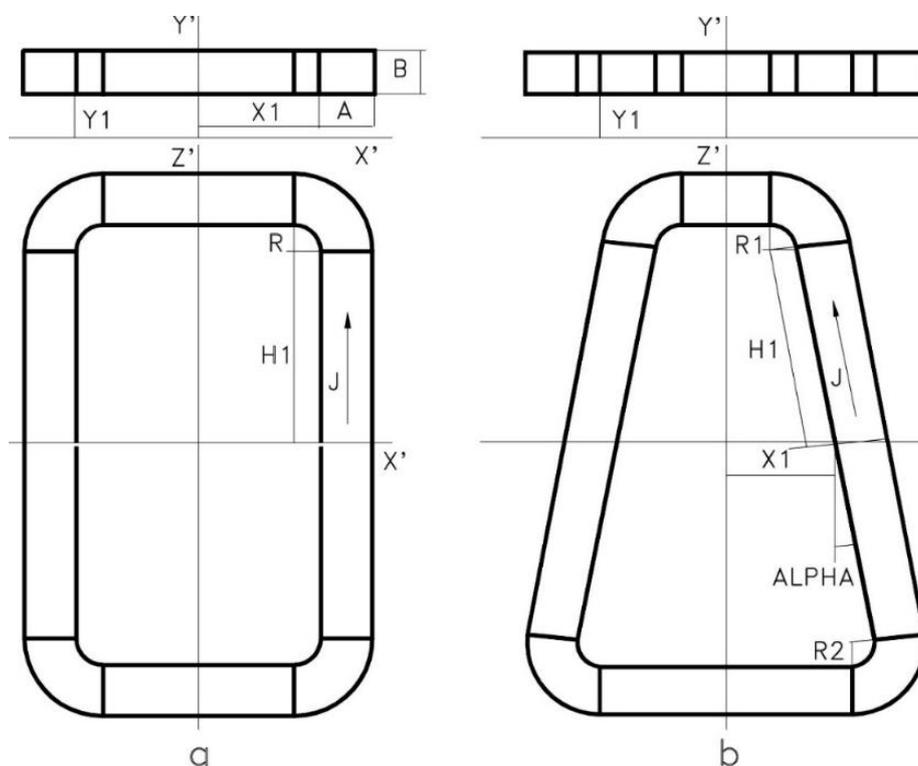


Рис. 6. Обмотка типа *RACETRACK*, **END = 1**.

END = 2, обмотка типа *BEDSTEAD* (рис.7). **R1**, **R2** – минимальные радиусы закруглений в плоскостях *Y'Z'* и *X'Y'*, **H2** – длина прямолинейной части, параллельной оси Y' . Остальные параметры совпадают с **END = 1**. Угол изгиба лобовой части обмотки по умолчанию равен 90° в плоскости *Y'Z'*, как показано на рис.7, в противном случае его надо задавать параметром **PHI**. Для мультиполюсных обмоток с

симметрией выше дипольной, тип мультиполю задаётся параметром **SYMC**, равным числу полюсов обмотки, тогда часть обмотки с обратным знаком тока отражается относительно плоскости RZ' , составляющей с осью X' угол $180/SYMC$ градусов, по умолчанию **SYMM** = 2.

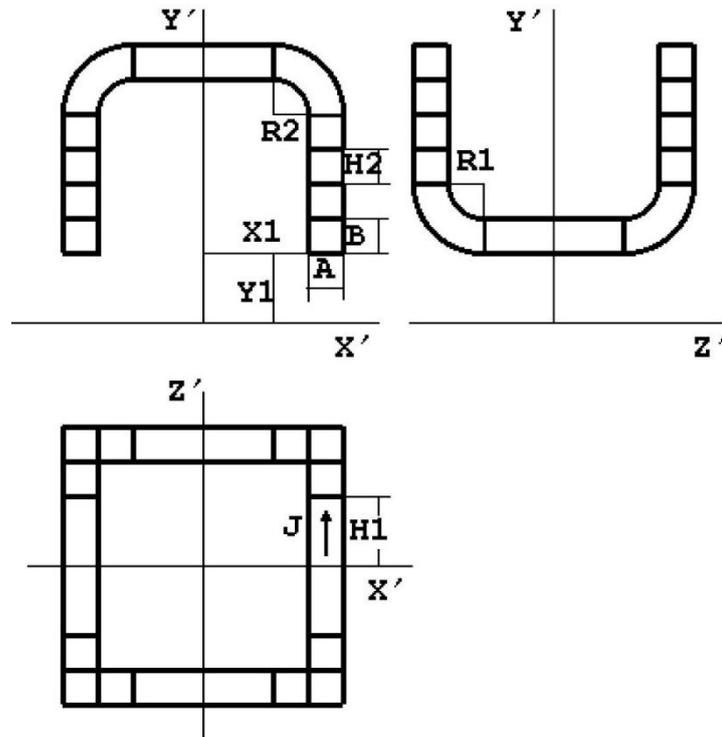


Рис. 7. Обмотка типа *BEDSTEAD*, **END** = 2.

END = 3, седловидная обмотка на цилиндре (рис.8). Поперечное сечении прямолинейной части – криволинейный прямоугольник, образованный двумя концентричными дугами с центром в начале координат (рис.9а). Положение прямоугольника определяется углом **ALPHA** между осью X' и радиусом **R**, проведенном к середине внутренней дуги с центра локальной системы координат. Концы дуг соединяются прямолинейными отрезками, параллельными этому радиусу, расстояние между дугами **A**, длина наружной дуги **B**. Начало дуги на цилиндре определяется углом **BETA** в плоскости $X'Y'$. Длина торца равна **R1**, длина прямолинейной части по средней линии от центра магнита – **H1**, полная длина обмотки от центра магнита – **H2**. Лобовые части состоят из дуг на цилиндре, соединенных с прямолинейными частями в

поперечном сечении криволинейными отрезками в форме винтовой линии [15]. Каждая токовая нить винтовой линии с начальными координатами (ρ, φ) в поперечном сечении прямолинейной части описывается параметрическими уравнениями:

$$\begin{aligned} x(\theta) &= \rho \cos \theta, \quad y(\theta) = \rho \sin(\theta), \\ z(\theta) &= H1 + \theta (H2 - H1) / (BETA \cdot ALPHA), \quad BETA \leq \theta \leq PHI \end{aligned} \quad (8)$$

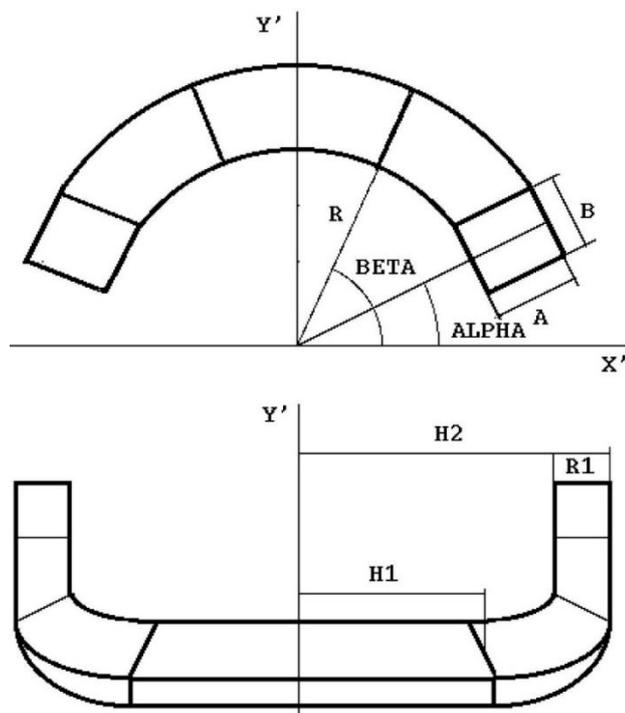


Рис. 8. Седловидная обмотка, $END = 3, \div 8$.

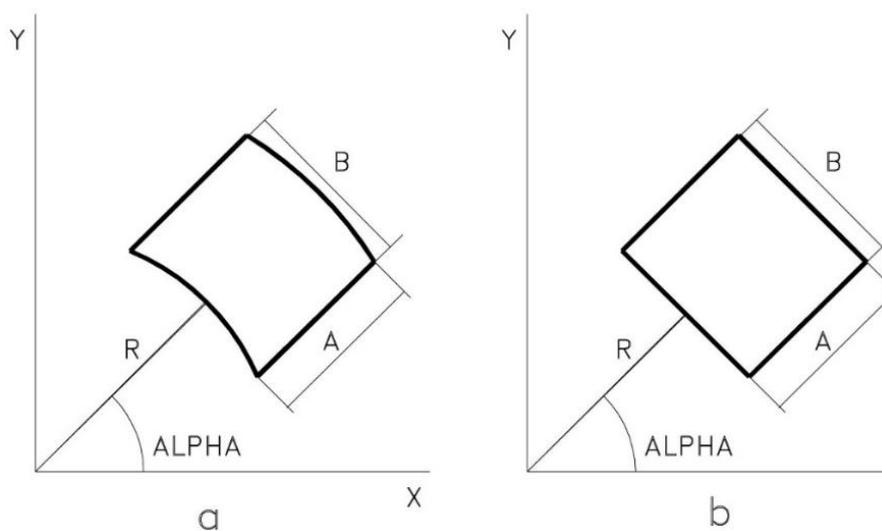


Рис. 9. Поперечное сечение седловидных обмоток.

END = 4, седловидная обмотка на цилиндре (рис.10) [16], [17]. Лобовые части имеют форму постоянного периметра. В поперечном сечении --- прямоугольник с размерами **A** и **B** (рис.9b), положение прямоугольника определяется углом **ALPHA** между осью **X'** и радиусом **R**, проведенном с центра локальных координат к серединестороны с шириной **B**. Параметры **H1**, **H2** аналогичны **END = 3**, лобовые части обмотки на торце магнита составляют с образующей цилиндра угол **PHI**.

END = 5, седловидная обмотка на цилиндре с поперечным сечением как у **END = 3** и лобовыми частями аналогично **END = 4** (рис.9a).

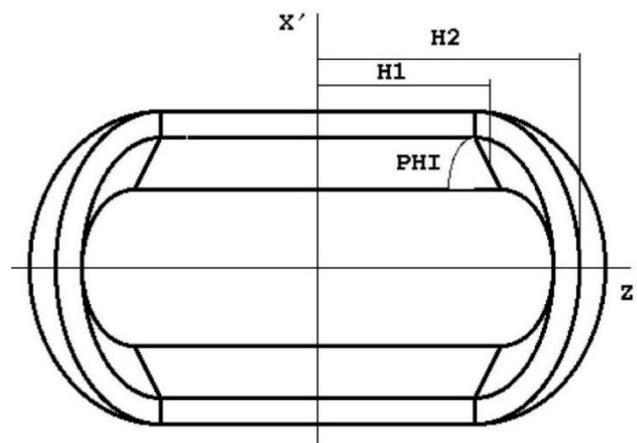


Рис. 10. Обмотка постоянного периметра, **END = 4, 5**.

END = 6, дуга окружности прямоугольного сечения (рис.11a) с размерами **A**, **B** и координатами левого нижнего угла **X1**, **Y1**. Внутренний радиус дуги – **R**, угол загиба – **PHI**. Ориентация блока в пространстве определяется углами Эйлера **T**, **P**, **S**, отражения в плоскостях **X'Y'**, **Y'Z'**, **Z'X'** задаются параметрами **RXY**, **RYZ**, **RZX**, которые могут принимать значения **POS**, **NEG**, **NO**, обозначающие соответственно положительное отражение (вращение), отрицательное (зеркальное) отражение и отсутствие отражения.

END = 7, прямоугольный брус (рис.11b) с поперечными размерами **A**, **B**, продольной длиной **H1** и координатами левого нижнего угла **X1**, **Y1**. Ориентация блока задается аналогично **END = 6**.

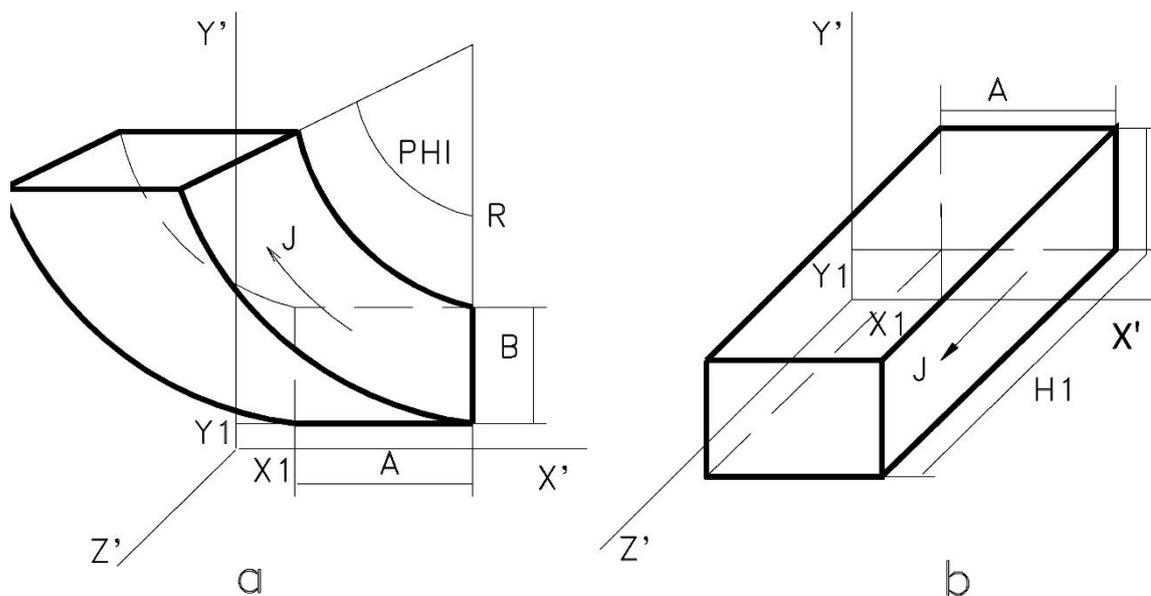


Рис. 11. Дуга окружности прямоугольного сечения, **END** = 6 (a) и прямоугольный брусок, **END** = 7 (b).

END = 8, поперечное сечение в виде кольцевого сектора, определяемого параметрами **R**, **A**, **PHI**, **ALPHA** (рис.3). Лобовые части подобны обмотке с **END** = 3.

END = 9, седловидная обмотка с поперечным сечением **END** = 8. Прямолинейные части и дуги в развертке $\rho\varphi - Z'$ соединяются по эллипсам (рис.12a).

END = 10, седловидная обмотка с поперечным сечением **END** = 8. Соединение прямолинейных частей и дуг в развертке $\rho\varphi - Z'$ – по дугам окружности (рис.12b) 410].

END = 11, седловидная обмотка с поперечным сечением **END** = 8. Комбинированные лобовые части, каждая токовая нить на лобовой части состоит из сопряженных дуг малого и большого радиусов в развертке $\rho\varphi - Z'$ (рис.12c). Минимальный радиус загиба **RS**, угол сопряжения дуг в развертке – **TETA** [18]. Параметры **END** = 10, 11 можно опустить, они определяются по набору остальных параметров.

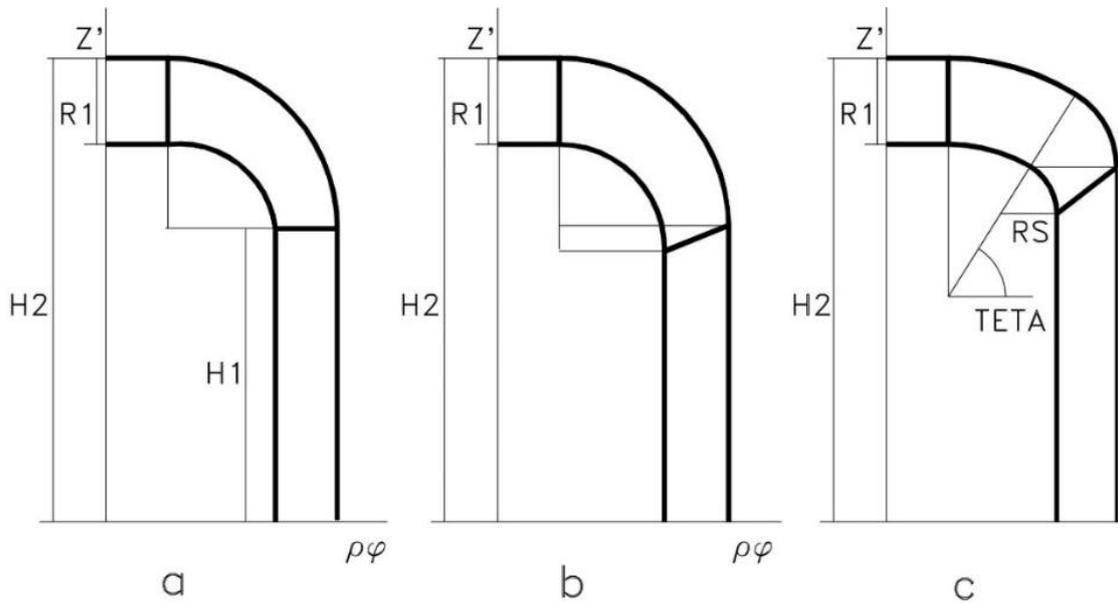


Рис. 12. Развертка лобовых частей, **END** = 9 (a), **END** = 10 (b) и **END** = 11 (c).

END = 12, седловидная обмотка типа *DOGBONE*. Поперечное сечение --- кольцевой сектор **END** = 8). Прямолинейные части уложены на цилиндр радиуса **R**, который на концах переходит в расширяющийся конус с угловым раствором $2 \times \mathbf{TETA}$ и высотой **H3** (рис.13). Прямолинейные части на конусе уложены плотным жгутом с фиксированным углом **PHI**. Лобовые части уложены на цилиндре радиуса $R + H3 \operatorname{tg}(\mathbf{TETA})$. Форма лобовых частей соответствует **END** = 10.

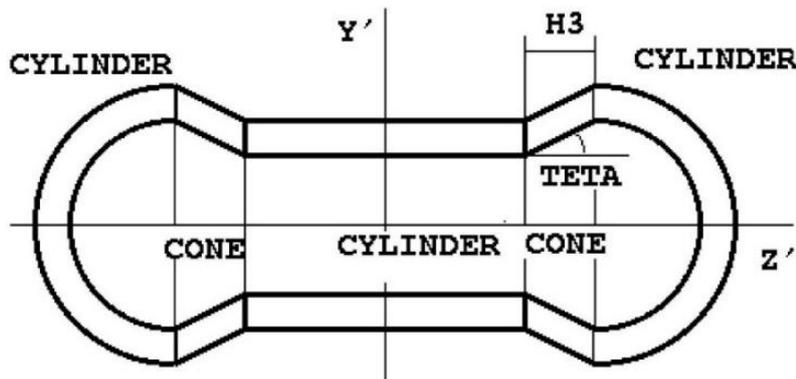


Рис. 13. Седловидная обмотка типа *DOGBONE*, $12 \leq \mathbf{END} \leq 17$.

END = 13, седловидная обмотка типа *DOGBONE* с фиксированным углом **PHI** на конусе и формой лобовых частей, соответствующей **END** = 11.

END = 14, седловидная обмотка типа DOGBONE, жгут на конусе уложен с фиксированным углом **ALPHA**, лобовые части соответствуют **END** = 10.

END = 15, седловидная обмотка типа DOGBONE, жгут на конусе уложен с фиксированным углом **ALPHA**, лобовые части соответствуют **END** = 11.

END = 16, седловидная обмотка типа DOGBONE, прямолинейная часть на конусе расширяется с сохранением углов **PHI** и **ALPHA**, лобовые части соответствуют **END** = 10.

END = 17, седловидная обмотка типа DOGBONE, прямолинейная часть на конусе расширяется с сохранением углов **PHI** и **ALPHA** лобовые части соответствуют **END** = 11.

END = 18, винтообразная обмотка прямоугольного сечения и спиральной намоткой вдоль оси **Z'** (рис.14). Сечение обмотки задается аналогично **END** = 1 или **END** = 2 параметрами **X1**, **Y1**, **A**, **B**. Набор параметров **H1**, **R1** определяет лобовые части типа *RACETRACK*, а **H1**, **H2**, **R1**, **R2** – *BEDSTEAD*. Шаг спирали задается параметром **BETA**, по умолчанию равной 180°. Координата токовой нити в продольном направлении описывается параметрическими формулами

$$\begin{aligned} X(t) &= \rho \times \cos(\varphi + \mathbf{BETA} \times t), \\ Y(t) &= \rho \times \sin(\varphi + \mathbf{BETA} \times t), \\ Z(t) &= \mathbf{H1} \times t, \quad 0 \leq t \leq 1, \end{aligned} \tag{9}$$

где ρ , φ – начальные координаты токовой нити.

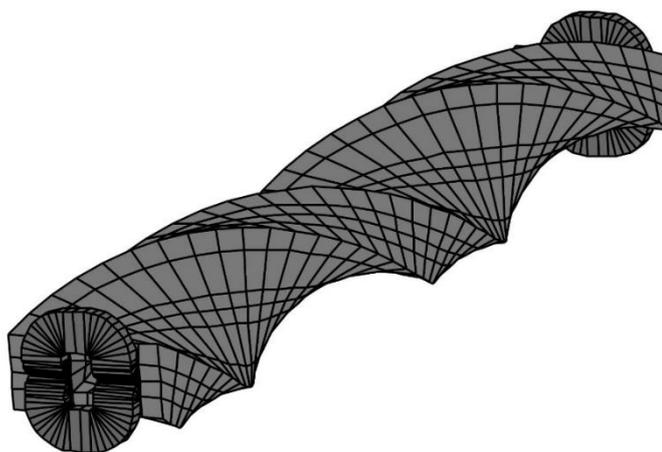


Рис. 14. Общий вид спиральной обмотки.

Задание геометрии магнитопровода

В плоских задачах область ферромагнетика состоит из треугольных прямых призм, параллельных оси Z с длиной от -1000000 до $+1000000$. В пространственных задачах область магнетика разбивается на треугольные или четырехугольные прямые призмы и тетраэдры. В трехмерном случае начало и конец призмы задаются параметрами $H1$ и $H2$, ориентация призм в пространстве определяется углами Эйлера T, P, S . По умолчанию углы Эйлера равны нулю, при этом основания призм лежат в плоскости XY . Для генерации регулярно расположенных элементов используются параметры $NX, NY, NZ, NR, NPHI, DX, DY, DZ, DR, DPHI$.

Геометрическая форма основания области призм определяется параметром **SHAPE**:

SHAPE = 0, 1, 3, 4 полностью совпадают с аналогичными геометрическими формами для задания элементов проводника в двумерной геометрии;

SHAPE = 42, 43, 44, произвольный треугольник с вершинами $X1, Y1, X2, Y2, X3, Y3$, разбитый соответственно на 2, 3 или 4 треугольника (рис.15);

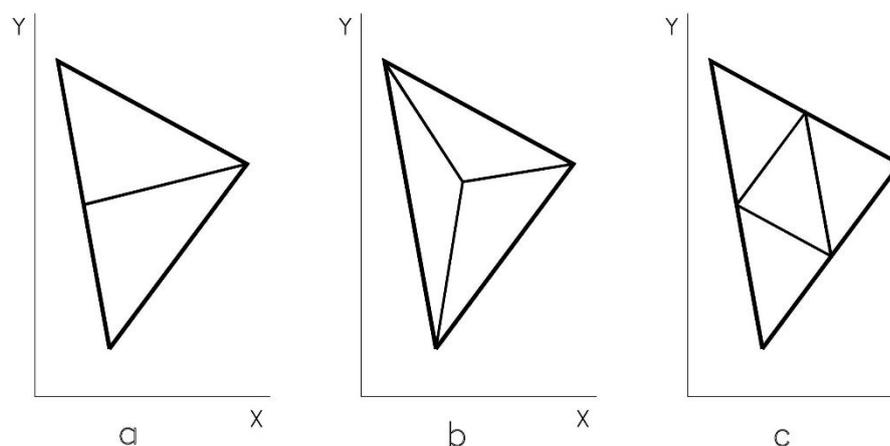


Рис. 15. Разбиение треугольников, **SHAPE** = 42, 43, 44.

SHAPE = 5, область кольцевого сектора, образованная параметрами $R, DR, NR, PHI, DPHI, NPHI$, число треугольников равно $4 \times NR \times NPHI$ (рис.16a), если $R = 0$, то первый слой толщиной DR делится на $NPHI$ треугольников;

SHAPE = 50, аналогично **SHAPE** = 5, число треугольников равно $2 \times NR \times NPHI$ (Рис.16b), при $R = 0$ первый слой также делится на $NPHI$ треугольников;

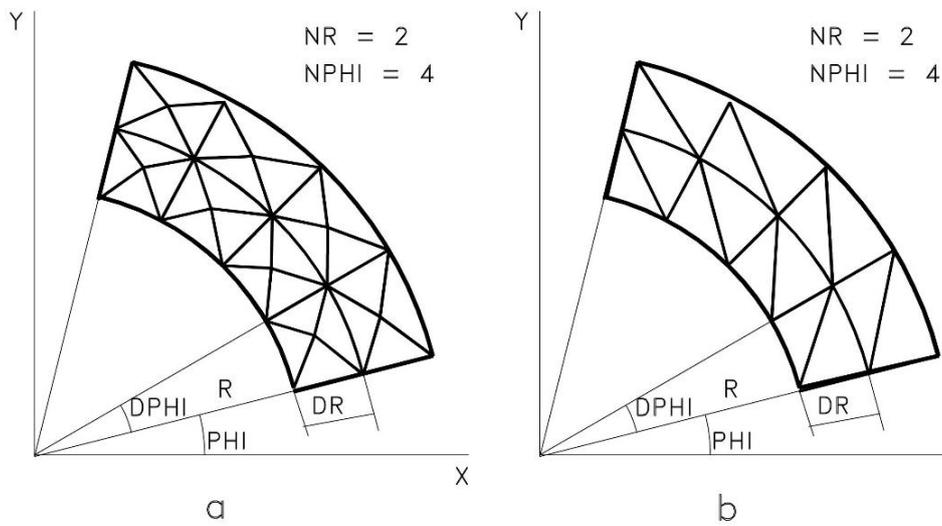


Рис. 16. Кольцевой сектор, **SHAPE** = 5 (a) и **SHAPE** = 50 (b).

SHAPE = 6, произвольный четырехугольник с вершинами **X1, Y1, X2, Y2, X3, Y3, X4, Y4**, разбитый на треугольники параметрами **NX** (стороны 1-2) и **NY** (стороны 1-4), число треугольников равно $2 \times NX \times NY$ (рис.17a), нумерацию вершин можно задавать как по, так и против часовой стрелки;

SHAPE = 7, произвольный четырехугольник, аналогично **SHAPE** = 6, число треугольников равно $4 \times NX \times NY$ (рис.17b);

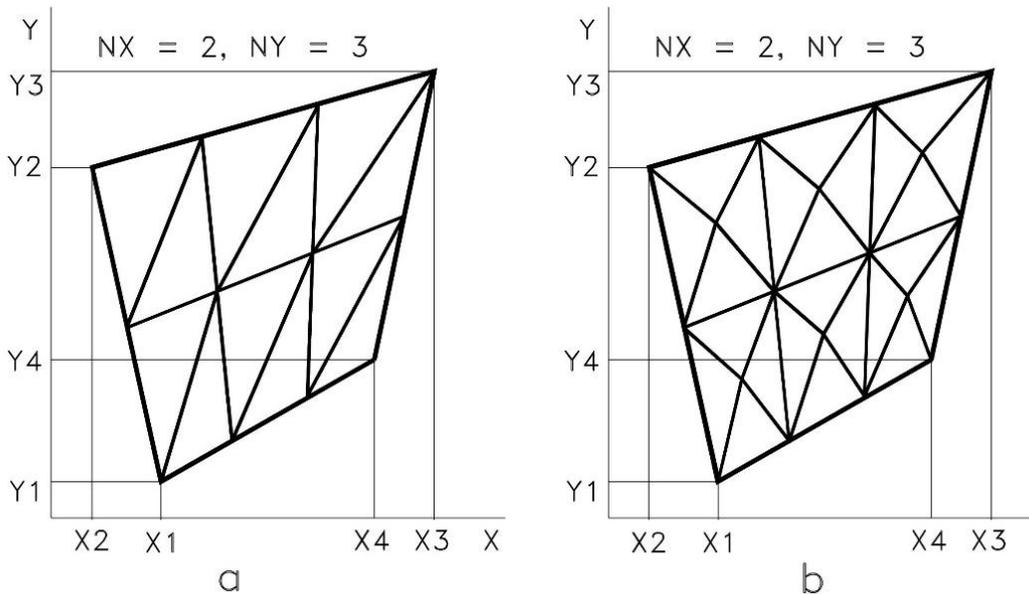


Рис. 17. Произвольный четырехугольник, **SHAPE** = 6 (a) и **SHAPE** = 7 (b).

SHAPE = 71, 72, 73, произвольные четырехугольники с неравномерной сеткой, сгущающейся соответственно вдоль оси *X* (Рис. 18а), вдоль оси *Y* (Рис. 18б) или вдоль обеих осей (Рис. 18с). Параметры **DX**, **DY** задают начальные приращения, которые потом уменьшаются в два раза. Пример задания фигуры, представленной на Рис. 18а, здесь параметр **SYMM** задает уровень симметрии без отражений:

```
draw shape=71, mate=3, x1=0, x2=8, x3=8, x4=0, y1=1, y2=2, y3=6
draw y4=7, nx=5, ny=4, symm=1, dx=0.5, dy=0.5
$$
```

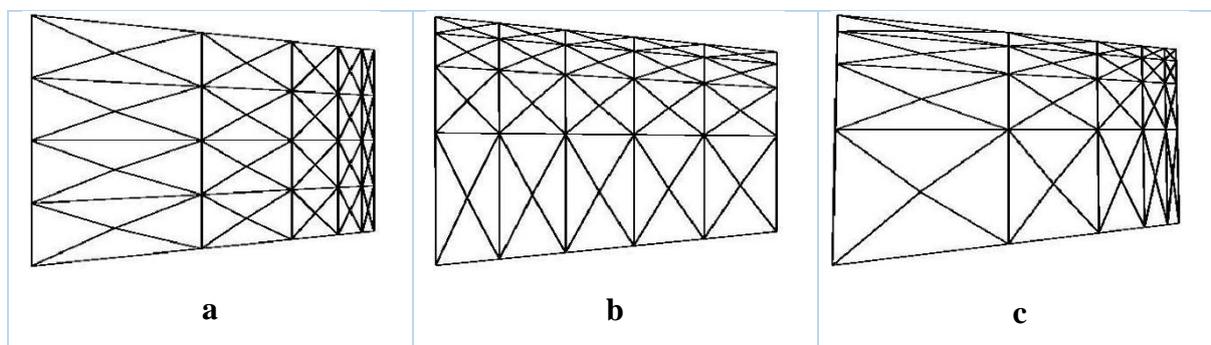


Рис. 18. Произвольные четырехугольники с неравномерной сеткой **SHAPE** = 71, 72, 73,

SHAPE = 8, кольцевой сектор с вырезом в виде полукруга (рис.19а); параметры области – **R**, **DR**, **NR**, **PHI**, **NPHI**; радиус выреза **R1**, диаметр полукруга совпадает с линией, составляющей угол **ALPHA** с осью **X**, его центр равен **Y1**, дуга окружности отверстия состоит из **NY** отрезков; для мультипольных магнитов по умолчанию **ALPHA** = 180/**SYMM**.

SHAPE = 9, аналогично **SHAPE** = 8 (рис.19б), диаметр полукруга совпадает с линией, составляющей угол **PHI** с осью **X**, по умолчанию **PHI** = 0.

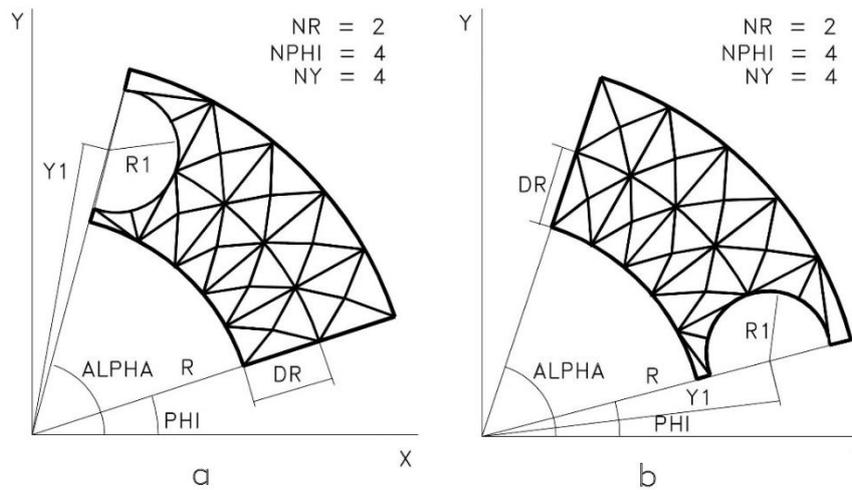


Рис. 19. Кольцевой сектор с отверстием, **SHAPE** = 8 (a) и **SHAPE** =9 (b).

Поперечное отверстие в цилиндрическом магнитопроводе задается параметром **SHAPE** = 11, 12. Поперечное сечение магнитопровода определяется параметрами **R**, **DR**, **NR**, **PHI**, **DPHI**, **NPHI** аналогично **SHAPE** = 5. Радиус отверстия равен **R1**, азимутальное положение центра отверстия – **ANGL**, продольное положение совпадает с торцом магнитопровода, задаваемым параметром **H2**. Начальное и конечное положение дуги отверстия равны **ALPHA** и **BETA**, их значения должны лежать в интервале -90° , $+90^\circ$.

SHAPE =11 (рис.20a) задает равное азимутальное разбиение поперечного сечения магнитопровода в области отверстия, **SHAPE** =12 (рис.20b) --- равное азимутальное разбиение дуги отверстия на хорды. Число тетраэдров, аппроксимирующих отверстие, равно $6 \times (\text{ALPHA} - \text{BETA}) / \text{DPHI}$.

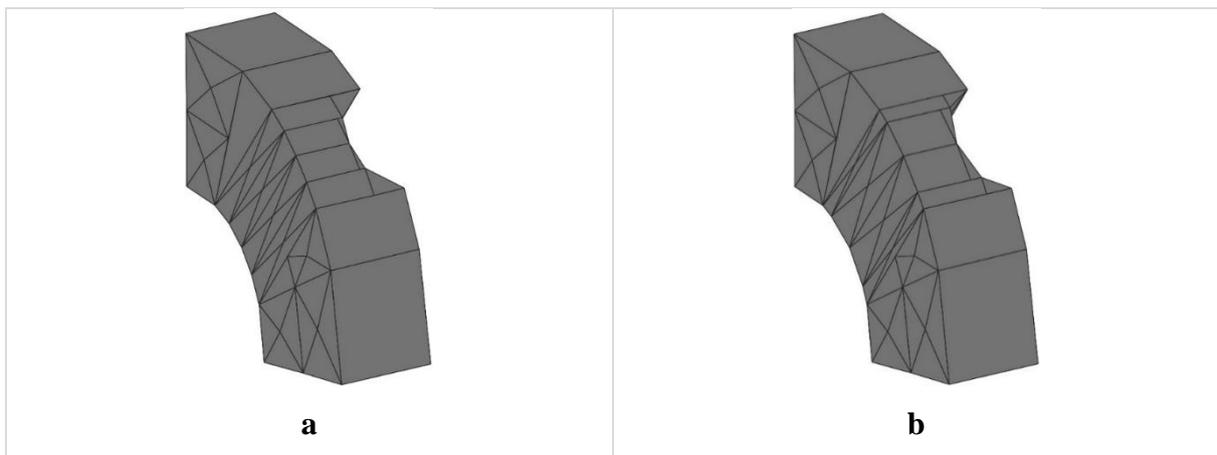


Рис. 20. Цилиндрический магнитопровод с круглым отверстием, **SHAPE** = 11 (a) и **SHAPE** = 12 (b).

SHAPE = 13, четырехугольник как **SHAPE** = 7, но нижняя сторона располагается в форме гиперболы $y = YC + A/(x-XC)$, рис. 21.

SHAPE = 14, четырехугольник как **SHAPE** = 7, но нижняя сторона располагается в форме параболы $y = Ax^2 + Bx + XC$.

SHAPE = 15, четырехугольник как **SHAPE** = 7, но нижняя сторона располагается в форме гиперболы $y = YC + R1/R\sqrt{R^2 - (x - XC)^2}$.

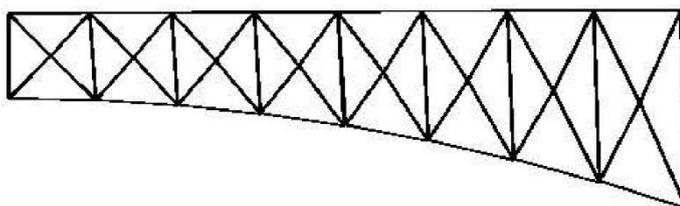


Рис. 21. Четырехугольник с нижней стороной в форме гиперболы.

Для задания областей, состоящих из произвольных треугольных пирамид – тетраэдров, используется отрицательный параметр **SHAPE**. При задании этих элементов углы Эйлера **T, P, S** не применяются.

SHAPE = -4, отдельный тетраэдр с вершинами **X1, X2, X3, X4, Y1, Y2, Y3, Y4, Z1, Z2, Z3, Z4**, нумерация вершин произвольна;

SHAPE = -3, геометрическое тело – пентаэдр (рис.22а), в основаниях которого лежат произвольные треугольники, а боковые грани – произвольные четырехугольники. Параметры вершин треугольников **X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3, Z1, Z2, Z3** для нижнего основания и **X5, X6, X7, Y5, Y6, Y7, Z5, Z6, Z7** для верхней грани. Нумерация вершин нижней и верхней граней должна быть согласована. Пентаэдр делится на 6 тетраэдров.

SHAPE = -7, геометрическое тело – гексаэдр (рис.22b), все грани которого --- произвольные четырехугольники. Параметры вершин четырехугольников **X1, X2, X3, X4, Y1, Y2, Y3, Y4, Z1, Z2, Z3, Z4** для нижнего основания и **X5, X6, X7, X8, Y5, Y6, Y7, Y8, Z5, Z6, Z7, Z8** для верхнего основания. Также необходимо согласование нумерации вершин нижней и верхней граней. Гексаэдр делится на 5 тетраэдров.

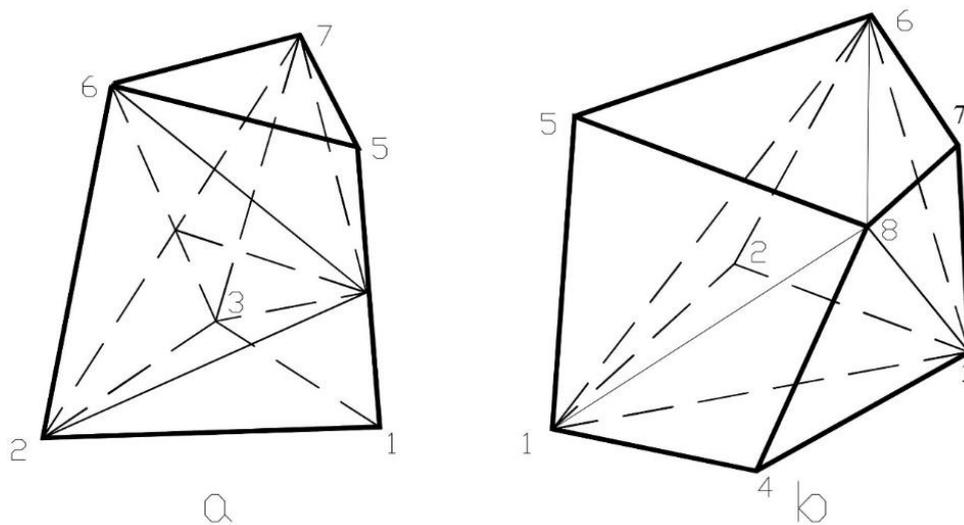


Рис. 22. Пентаэдр, **SHAPE** = -3 (a) и гексаэдр, **SHAPE** = -7 (b).

Конусные области формируются из призм и тетраэдров. Они могут определяться параметром **SHAPE** = 10. Это фигура, образованная кольцевым основанием, (**R**, **DR**, **PHI**, **DPHI**, **NPHI**) и двумя боковыми поверхностями, одна из которых коническая, другая – цилиндрическая. Поверхности пересекаются у основания, заданного радиусом **R1**. Ориентация оси тела вращения вдоль осей **Z**, **Y**, **X** задается одним из значений параметра **PLAN** = **XY**, **ZX**, **ZY**. Порядок символов при задании значений параметра **PLAN** может быть произвольный, например, **YX**, **XZ**, **YZ**. Это справедливо для всех команд, использующих этот параметр. Параметры **H1** и **H2** задают начальное и конечное положение конусной области вдоль продольной оси, причем параметр **H2** должен соответствовать большему основанию конуса. Радиус **R1** может иметь два значения. Если **R1** = **R**, то фигура является усеченным конусом с внутренним цилиндрическим отверстием (рис.23a) и состоит из **NPHI** призм и **NPHI** + 1 тетраэдров. Значение **R1** = **R** + **DR** определяет цилиндр с коническим отверстием в виде воронки (рис.23b). Число призм во второй фигуре равно **NPHI**, а тетраэдров $-2 \times \text{NPHI} + 1$. Центр оси тела вращения задается параметрами **XC**, **YC**. Параметр **SHAPE** = -10 также определяет конусную область, аналогичную **SHAPE** = 10, но первый и последний (**NPHI** + 1) угловые растворы равны **DPHI**/2.

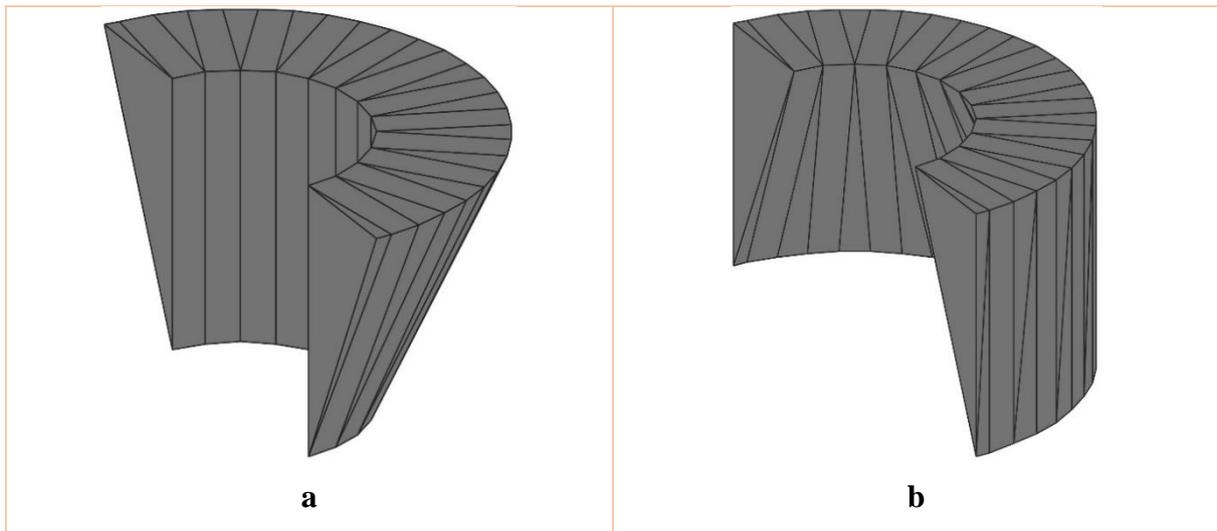


Рис. 23. Конус с цилиндрическим отверстием (а) и цилиндр с конусным отверстием (b), **SHAPE** = 10.

Симметрия обмоток

Код симметрии **SYMM** облегчает задание геометрии магнита и определяется для каждой обмотки или элемента проводника.

Для соленоидов используются коды симметрии -3, 0, 3:

SYMM = -3, 0 – отражение в плоскости *XY* с сохранением знака тока;

SYMM = 3 – нет отражения.

Для остальных типов обмоток и элементов проводника используются следующие значения параметра **SYMM**:

SYMM = 1 – нет отражения, задается вся геометрия;

SYMM = -1 – отражение в плоскости *ZY* с отрицательной сменой знака тока;

SYMM = -2 – отражение в плоскости *ZX*; без смены знака тока;

SYMM = *N*, *N* = 2, 4, 6, ... (мультипольные магниты) – в программе *MULTIC3D* обмотка поворачивается *N-1* раз вокруг оси *Z* на угол $360/N$. Каждый поворот сопровождается сменой знака токов. Для элементов проводника в программе *MULTIC2D* – зеркальное отражение со сменой знака токов задаваемой области относительно линии, составляющей угол $180/N$ с осью *X* в плоскости *XY*, далее поворот *N-1* раз против часовой стрелки на угол $360/N$ также с изменением знака токов.

Для токовых элементов с **END** = 6, 7 используется только значения **SYMM** = 1 и **SYMM** = 2, 4, 6, ..., причем в мультипольной симметрии для этих элементов параметр **SYMM** определяет только повороты вокруг оси **Z** и может быть как положительный, так и отрицательный. Отрицательный параметр **SYMM** показывает смену знака тока при каждом повороте, положительный параметр сохраняет знак тока неизменным. Параметр **SYMM** учитывает все вращения и отражения, заданные параметрами **RXY**, **RYZ** и **RZX**.

Симметрия ферромагнетика

Если ферромагнетик кроме геометрической симметрии имеет также симметрию по магнитному полю, определяемую симметрией обмоток (производящее поле), то достаточно задавать только один блок. При этом необходимо следить, чтобы симметрия по полю соответствовала геометрической симметрии. Например, кольцевые магнитные экраны соленоида и диполя имеют одинаковые симметрии по геометрии, но разные по полю. Генерация отражаемой части магнитопровода с учетом обоих типов симметрии также осуществляется заданием параметра **SYMM**.

Для соленоидальных полей:

SYMM = -3 – геометрия с зеркальным отражением в *XY*, *YZ* и *ZX* плоскостях, производящее поле со сменой знаков в плоскостях *YZ* и *ZX*.

SYMM = 0 – геометрия с зеркальным отражением в *XY* и *ZX* плоскостях, производящее поле со сменой знака в плоскости *ZX*.

SYMM = 3 – геометрия с зеркальным отражением в *ZX* плоскости и сменой знака производящего тока.

SYMM = -300 ÷ -399 – геометрия, как у мультипольной симметрии обмоток, зеркальное отражение со сменой знака производящего тока относительно плоскости *RZ*, составляющей с плоскостью *XZ* угол $180/N$, ($N = -\mathbf{SYMM} - 300$, далее поворот $N - 1$ раз вокруг оси *Z* на угол $360/N$ без смены знака производящего поля, затем положительное зеркальное отражение в *XY* плоскости как геометрии, так и производящего поля.

SYMM = 300 ÷ 399 – аналогично **SYMM** = -300 ÷ -399 с $N = \mathbf{SYMM} - 300$, без отражений в *XY* плоскости.

SYMM = -3000÷ -3999 – поворот $N - 1$ раз вокруг оси Z на угол $180/N$, $N = -\mathbf{SYMM} - 3000$ без смены знака производящего поля, затем положительное зеркальное отражение в XY плоскости как геометрии, так и производящего поля.

SYMM = 3000÷3999 – аналогично **SYMM** = -3000÷ -3999 с $N = \mathbf{SYMM} - 3000$, без отражений в XY плоскости.

SYMM = -100÷ -199 – подобно **SYMM** = -300÷ -399, но без смены знака производящего поля при зеркальном отражении относительно плоскости RZ .

SYMM = 100÷199 – аналогично **SYMM** = -100÷ -199 с $N = \mathbf{SYMM} - 100$ без отражений в XY плоскости.

Для остальных типов производящего поля и элементов магнетика:

SYMM = 1 – задается полная геометрия без дополнительных генераций элементов.

SYMM = -1 – зеркальное отражение геометрии в плоскостях XY и ZY . При каждом отражении производящее поле меняет знак.

SYMM = -2 – зеркальное отражение геометрии в XY и ZX плоскостях. Смена знака производящего поля при отражении в плоскости XY .

SYMM = N , $N = 2, 4, 6, \dots$ – мультипольная симметрия для магнитов с числом полюсов N . Геометрическое отражение аналогично **SYMM** = -300÷ -399 с $N = \mathbf{SYMM}$. При каждом повороте производящее поле меняет знак.

SYMM = 21 – аналогично **SYMM** = 2, но призмы в плоскости XZ отражаются под углом **ANGL**

SYMM = -4 – зеркальное отражение геометрии в YZ и ZX плоскостях. Смена знака производящего поля при отражении в плоскости YZ .

SYMM = -40 – зеркальное отражение геометрии в XY , YZ и ZX плоскостях. Смена знака производящего поля при отражении в плоскости XY .

SYMM = 1300÷1399 – зеркальное отражение геометрии в ZX плоскости без смены знака производящего поля. Периодическая структура вдоль оси Z с числом повторяющихся элементов $N = \mathbf{SYMM} - 1300$. Приращение по Z задается параметром **DZ**.

SYMM = 1400÷1499 – аналогично предыдущей симметрии с $N = \mathbf{SYMM} - 1400$, но периодический элемент при каждой k -ой генерации зеркально отражается относительно плоскости $Z = \mathbf{DZ} \times (k + 0.5)$ со сменой знака производящего поля.

Для наглядности все типы симметрии магнетика приведены в табл. 2, где используются следующие обозначения: “-” смена знака производящего поля; “+” производящее поле не меняет знак; “X, Y, Z, M” зеркальные отражения соответственно в плоскостях YZ, XZ, XY, RZ; “R” поворот вокруг оси Z.

Таблица 2. Значение параметра **SYMM** для задания геометрии магнитопровода.

Значение параметра	Плоскости симметрии				
	X	Y	Z	M	R
0			+		
1					
-1					
-2		+			
3					
-3			+		

Продолжение Таблицы 2.

Значение параметра	Плоскости симметрии				
	X	Y	Z	M	R
-4		+			
-40	+	+			
2n, n = 1, 2, ...					
-100÷-199				+	
100÷199				+	
-300÷-399			+		+
300÷399					+
1300÷1399		+			
1400÷1400		+			
-3000÷-3999			+		+
3000÷3999					+

3.2. Изменение геометрии (Команды **MODI** и **MOVE**)

Иногда в процессе работы необходимо изменить некоторые геометрические параметры, ток или плотность тока. Эти функции выполняет команда **MODI**, ее параметры в точности совпадают с параметрами команды **DRAW**. Выбор материала элементов определяется параметром **MATE**, начальный и конечный номера элементов, в которые необходимо внести изменения, устанавливаются параметрами **E1**, **E2**.

Для сдвига и поворота элементов магнитопровода существует команда **MOVE**. Группу элементов с типом материала **MATE** и номерами от **E1** до **E2** можно переместить в новое положение, определяемое параметрами **X1, Y1, Z1** по отношению к первой вершине элемента **E1** и развернуть на углы Эйлера **T, P, S**.

3.3 Удаление элементов (Команда **ERAS**)

Команда **ERAS** предназначена для удаления из геометрии токовых элементов или элементов магнетика от **E1** до **E2**. Тип материала элемента устанавливается параметром **MATE**.

3.4 Генератор сетки (Команда **MESH**)

В программах имеется возможность полуавтоматической генерации разбиения области магнитопровода на треугольные призмы для повышения точности вычислений. Для этого командой **DRAW** необходимо задать грубую сетку на магнитопроводе и командой **GETM** вычислить магнитные моменты, задавая несколько итераций. По команде **MESH** генерируется **NMAX** элементов. Выборка проводится среди элементов с максимальной запасенной энергией, которые разбиваются на **NTRI** треугольника, **NTRI** может принимать значения 2, 3, 4 (рис.15), по умолчанию **NTRI** = 2.

Группа элементов магнетика для генерации сетки выбирается параметрами **E1, E2**, если эти параметры не заданы, в генерации участвуют все элементы. Параметр **PRIN** = 1 включает печать геометрии новых элементов.

4. Задание *B-H* данных (Команда **BHDA**)

Перед заданием геометрии магнитопровода необходимо ввести кривую намагничивания ферромагнетика, определяющую свойства этого материала, в виде *B-H* таблицы. Данные можно вводить непосредственно с терминала или из заранее подготовленного файла. Числа задаются в свободном формате, по одному значению *B* и *H* на одной строке. Параметры команды заданы в табл. 3.

Таблица 3. Параметры команды **BHDA**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
PRIN	Уровень печати	0
MATE	Код материала	3
FILE	Имя файла с данными	
STAC	Коэффициент упаковки магнитопровода	1.0
NEW	Задание новой таблицы	1

Параметр **NEW** = 0 служит для расширения уже существующей таблицы, в противном случае вводится новая таблица. Параметр **PRIN** = 1 выводит на печать *B-H* таблицу.

Параметр **STAC** задает коэффициент упаковки магнетика, используется для ламинированного магнитопровода и должен быть в диапазоне [0, 1].

5. Вычисление магнитных моментов (Команда **GETM**)

После задания геометрии и таблиц *B-H* необходимо вычислить магнитные моменты в элементах магнитопровода командой **GETM**. Основные параметры команды приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры команды **GETM**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
PRIN	Уровень печати	0
NIT	Полное число итераций	50
NITD	Число предыдущих итераций	0
MU	Начальное значение проницаемости	1000
ST	Коэффициент упаковки магнетика	1.0
CHIF	Параметр релаксации	1.0
HXE	Компоненты внешнего поля	0.0
HYE		0.0
HZE		0.0
TOLM	Параметры выхода из итерационного цикла	100
DTOL		0.1
DH		1.0E-06
NITP	Число итераций для постоянных магнитов	10
TOLP	Выход из итераций для постоянных магнитов	100
X	Координаты контрольной точки поля	0.0
Y		0.0
Z		0.0
SAVE	Способ хранения матрицы	0

После окончания каждой i -ой итерации вычисляются следующие величины:

а) максимальное изменение модуля магнитного момента в элементах:

$$TOLM_i = \max\{M_{i,j} - M_{i-1,j}, j = 1, \dots, NF, \text{ где } NF - \text{ число элементов ферромагнетика};$$

б) максимальная производная изменения магнитного момента в элементах:

$$DTOL_i = TOLM_i - TOLM_{i-1};$$

в) поле $H0_i$ в контрольной точке X, Y, Z ;

г) относительное изменение поля $DH_i = (H0_i - H0_{i-1})/H0_{i-1}$.

Выход из итераций возможен при выполнении следующих условий:

а) $NIT_i = NIT$;

б) $TOLM_i \leq TOLM$;

в) $DTOL_i \leq DTOL$;

г) $DH_i \leq DH$.

Файлы *MTAPE* с матрицами имеют расширения *.2d* или *.3d* соответственно для программ *MULTIC2D* и *MULTIC3D*.

Иногда необходимо вычислить зависимость магнитных характеристик для одной и той же геометрии на разных уровнях тока. Как видно из уравнения (7) при этом исходная матрица системы линейных уравнений одна и та же, меняется только ее правая часть. Для проведения цикла расчетов рационально матрицу вычислить один раз, сохранить ее на диске и затем использовать в других вычислениях. Для этого можно использовать **SAVE = 0** – матрица вычисляется, записывается в файл, который удаляется после завершения вычислений магнитных моментов;

SAVE = 1 – матрица вычисляется, записывается в файл, который сохраняется после завершения вычислений магнитных моментов;

SAVE = 2 – матрица считывается с файла, который сохраняется после завершения вычислений магнитных моментов;

SAVE = 3 – матрица считывается с файла, который удаляется после завершения вычислений магнитных моментов.

Параметр **CHIF** используется как параметр релаксации итерационного процесса и регулирует сходимость итераций при определении магнитной проницаемости $\mu(B)$ в каждом элементе ферромагнетика:

$$\mu_{new} = \mu_{old} + \mathbf{CHIF}(\mu - \mu_{old}), \quad (10)$$

где μ_{new} , μ_{old} – значения магнитной проницаемости в i -ой и $i-1$ итерациях, μ – реальное значение магнитной проницаемости, определенное в i -ой итерации из кривой $B-H$.

При **CHIF** < 1 замедляется скорость сходимости итерационного процесса, но увеличивается его устойчивость. В программах встроено автоматическое слежение за процессом сходимости. Если все параметры контроля за процессом сходимости монотонно уменьшаются после каждых четырех итераций, то параметр **CHIF** увеличивается: **CHIF** = **CHIF/FCHI**, в противном случае он уменьшается: **CHIF** = **CHIF×FCHI**. Величина **FCHI** равна 0.95. Нижний и верхний пределы параметра **CHIF** равны 0.2 и 1.1 соответственно.

Параметр **PRIN** показывает уровень выводимой информации после каждой итерации, увеличение его номера добавляет дополнительные данные для печати:

PRIN = 0 – минимальный уровень, печатаются параметры NIT_i , $TOLM_i$, $DTOL_i$, $H0_i$ и процессорное время для каждой итерации;

PRIN = 1 – центры элементов магнетика и поле \vec{H}_J в них на первой итерации;

PRIN = 2 – процессорное время для различных этапов итерации;

PRIN = 3 – компоненты поля \vec{H} в каждом элементе;

PRIN = 4 – компоненты магнитных моментов \vec{M} в каждом элементе;

PRIN = 5 – матрица.

Компоненты внешнего поля **HXE**, **HYE**, **HZE** задаются для задач, в которое помещен магнетик.

Параметры **NITP** и **TOLP** предназначены для организации внутреннего цикла в магнитных системах, использующих магнитотвердые материалы как постоянные магниты с нелинейными характеристиками кривой размагничивания. Элементы этих материалов имеют свой идентификационный код, заданный в команде **FIXI** параметром **HOLD** = **PERM**. Магнитные моменты таких материалов переопределяются с учетом их

зависимости от намагничивающего поля, используя соответствующие значения кривых размагничивания, заданные в таблице *B-H*.

Вычисление магнитных моментов требует больших компьютерных ресурсов, поэтому для больших задач целесообразно после выполнения команды **GETM** записать все параметры в файл командами **WRIT** или **WRITF**. Дальнейшую работу можно продолжить в следующих процессах, прочитав эти параметры с созданного файла командами **READ** или **READF** соответственно. После каждой итерации все параметры магнита записываются в файл **TEMPFILE**. При сбое компьютера или необходимости продолжить далее итерационный цикл с повышенными параметрами точности, следующий процесс можно начинать с команд:

READ TEMPFILE

GETM NITD = n, NIT = ...

где параметр **NITD** задает число выполненных итераций в предыдущем процессе.

6. Задание постоянных магнитных моментов (Команда **FIXI**)

В некоторых случаях необходимо задать магнитные моменты, которые не должны меняться при вычислении остальных моментов в процессе выполнения команды **GETM**. Это могут быть постоянные магниты [19], удаленные области магнитопровода, влиянием которых друг на друга можно пренебречь, или остаточная намагниченность магнитопровода. Параметры команды **FIXI**, выполняющие эти функции, представлены в табл.5.

Таблица 5. Параметры команды **FIXI**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
MATE, E1, E2	Задание области элементов магнитопровода	-, 1, 1
HOLD	Метка элементов для фиксации или ее отмены	YES
PRIN	Печать параметров измененных элементов	YES
FILE	Чтение намагниченности из файла	---
MAGN	Модуль намагниченности	---
MU	Магнитная проницаемость	1.0
X0, Y0, Z0	Разложение намагниченности на компоненты пропорционально координатам вектора	0.0, 0.0, 0.0

Выбор элементов проводится с помощью параметров **E1**, **E2**, задающих номера элементов, либо параметром **MATE**, определяющим материал магнетика. Для последнего номера элемента можно задать значение **E2 = NF**. Магнитные моменты могут быть определены в файле, где для каждого элемента задаются его номер, компоненты M_x , M_y , M_z и магнитная проницаемость μ в свободном формате. Такой порядок задания величин соответствует записи значений магнитных моментов командой **PRIN** в выходном файле с результатами. Другой способ определения магнитных моментов – задается магнитная проницаемость **MU** и модуль намагниченности **MAGN**, который раскладывается на компоненты или пропорционально вектору, проведенному с начала координат в точку (**X0**, **Y0**, **Z0**), либо по базисным векторам (**CX**, **CY**, **CZ**). Параметр **HOLD = YES** фиксирует элементы, магнитные моменты которых не будут определяться при выполнении команды **GETM**, **HOLD = NO** – отменяет фиксацию. Постоянные магниты из редкоземельных металлов обладают слабой зависимостью магнитного момента от напряженности магнитного поля в пределах рабочего диапазона полей кривой размагничивания и имеют высокую степень прямоугольности петли гистерезиса. Элементы магнетика, состоящие из таких материалов, имеют линейные магнитные характеристики и для них достаточно задать **HOLD = YES**, величины магнитных моментов и их распределение. Материалы с нелинейной зависимостью $M(H)$ типа мартенситных сталей в настоящее время используются сравнительно мало ввиду низких магнитных свойств и невысокой стабильности. При использовании таких материалов необходимо задать **HOLD= PERM** и соответствующую кривую размагничивания в форме таблицы $B-H$.

7. Вычисление поля (Команда GETB)

Команда **GETB** используется для вычисления поля в точке, вдоль линии, на двумерной или трехмерной сетке в декартовых, цилиндрических, сферических или специальных координатах. Основные параметры команды представлены в табл.6. При вычислении поля более, чем в одной точке, пакет программ создает двоичный файл **INOUT2D** для **MULTIC2D** и **INOUT3D** для **MULTIC3D** и записывает в него компоненты поля в декартовой системе координат. Расширение файла задается параметром **FILE** и должно быть целой величиной, лежащей в пределах от 0 до 1000. Если в команде **GETB** задан

параметр **FORM = YES**, команда создает соответственно форматные файлы *INOUF2D* или *INOUF3D*.

Таблица 6. Параметры команды **GETB**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
X Y Z	Начальные координаты точки в декартовой системе координат	0.0 0.0 0.0
DX DY DZ	Приращения в декартовой системе координат	0.0 0.0 0.0
NX NY NZ	Число точек в декартовой системе координат	1 1 1
XC YC ZC	Центр цилиндрической или сферической систем координат	0.0 0.0 0.0
R PHI Z	Начальные координаты точки в цилиндрической системе координат	0.0 0.0 0.0
DR DPHI DZ	Приращения в цилиндрической системе координат	0.0 0.0 0.0
NR NPHI NZ	Число точек в цилиндрической системе координат	1 1 1
R PHI THET	Начальные координаты точки в сферической системе координат	0.0 0.0 0.0
DR DPHI DTHE	Приращения в сферической системе координат	0.0 0.0 0.0
DR DPHI DTHE	Приращения в сферической системе координат	0.0 0.0 0.0
NR NPHI NTHE	Число точек в сферической системе координат	1 1 1
R PHI THET	Начальные координаты точки в специальной системе координат	0.0 0.0 0.0
DR DPHI DTHE	Приращение в специальной системе координат	0.0 0.0 0.0

Продолжение Таблицы 6.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
DR DPHI DTHE	Приращения в сферической системе координат	0.0 0.0 0.0
NR NPHI NTHE	Число точек в сферической системе координат	1 1 1
R PHI THET	Начальные координаты точки в специальной системе координат	0.0 0.0 0.0
DR DPHI DTHE	Приращение в специальной системе координат	0.0 0.0 0.0
NR NPHI NTHE	Число точек в специальной системе координат	1 1 1
E1	Начальный номер обмотки	1
E2	Конечный номер обмотки	1
FILE	Расширение файлов <i>INOUTnD</i> , <i>INOUnD</i>	0
COMP	Компонента поля	DHVN
PLAN	Выбор плоскости	XY
PRIN	Уровень печати	1
SAME	Чтение компонент поля с двоичного файла	NO
SAMF	Чтение компонент поля с форматного файла	NO
FORM	Создание форматного файла	NO
FINT	Вычисление интеграла поля	NO
STEP	Приращение точки для вычисления производных	0.01
TOL	Точность вычисления поля, Гс	100.0
INMA NMAX	Параметры численного интегрирования поля	8 10
H0	Нормировочное поле	
X0 Y0 Z0	Координаты точки для вычисления нормировочного поля	0.0 0.0 0.0
X1 Y1 Z1	Начальная точка для вычисления поля вдоль произвольной линии в декартовой системе координат	
X2 Y2 Z2	Конечная точка для вычисления поля вдоль произвольной линии в декартовой системе координат	
NX	Число точек на произвольной линии в декартовой системе координат	

Выдача информации при **PRIN** = 1 происходит в несколько колонок: номер вычисляемой точки, ее координаты в заданной системе координат, компоненты поля, модуль поля. Последняя колонка задается параметром **COMP** и имеет следующие значения:

DHVN, HX, HY, HR, HPHI, HMOD, VECT, GX, GY, GMOD

в программе *MULTIC2D*, и

DHVN, DHX0, DHY0, DHZ0, HX, HY, HZ, HR, HTHE, HPHI, HMOD, MODX, MODY, MODZ, VECT, GX, GY, GZ, GMOD, NZ

в программе *MULTIC3D*,

где **HX, HY, HZ, GX, GY, GZ** – компоненты поля и градиента в декартовой системе координат, **HR, HPHI, HZ** – компоненты поля в цилиндрической системе координат, **HR, HTHE, HPHI** – компоненты поля в сферической системе координат, **VECT** – векторный потенциал. Компоненты векторного потенциала в программе *MULTIC3D* определяются плоскостью, в которой вычисляется поле. В плоскости XY – Z-овая компонента векторного потенциала и т.д.

Остальные значения параметра **COMP** имеют следующие определения:

$$\begin{aligned} \mathbf{HMOD} &= \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}; \mathbf{MODX} = \sqrt{H_y^2 + H_z^2}; \mathbf{MODY} = \sqrt{H_x^2 + H_z^2}; & (11) \\ \mathbf{MODZ} &= \sqrt{H_x^2 + H_y^2}; \mathbf{DHVN} = \frac{H(x,y,z) - H_0}{H_0}; \mathbf{DHX0} = \frac{H_x(x,y,z) - H_x(x_0,y_0,z_0)}{H_0}; \\ \mathbf{DHY0} &= \frac{H_y(x,y,z) - H_y(x_0,y_0,z_0)}{H_0}; \mathbf{DHZ0} = \frac{H_z(x,y,z) - H_z(x_0,y_0,z_0)}{H_0}; \\ \mathbf{NZ} &= \frac{H_z(r,\varphi,z) - H_z(r,\varphi,z+\mathbf{STEP})}{H_z(r,\varphi,z) + H_z(r,\varphi,z+\mathbf{STEP})} \left(1 + 2 \frac{r}{\mathbf{STEP}} \right). \end{aligned}$$

Параметр **NZ** называется показатель спада магнитного поля и используется в ускорителях со слабой фокусировкой.

Нормировочное поле для параметров **DHVN, DHX0, DHY0, DHZ0** либо задается параметром **H0**, либо задается точка поля параметрами **X0, Y0, Z0**, в которой оно вычисляется. Компоненты градиента вычисляются численно:

$$\mathbf{GX} = \frac{H_x(x,y,z+\mathbf{STEP}) - H_x(x,y,z)}{\mathbf{STEP}}; \mathbf{GY} = \frac{H_y(x,y,z+\mathbf{STEP}) - H_y(x,y,z)}{\mathbf{STEP}}; \quad (12)$$

$$\mathbf{GZ} = \frac{H_z(x,y,z+\mathbf{STEP}) - H_z(x,y,z)}{\mathbf{STEP}}; \quad \mathbf{GMOD} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}$$

Вычисление поля вдоль линии сопровождается вычислением интеграла заданной параметром **COMP** компоненты поля. Параметр **PRIN** = 0 подавляет запись вычисленных компонент поля в выходной файл с результатами. Параметр **FINT** в программе *MULTIC3D* имеет значения **NO**, **YES**, соответствующие вычислению поля \vec{B} или интеграла поля \vec{B}_{int} . По определению,

$$\vec{B}_{int}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{B}(x, y, z) dz. \quad (13)$$

Если в команде **GETB** задан параметр **FINT** = **YES**, то следующая команда **GETB** будет вычислять интегральные компоненты поля. Компоненты интеграла поля, задаваемые параметром **COMP**, соответствуют значениям компонент поля в программе *MULTIC2D*. Переключение на вычисление компонент поля производится командой **GETB FINT** = **NO**.

Определение плоскости, в которой вычисляется поле, задается параметром **PLAN**, принимающим значения **XY**, **YZ**, **ZX**. Он используется в цилиндрической системе координат, повернутой относительно глобальной системы. Значение **PLAN** = **END** определяет вычисление поля в лобовых частях обмоток с **END** = 3, 8 ÷ 18 (специальная система координат). В ней параметрами **RO**, **RHI** задается токовая нить в поперечном сечении магнита, а **THET**, **DHTE**, **NTHE** определяют на ней количество точек. Полная угловая протяженность симметричной части токовой нити 90°. Номера обмоток задаются параметрами **E1**, **E2**. Вычисление токовой составляющей поля проводится численным интегрированием по закону Био – Савара, при этом разбиение объема обмотки проводится автоматически до достижения заданной точности **TOL**. По умолчанию **TOL** = 100.

При вычислении поля на лобовых частях координата точки поля, задаваемая командой **GETB**, может не совпадать с соответствующей координатой токовой нити в численном интегрировании. Для полного соответствия можно зафиксировать для этой лобовой части параметры численного интегрирования **INMA**, **NMAX**, определяющие соответственно разбиения поперечного сечения обмотки и токовой нити. Увеличение этих параметров на единицу приводит к удвоению числа разбиений. Эти параметры используются также и для повышения точности численного вычисления интеграла (4).

8. Интегральные величины (Команда INTE)

Кроме команды **GETB** для вычисления интегралов различных величин поля вдоль линии существует команда **INTE**, позволяющая также вычислять интегралы по площади или объему. В частности, она используется для определения пондеромоторных сил и запасенной энергии в различных областях магнита. Основные параметры команды приведены в табл. 7.

Таблица 7. Параметры команды **INTE**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
U1	Область интегрирования	0.0
U2		0.0
V1		0.0
V2		0.0
W1		0.0
W2		0.0
NU		Разбиение области интегрирования
NV	1	
NW	1	
COMP	Подынтегральная величина поля	HMOD
ERRO	Точность вычисления интеграла	0.01
IDIM	Максимальное число повторных разбиений	3
BOX	Переключение на цилиндрическую область интегрирования	0
AXIS	Задание продольной оси	Z
TYPE	Метод интегрирования	3

В декартовой системе координат параметры **U**, **V**, **W** по умолчанию соответствуют осям **X**, **Y**, **Z** глобальной системы. Параметр **BOX** = 1 устанавливает цилиндрическую систему, направление продольной оси в ней задается параметром **AXIS** = **X**, **Y**, **Z**.

Параметр **COMP** может иметь следующие значения:

HX, **HY**, **HZ**, **HR**, **HTHE**, **HMOD**, **MODX**, **MODY**, **MODZ**, **HR**, **HTHE**, **HT2**, **HZX**, **HZY**.

Параметры в первой строке аналогичны (11), остальные имеют следующие значения:

$$\mathbf{HT2} = H_x^2 + H_y^2 + H_z^2, \mathbf{H ZX} = H_y \cos \varphi, \mathbf{H ZY} = H_y \sin \varphi, \varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right). \quad (14)$$

Если параметр **COMP** = **HT**, то результат интегрирования интерпретируется как запасенная энергия и его величина переводится в Джоули или Джоули/см. Из цилиндрической системы координат величина интеграла переводится в декартовую.

В программах можно использовать четыре метода интегрирования. Первые три задаются параметром **TYPE** = 1, 2, 3, который выбирает метод Чебышева, Симпсона или Гаусса. В каждом из них выход из численного цикла происходит либо по достижению заданной относительной точности **ERRO**, либо по достижению максимального разбиения соответствующей квадратурной формулы.

В четвертом случае **TYPE** = 4 используется метод прямоугольников, для которых кроме области интегрирования необходимо задать число разбиений параметрами **NU**, **NV**, **NW**.

9. Гармонический анализ поля и интеграла поля (Команда **HARM**)

Команда **HARM** предназначена для проведения гармонического анализа поля или интеграла поля. Основные ее параметры представлены в табл.8.

Таблица 8. Параметры команды **HARM**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
N	Число гармоник в разложении	22
RN	Радиус нормализации	3.5
COMP	Выбор компоненты	BT
SER TYPE	Вид представления компоненты поля	COS DIPO
PRIN	Уровень печати данных	1
H0	Нормировочный множитель	
PLAN	Выбор плоскости	XY
AXIS	Выбор продольной оси	1
XC YC ZC	Задание центра системы координат	0.0 0.0 0.0
X DX NX Y DY NY Z DZ NZ	Задание координатной сетки для разложения поля или интеграла поля в декартовой системе координат	0.0 0.0 1 0.0 0.0 1 0.0 0.0 1

Продолжение Таблицы 8.

R	Задание координатной сетки для разложения поля или интеграла поля в цилиндрической системе координат	3.5
DR		0.0
NR		1
PHI		0
DPHI		2.0
NPHI		46
Z		0.0
DZ		0.0
NZ		1
R		Задание координатной сетки для разложения поля или интеграла поля в сферической системе координат
DR	0.0	
NR	1	
PHI	0	
DPHI	2.0	
NPHI	46	
THET	0.0	
DTHE	0.0	
NTHE	1	
Z	Задание набора сечений для анализа поля или интеграла поля	0.0
DZ		0.0
NZ		1

Стандартное разложение магнитного поля в апертуре мультиполюсных магнитов представляется в виде:

$$\begin{aligned}
 B_{\theta}(r, \theta, z) &= B_0(0,0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} [b_n(z) \cos(n\theta) + a_n(z) \sin(n\theta)], \\
 B_r(r, \theta, z) &= B_0(0,0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} [-b_n(z) \sin(n\theta) + a_n(z) \cos(n\theta)].
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Здесь,

- B_r и B_{θ} радиальная и азимутальная компоненты поля;
- B_0 - фактор нормализации **H0**;
- r_0 – радиус нормализации **RN**, который, как правило, равен радиусу полезной апертуры магнита (области хорошего поля);
- Величины b_n и a_n представляют прямые и косые нелинейности магнитного поля ($n-1$)-го порядка;
- z – продольная ось магнита.

Нормировочный множитель $\mathbf{H0}$ можно либо задавать непосредственно параметром $\mathbf{H0}$, либо задавать точку $\mathbf{X0}$, $\mathbf{Y0}$, $\mathbf{Z0}$, в которой вычисляется поле и используется его модуль как нормировочный множитель. Если нормировочный множитель не задан этими параметрами, то нормировка нелинейностей поля производится на первую ненулевую ненормализованную гармонику.

Проинтегрировав выражения (15) вдоль продольной оси магнита, получим разложение интегрального поля:

$$\begin{aligned}\hat{B}_\theta(r, \theta) &= \hat{B}_0(0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} \left[\hat{b}_n \cos(n\theta) + \hat{a}_n \sin(n\theta) \right], \\ \hat{B}_r(r, \theta) &= \hat{B}_0(0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} \left[-\hat{b}_n \sin(n\theta) + \hat{a}_n \cos(n\theta) \right]\end{aligned}\tag{16}$$

Здесь:

$$\begin{aligned}\hat{B}_\theta(r, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} B_\theta(r, \theta, z) dz; \quad \hat{B}_r(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} B_r(r, \theta, z) dz; \\ \hat{B}_0(0,0) &= \int_{-\infty}^{\infty} B_0(0,0, z) dz; \\ \hat{b}_n &= \frac{B_0}{\hat{B}_0} \int_{-\infty}^{\infty} b_n(z) dz; \quad \hat{a}_n = \frac{B_0}{\hat{B}_0} \int_{-\infty}^{\infty} a_n(z) dz;\end{aligned}\tag{17}$$

Нормировочный множитель $\hat{B}_0(0,0)$ удобен для дипольных полей.

Для идеальных N-полюсных магнитов в результате симметрии в формулах (15-17) отличны от нуля только нелинейности с номерами $N/2 \times (2n-1)$, ($n=1, \dots, \infty$). Соответствующие ненулевые номера нелинейностей поля определяются автоматически. Для дипольного или квадрупольного магнитов номера законных гармоник можно задавать принудительно параметром **TYPE = DIPO** или **TYPE = QUAD**. Параметр **SER** устанавливает геометрические функции, используемые в разложениях (15 – 17) и может принимать значения **COS**, **SIN**, **ALL**.

Разложение поля проводится в цилиндрической системе координат в плоскости, параллельной плоскости XY и определяемой параметром **Z**. Для задания плоскостей, параллельных плоскостям YZ и ZX используется параметр **AXIS**, равный соответственно 1 или 2. Положение плоскости в этих случаях задается параметрами **X** либо **Y**.

Выбор для гармонического анализа величин поля или интеграла поля осуществляется в команде **GETB** параметром **FINT = YES**. Команда **GETB** должна задаваться перед выполнением команды **HARM**. Непосредственное представление интеграла поля в гармонический ряд возможно для типов обмоток, определяемых параметром **END = 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11**. Для остальных типов обмоток выражения (16) – (17) вычисляются численно. Параметрами **Z, DZ, NZ** задаются плоскости, в которых проводится разложение поля в гармонический ряд, далее проводится численное интегрирование по этим сечениям и вычисляются нелинейности интегрального поля. Продольную ось, вдоль которой проводится численное интегрирование, можно также выбрать либо параметрами **X, DX, NX**, либо **Y, DY, NY**. Выдача результатов гармонического анализа в каждом сечении подавляется параметром **PRIN = 0**.

Параметр **COMP** задает компоненты для анализа и равен **BR** для радиальной компоненты поля, **BT** для азимутальной и **ALL** для обеих компонент. Максимальное число нелинейностей **N** не должно превышать величину $M/2$, где M – полное число точек расчетной сетки.

9.2 Азимутально-симметричные поля

В общем случае в области, свободной от токов, поле удовлетворяет уравнению Лапласа и может быть представлено как разложение в ряд по сферическим гармоникам:

$$B_z(r, \theta, \varphi) = B_0 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^n P_n^m \cos \theta [a_{nm} \sin(m\varphi) + b_{nm} \cos(m\varphi)], \quad (18)$$

где a_{nm} и b_{nm} – амплитуды нелинейностей, а $P_n^m \cos \theta$ – присоединенные функции Лежандра ($n \geq m \geq 0$), которые при $m = 0$ превращаются в обычные полиномы Лежандра $P_n \cos \theta$. Азимутально – симметричные нелинейности с $m = 0$ имеют вид $(r/r_0)^n \times P_n \cos \theta$, не зависят от азимута φ и называются зональными. Гармоники с $m \neq 0$ вида $(r/r_0)^n \times P_n^m \cos \theta \cos(m\varphi)$ и $(r/r_0)^n \times P_n^m \cos \theta \sin(m\varphi)$ называются тессеральными. Каждая из сферических гармоник представляет однородный полином степени n в декартовой системе координат.

При $\varphi = 0$ ряд (18) превращается в

$$B_z(r, \theta) = B_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^n a_n P_n \cos \theta, \quad (19)$$

где $P_n \cos \theta$ – полиномы Лежандра.

При $\theta = 0$ поле рассматривается на оси магнита и представляется в виде

$$B_z(r, \theta) = B_0 \sum_{n=0}^{\infty} a_n \left(\frac{z}{r_0} \right). \quad (20)$$

В симметричных магнитных системах, в которых геометрия обмоток имеет симметрию относительно плоскости XU с токами, направленными в одну и ту же сторону, в разложениях (18 – 20) остаются только четные члены по n . Если токи в симметричных обмотках имеют противоположные знаки, то ненулевыми нелинейностями являются нечетные члены по n .

Разложение поля (18) можно вычислять как в сферической, так и в цилиндрической системах координат. Для повышения точности в последнем случае дополнительно вычисляется поле на оси заданной цилиндрической сетки и его значение используется в разложении ряда.

Компоненты поля **BX**, **BY** также можно представить в виде (18 – 20). Более того, любую компоненту поля, заданную параметром **COMP** в декартовых координатах, можно разложить вдоль любой координатной оси, определяемой параметром **AXIS**.

10. Вычисление производных нелинейностей поля (команда **DERH**)

Для определения допусков на точность изготовления магнитов с седловидной обмоткой, к которым в динамике пучка предъявляются требования к величинам нелинейностей поля и интеграла поля разработана команда **DERH**, которая вычисляет производные гармоник поля и интеграла поля по линейной координате. Параметры команды **DERH** представлены в табл. 9.

Таблица 9. Параметры команды **DERH**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
STEP	Шаг для численного вычисления производных	0.01
E1	Начальный номер токового элемента	1
E2	Конечный номер токового элемента NC	NC
MAXH	Максимальное число вычисляемых нелинейностей	<i>MAXHARM</i>
PRIN	Уровень печати	0
H0	Нормировочный множитель	1.0

Информация выводится для каждого токового элемента в виде таблицы с номерами n гармоник и производными типа $\frac{\partial b_n}{\partial STEP}$. **NC** – максимальное число токовых элементов, Если параметр **MAXH** не задан, то он равен *MAXHARM*, равный максимальному числу вычисляемых нелинейностей.

11. Эффективная длина магнита (команда LEFF)

По определению, эффективная длина мультипольных магнитов равна отношению первых ненулевых ненормализованных членов в выражениях (16) и (17) при равных радиусах нормализации. В частности, для диполей

$$L_{eff} = \frac{1}{B_0(x_0, y_0, z_0)} \int_{-\infty}^{\infty} B(x_0, y_0, z) dz. \quad (21)$$

Эффективная длина вычисляется только для седловидных обмоток, определяемых параметром **END** = 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11. Параметры команды – координаты точки **X0**, **Y0**, **Z0** для вычисления поля нормализации и абсолютная точность вычисления поля и интеграла поля **TOL**. По умолчанию **X0** = 0, **Y0** = 0, **Z0** = 0, **TOL** = 100 Гаусс.

12. Вычисление магнитных сил (Команды FORI, FORC и GETF)

12.1 Сила, действующая на ферромагнетик (команда FORI)

Компоненты сил, действующих на магнетик, определяются по формуле

$$F_q = \frac{\partial W}{\partial q}, \quad (22)$$

где W – запасенная энергия в магнетике, q' – обобщенная координата в декартовой системе.

Команда **FORI** не имеет параметров и вычисляет суммарные силы, действующие на различные материалы **MATE**. Следует отметить, что операция численного дифференцирования сопровождается значительной потерей точности, поэтому результаты могут сильно зависеть от точности разбиения магнетика на элементы.

12.2 Пондеромоторные силы (Команды GETF, FORC)

На обмотку действуют пондеромоторные силы

$$\vec{F} = \frac{1}{c} \int_V [\vec{j} \times \vec{H}] dv. \quad (23)$$

Вычисление пондеромоторных сил на единицу длины в прямолинейных частях обмоток производится с помощью команды **GETF**, ее параметры представлены в табл.10.

Таблица 10. Параметры команды **GETF**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
Z	Положение поперечного сечения	0.0
LX	Задание разбиения для обмоток с	1
LY	прямоугольным поперечным сечением	1
LR	Задание разбиения для обмоток с	1
LTHE	секторным поперечным сечением	1
E1	Выбор обмоток для вычисления	1
E2	сил на лобовых частях	1
UNIT	Установка системы единиц	KG
PRIN	Уровень печати	1
PHI1	Разбиение для соленоидов	0.0
PHI2		0.0
NPHI		1
RETU	Включение обмотки с обратным током	NO

Разбиение прямолинейной части в плоскости XY – **LX**, **LY** для обмоток с прямоугольным поперечным сечением и **LR**, **LTHEТА** для обмоток с поперечным сечением в виде кольцевого сектора. Положение места вычисления сил в продольном направлении определяется параметром **Z**. Если необходимо вычислить силы на прямолинейных частях с отрицательным током, надо задать параметр **RETU = YES**. Силы выдаются в кГ/см, но можно выдавать в Н/см, задав параметр **UNIT = N**. Для соленоидов имеется возможность определить полную силу, действующую на азимутальный сектор, определяемый углами **PHI1** и **PHI2** с разбиением **NPHI**. В этом случае выводимая величина будет в кГ или в Н.

Команда **FORC** вычисляет силы, действующие на лобовые части седловидных обмоток и обмоток типа *RACETRACK*, ее параметры представлены в табл. 11.

Таблица 11. Параметры команды **FORC**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
E1	Выбор обмоток для вычисления сил на лобовых частях	1
E2		1
X	Задание разбиения в декартовой системе координат	0.0
Y		0.0
Z		0.0
DX		0.0
DY		0.0
DZ		0.0
NX		1
NY		1
NZ		1

Продолжение Таблицы 11.

R	Задание разбиения в специальной системе координат	0.0
RHI		0.0
THET		0.0
DR		0.0
DPHI		0.0
DTHE		0.0
NR		1
NPHI		1
NTHE		1
P1	Выбор элементов обмотки	1
P2		1
TOL	Точность вычисления поля, Гс	100.0
NMAX	Параметры точности численного интегрирования поля	8
INMA		10
UNIT	Установка системы единиц	KG
PRIN	Уровень печати	1
FILE	Расширение файла <i>FORCE</i> или <i>FORCF</i>	0
SAME	Чтение сил с двоичного файла <i>FORCE</i>	NO
SAMF	Чтение сил с форматного файла <i>FORCF</i>	NO
FORM	Создание форматного файла <i>FORCE</i>	NO
PLAN	Выбор плоскости	XY

Кроме пондеромоторных сил вычисляется также и запасенная энергия в обмотке. Если прямолинейная часть обмотки превышает минимальную прямолинейную длину обмоточного блока, то участок с их разностью включается в лобовую часть этой обмотки. Для него задается дополнительно разбиение по продольной оси параметрами **Z**, **DZ**, **NZ**. В обмотках типа *RACETRACK* пондеромоторные силы вычисляются на различных участках, задаваемых параметрами **P1**, **P2**. При этом для обмоток типа равнобедренной трапеции прямолинейные брусья, составляющие с осью *Z* угол $\pm\mathbf{ALPHA}$ имеют идентификационные номера 1 и 5 для прямого и обратного тока, дуги с меньшим радиусом закругления **R** соответственно 2 и 4, дуги с большим радиусом закругления **R** – 8 и 6, а меньшая и большая основания трапеций – 3 и 7.

Уровень печати возрастает с ростом значения параметра **PRIN**:

PRIN = 1 – суммарные силы в обмотке и их проекции на каждую координатную плоскость;

PRIN = 2 – компоненты сил в каждой ячейке и координаты ее центра;

PRIN = 3 – компоненты поля и координаты точки, в которой оно вычисляется;

PRIN = 4 – координаты узлов сетки.

Результаты расчетов записываются в двоичный файл *force* и в текстовый файл *forcf*. Параметры **FILE**, **SAME**, **SAMF**, **FORM** аналогичны соответствующим параметрам в команде **GETM**.

13. Печать параметров магнита (Команда PRIN)

Кроме параметра **PRIN**, имеющегося в нескольких командах, существует команда с таким же именем. Элементы магнита, выводимые на печать, выбираются параметрами **E1**, **E2**, **MATE**. Для печати магнитных моментов или поля в магнитопроводе имеются параметры **M = YES** или **BH = YES**. Таблицы *B-H* выводятся на печать параметром **TABL = YES**. Если команда задана без параметров, то выдается полная печать всех данных магнита.

14. Графический вывод пучка электронов (Команда BEAM)

Команда **BEAM** [8] предназначена для расчетов траектории пучка электронов в произвольном пространственном магнитном поле и дальнейшей ее визуализации в виртуальной реальности. Она работает только в программе *MULTIC3D*. Ее параметры представлены в таблице 12.

Таблица 12. Параметры команды **BEAM**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
PRIN	Уровень печати	0
GEOM	Вывод геометрии магнита	0
PLAN	Установка начальной плоскости	XY
X0	Диагональ параллелепипеда, задающего область вычислений	0.0
Y0		0.0
Z0		0.0
X1		1.0
Y1		1.0
Z1		1.0
X		Начальное положение вычисляемой траектории в декартовой системе координат
Y	0.0	
Z	0/0	
DX, DY	Приращения точек в декартовых координатах	
NX, NY	Число линий в декартовых координатах	1, 1
XC	Начальное положение вычисляемой траектории в цилиндрической системе координат	0.0
YC		0.0
R		0.0
PHI		0.0

Вычисление координаты следующей i -ой точки траектории пучка производится по следующей формуле:

$$q_i = q_{i-1} + \frac{Hq}{|\vec{H}|} \mathbf{STEP}, \quad (24)$$

где q – обобщенная координата x, y, z . При $\mathbf{GEOM} = 1$ вместе с графическим выводом траекторий пучка также выводится геометрия магнита. Графическая информация в формате *VRML* содержится в файле *beamn.wrl*. При первом обращении к команде **GEOM** n в имени файла равен 1, каждое последующее обращение увеличивает его на 1.

15. Запись геометрии магнита в файл (Команда **GEOM**)

По этой команде создается файл *wrl2dn.wrl* в программе *MULTIC2D* и *wrl3dn.wrl* в программе *MULTIC3D*, в который записывается геометрия магнита в формате *VRML*. Число n показывает порядковый номер обращения к команде. Команда не имеет параметров.

16. Вычисление потерь в магнитопроводе (Команда **LOSF**)

Переменное магнитное поле приводит к тепловым потерям в магнитопроводе, которые складываются из гистерезисной и вихревых компонент. Потери на гистерезис в единице объема магнитопровода за цикл могут быть рассчитаны по следующей формуле [20]:

$$W_h = aB_{\max}^b (B_{\max} - B_{\min}) \quad (25)$$

где B_{\max} и B_{\min} – максимальное и минимальное поля в элементах магнитопровода. Коэффициенты a и b определяются свойствами материала, a в первом приближении пропорциональна коэрцитивной силе H_c .

Потери на вихревые токи за цикл в единице объема железного ламинированного листа толщиной d и удельным сопротивлением ρ вычисляются по формуле [20]:

$$W_c = \frac{1}{6\rho} d^2 B_{\max} \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (26)$$

где $\frac{\partial B}{\partial t}$ – скорость нарастания поля.

Параметры команды **LOSF** представлены в таблице 13.

Таблица 13. Параметры команды **LOSF**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
D	Толщина ламинированной пластины	0.1
ROE	Удельное сопротивление	0.01
DBDT	Скорость нарастания поля	1
HC	Коэрцитивная сила	0.6
TIME	Время нарастания поля	0.0
X0	Координаты точки для вычисления максимального поля	0.0
Y0		0.0
Z0		0.0
A	Коэффициент a в формуле (26)	
AN	Коэффициент b в формуле (26)	
BMIN	Минимальное значение поля	0.0
BMAX	Максимальное значение поля	0.0
ROF	Удельная масса стали	7.8
RAT	Коэффициент для задания BMIN	1

Если параметр **BMAX** не задан, то он определяется вычислением поля в точке с координатами (**X0**, **Y0**, **Z0**). По умолчанию **BMIN** равен нулю, но его можно также установить параметром **RAT**: $BMIN = BMAX/RAT$. Кроме потерь в магнитопроводе команда **LOSF** вычисляет его массу с помощью коэффициента **ROF**.

17. Вычисление потерь в НТСП обмотке (Команда **LOSC**)

Команда **LOSC** предназначена для вычисления потерь в низкотемпературных сверхпроводящих обмотках. Тепловые потери в сверхпроводящих проводах состоят из трех составляющих [21]:

1. Гистерезисные потери в единице объема провода, W_h , за треугольный цикл $0-B_{max}-0$ равны интегралу потерь мощности за цикл. Они имеют простую логарифмическую зависимость от магнитного поля B (в Дж/м³):

$$W_h = \frac{4}{3\pi} \lambda_s d_f J_0 B_0 \ln \left(1 + \frac{B_{max}}{B_0} \right), \quad (27)$$

где λ_s - коэффициент заполнения сверхпроводящей нити, d_f - ее диаметр, J_0 и B_0 - параметры, описывающие реальную зависимость критической плотности транспортного тока $J_c(B)$, которая обычно аппроксимируется выражением:

$$J_c = \frac{J_0 B_0}{B + B_0}, \quad (28)$$

где J_0 – критическая плотность тока при $B = 0$, B_0 соответствует полю, когда J_C уменьшается в 2 раза.

2. Матричные потери W_m (J/m³) за треугольный цикл $0-B_{max}-0$ при скорости изменения магнитного поля dB/dt и постоянном эффективном матричном сопротивлении ρ_e равны

$$W_m = \frac{1}{2\pi^2} \frac{l_p^2}{\rho_e} \frac{dB}{dt} B_{\max}, \quad (29)$$

где l_p – шаг скрутки сверхпроводящей нити.

3. Кабельные потери, W_C в треугольном цикле $0-B_{max}-0$, вызваны вихревыми токами в кабеле и зависят от шага транспонирования провода p ; отношения α ширины/толщине (a/b) кабеля и эффективными поперечным ρ_{\perp} и продольным ρ_{\parallel} сопротивлениями между проводами в кабеле (Дж/м³):

$$W_C = \frac{p^2 \lambda_C}{16} \left(\frac{16}{15} \frac{\alpha^2 \dot{B}_{\perp} B_{\perp \max}}{\rho_{\perp}} + \frac{2}{3} \frac{\dot{B}_{\perp} B_{\perp \max}}{\rho_{\parallel}} + \frac{1}{2} \frac{\dot{B}_{\parallel} B_{\parallel \max}}{\alpha^2 \rho_{\parallel}} \right), \quad (30)$$

где B_{\perp} и B_{\parallel} - поперечная и параллельная широкой стороне кабеля компоненты магнитного поля.

Тепловые потери и их мощность вычисляются в программе *MULTIC2D* и результаты выдаются в Дж/м и Ватт/м соответственно, а в программе *MULTIC3D* потери и мощность вычисляются только для соленоидальных геометрий и их значения выдаются в Дж и Дж/м. Параметры команды **LOSC** представлены в Таблице 14.

Таблица 14. Параметры команды **LOSC**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
DFIL	Диаметр сверхпроводящей нити, d_f , мкм	3.5
LAMB	Коэффициент заполнения сверхпроводящей нити, λ_s	
STEL	Шаг скрутки сверхпроводящей нити l_p , см	0.4
STEP	Шага транспонирования провода p , см	0.0
DBDT	Скорость изменения магнитного поля dB/dt , Тл/с	1
FILL	Коэффициент заполнения сверхпроводника	0.88
RA	Поперечное сопротивление R_L , мкОм	0.0
RC	Продольное сопротивление R_l , мкОм	0.0
RPER	Эффективное поперечное сопротивление ρ_{\perp} , мкОм/м	2.6

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
RPAR	Эффективное продольное сопротивление ρ_l , мкМ/м _l	0.0
RC	Продольное сопротивление R_l , мкОм _l	0.0
RPER	Эффективное поперечное сопротивление ρ_\perp , мкМ/м	2.6
RPAR	Эффективное продольное сопротивление ρ_l , мкМ/м _l	0.0
CURD	Критическая плотность тока J_0 , А/см ²	1.5×10^{10}
PACC	Коэффициент упаковки кабеля	0.88
DIAM	Диаметр проволоки, мм	0.5
HIS	Толщине изоляции кабеля, мм	0.0
TURN	Число витков в магните	1
E1	Начальный номер вычисляемой обмотки	1
E2	Конечный номер вычисляемой обмотки	1
ROM	Эффективное матричное сопротивление ρ_e	5×10^{-5}
NR	Число разбиений по радиусу и по продольной оси обмотки соленоида в программе <i>MULTIC3D</i>	1
NZ		1
PRIN	Уровень печати	1
BMIN	Минимальное значение поля, Тл	0
BMAX	Максимальное значение поля, Тл	1
ANGP	Угол скрутки кабеля, град	15
NX	Число разбиений в декартовой системе координат в программе <i>MULTIC2D</i>	1
NY		1
NR	Число разбиений в полярной системе координат в программе <i>MULTIC2D</i>	1
NPHI		1

Можно задавать только один из двух параметров **STEP** или **ANGP**. Их связь устанавливается соотношением $\text{STEP} = 2A/\text{tg}(\text{ANGP})$.

Массив данных вычисляемых потерь по задаваемой сетке выводится в файл *closh2n* в программе *MULTIC2D* и *closh3n* в программе *MULTIC3D*. Здесь *n* – порядковый номер обращений к команде, начиная с 1.

18. Ввод таблицы критического тока $J(B)$ для ВТСП (Команда CURH)

Перед вычислением потерь в ВТСП обмотке необходимо задать таблицу зависимостей критических токов от поля B при направлении магнитного поля параллельно широкой стороне ленты (0°) J_{C0} и перпендикулярно широкой стороне ленты (90°) J_{C90} . Имя файла должно быть вида *CRITnn* или *CRITnnn*, где *nn* или *nnn* определяет температуру критических токов, например, *CRIT65* – 65 К, *CRIT775* – 77.5 К. В таблице в свободном формате в каждой строке размещены значения B , J_{C0} и J_{C90} .

Параметры команды заданы в табл. 15.

Таблица 15. Параметры команды **CURH**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
PRIN	Уровень печати	0
MATE	Код материала	1
FILE	Имя файла с данными	
NEW	Задание новой таблицы	1
E1	Номер токового элемента	1

Параметром **MATE**. можно задавать до 5 таблиц для разных областей ВТСП магнита, находящимся под разными температурами. Номер токового элемента для заданной температуры указывается параметром **E1**. Параметр **NEW** = 0 служит для расширения уже существующей таблицы, в противном случае вводится новая таблица. Параметр **PRIN** = 1 выводит на печать B , J_{C0} и J_{C90} таблицу.

19. Вычисление потерь в ВТСП обмотке (Команда **LOSH**)

Мощность гистерезисных потерь в сверхпроводнике в изменяющемся магнитном поле [22] определяется по следующим формулам [23] (в системе СИ) в случае магнитного поля, параллельного широкой стороне ленты:

$$P_{sc} = \frac{2\mu_0}{3\pi} \omega d_{sc} a \times \begin{cases} H_m^3/H^*, & H_m \leq H^* \\ (3H_m H^* - 2(H^*)^2), & H_m > H^* \end{cases} \quad (31)$$

магнитного поля, перпендикулярного широкой стороне ленты (модель Брандта):

$$P_{sc} = \mu_0 \omega a^2 \begin{cases} H_m^4/(3H_d^2), & H_m \ll H_d \\ 2H_d H_m, & H_m \gg H_d. \end{cases} \quad (32)$$

где:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;

a – полуширина ленты;

d_{sc} – толщина сверхпроводящего слоя, в расчетах эта величина принята равной 2.5 мкм;

$I_c(T, B)$ – критический ток ВТСП2 ленты;

$J_c = I_c(T, B) / (2a \cdot d_{sc})$ – плотность тока;

$H^* = J_c \cdot d_{sc} / 2$

$H_d = J_c \cdot d_{sc} / \pi$

$H_m = B_m / \mu_0$ и $\omega = 2\pi \nu$ – амплитуда и частота изменения внешнего магнитного поля.

Формулы (31) и (32) дают зависимости мощности потерь, для полного периода синусоиды.

Параметры команды **LOSH** представлены в Таблице 16.

Таблица 16. Параметры команды **LOSH**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
A	Ширина ВТСП ленты, см	0.0
H	Высота ВТСП ленты, см	0.0
DSC	Толщина сверхпроводящего слоя, мкм	2.5
TIME	Время ввода тока, с	1
NR NZ	Число разбиений поперечного сечения в цилиндрической системе координат	1
NX NY	Число разбиений поперечного сечения в декартовой системе координат	1
PRIN	Уровень печати	1
E1	Начальный номер токового элемента	1
E2	Конечный номер токового элемента	

Тепловые потери и их мощность вычисляются в программе *MULTIC2D* и результаты выдаются в Дж/м и Ватт/м соответственно, а в программе *MULTIC3D* потери и мощность вычисляются только для соленоидальных геометрий и их значения выдаются в Дж и Вт.

Массив данных вычисляемого магнитного поля по задаваемой сетке выводится в по потерям – в файлы *hloss2n* и *hloss3n* соответственно. Здесь *n* – порядковый номер обращений к команде, начиная с 1.

20. Вычисление нагрева ВТСП обмотки (Команда HEAT)

Нагрев ВТСП обмотки вычисляется в программе *MULTIC3D* только для соленоидальных геометрий.

В случае адиабатного нагрева (без теплообмена с окружающей средой) гистерезисные потери нагревают участок ВТСП ленты на единицу длины (в К) [24]

$$\Delta T_{ad} = \frac{Q}{cm}, \quad (33)$$

где Q – гистерезисные потери (Дж/м) при вводе или выводе тока,

c – теплоемкость ВТСП ленты, $c = 2.5(T-10)$ в интервале температур 30 – 80 К;

m – удельная масса ВТСП ленты;

T – температура участка ВТСП ленты.

В случае теплообмена с окружающей средой нагрев участка ВТСП ленты на единицу длины (в К) [25]

$$\Delta T_{he} = \frac{Q}{ktF} \quad (34)$$

где t – время ввода или вывода тока;

F – площадь охлаждения ВТСП ленты;

k – коэффициент теплопередачи (Вт/м²К).

Суммарный нагрев ВТСП ленты на единицу длины

$$\Delta T = \Delta T_{ad} - \Delta T_{he} \quad (35)$$

Массив данных по задаваемой сетке выводится в файл *heat3n* в программе *MULTI3D*, где n – порядковый номер обращений к команде, начиная с 1. Параметры команды **HEAT** представлены в Таблице 17.

Таблица 17. Параметры команды **HEAT**.

Параметр	Функция	Значение по умолчанию
A	Ширина ВТСП ленты, см	0.0
H	Высота ВТСП ленты, см	0.0
DSC	Толщина сверхпроводящего слоя, мкм	2.5
TIME	Время ввода тока, с	1
NR NZ	Число разбиений поперечного сечения в цилиндрической системе координат	1
NX NY	Число разбиений поперечного сечения в декартовой системе координат	1
PRIN	Уровень печати	1
E1	Начальный номер токового элемента	1
E2	Конечный номер токового элемента	NC
k	Коэффициент теплопередачи k (Вт/м ² К)	1000
m	Удельная масса ВТСП ленты, кг/м	0.01
c	Теплоемкость ВТСП ленты	

Перед заданием этой команды необходимо ввести таблицу зависимостей критических токов от поля B при направлении магнитного поля параллельно широкой стороне ленты (0°) J_{C0} и перпендикулярно широкой стороне ленты (90°) J_{C90} командой **CURH**. В имени этой команды должна быть задана температура критических токов, используемая для определения теплоемкости ВТСП ленты, но теплоемкость можно задавать независимо в случае необходимости. Как видно из Таблицы 17 параметры этой команды во многом совпадают с параметрами команды **LOSH** и используются для вычисления массива данных гистерезисных потерь Q в заданной сетке.

21. Перечень используемых файлов программы

В Таблице 18 представлен перечень файлов, используемых программами.

Таблица 18. Перечень файлов, используемых программами.

Команда	<i>MULTIC2D</i>	<i>MULTIC3D</i>	Функция	Статус
	<i>input2</i>	<i>input3</i>	Входной файл для расчетов	Задается
	<i>output2</i>	<i>output3</i>	Выходной файл с результатами расчетов	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания
BHDA			Таблица зависимости $B(H)$	Задается
CURH	<i>CRITnnn</i>	<i>CRITnnn</i>	Таблица зависимостей критических токов	Задается
FORC		<i>force</i>	Запись компонентов сил	Создается двоичный файл, сохраняется после окончания
FORC		<i>forcf</i>	Запись компонентов сил	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания
GETB	<i>inout2dn</i>	<i>inout3dn</i>	Создается при вычислении массива данных	Создается двоичный файл, сохраняется после окончания
GETB	<i>inouf2dn</i>	<i>inouf3dn</i>	Создается при вычислении массива данных	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания
GETM	<i>tempfile.</i>	<i>tempfile.</i>	Промежуточная запись геометрии	Создается двоичный файл, после окончания работы удаляется
GETM	<i>mtape</i>	<i>mtape</i>	Запись матрицы для вычисления магнитных моментов	Создается двоичный файл, после окончания работы удаляется
HEAT	<i>heat2n</i>	<i>heat3n</i>	Запись распределения температур в файл для дальнейшей обработки	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания

Продолжение Таблицы 18.

HEAT	<i>fieldhts2n</i>	<i>fieldhts3n</i>	Запись компонент поля в файл для дальнейшей обработки	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания
LOSC	<i>closh2n</i>	<i>closh2n</i>	Запись НТСП потерь в файл для дальнейшей обработки	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания
LOSH	<i>hlosh2n</i>	<i>hlosh3n</i>	Запись ВТСП потерь в файл для дальнейшей обработки	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания
LOSH	<i>fieldhts2n</i>	<i>fieldhts3n</i>	Запись компонент поля в файл для дальнейшей обработки	Создается текстовый ASCII файл, сохраняется после окончания

22. Примеры расчетов

Ниже приведены примеры задания данных для расчета сверхпроводящего диполя с обмоткой оболочечного типа:

22.1 Двумерная задача

Расчет поперечного сечения.

Задание геометрии обмотки.

DRAW R=4,A=1,PHI=0.2,ALPHA=59.8,I=200000

\$\$

Чтение В-Н данных с файла CT81

VHDA FILE=CT81

Задание геометрии магнитопровода, грубая сетка.

DRAW SHAP=5,MATE=3,R=8,DR=5,NR=2,PHI=0,DPHI=15,NPHI=6

\$\$

Вычисление магнитных моментов.

GETM TOLM=1,NIT=3

Генерация сетки.

MESH NMAX=200,NTRI=2

Запись параметров магнита в файл MT2.

WRIT MT2

Печать параметров магнита.

PRIN

Запись геометрии магнита в файл.

```

GEOM WRL=YES
# Вычисление поля на обмотке вдоль линии PHI=59.8
GETB R=4,DR=0.1,NR=11,PHI=59.8
$$
# Вычисление поля в узлах сетки в полярной системе координат и
# подготовка данных для дальнейшей обработки компоненты поля HR
GETB R=0,DR=0.5,NR=11,PHI=0,DPHI=5,NPHI=19,COMP=HR,SAME=NO
$$
# Вычисление поля в узлах сетки в полярной системе координат и
# подготовка данных для дальнейшей обработки компоненты поля HTHETA
GETB R=0,DR=0.5,NR=11,PHI=0,DPHI=5,NPHI=19,COMP=HTHE,SAME=YES
$$
# Гармонический анализ поля.
HARM R=3.5,COMP=BT
$$
# Конец работы программы.
END

```

22.2 Трехмерная задача

Расчет пространственного поля.

```

# Задание геометрии обмотки.
DRAW R=4,A=1,PHI=0.2,ALPHA=59.8,I=200000,H2=300,END=10
$$
# Чтение В-Н данных с файла CT81
BHDA FILE=CT81
# Задание геометрии магнитопровода.
DRAW SHAP=5,MATE=3,R=8,DR=5,NR=2,PHI=0,DPHI=15,NPHI=6
DRAW H1=0,H2=280
$$
DRAW SHAP=5,MATE=3,R=8,DR=5,NR=2,PHI=0,DPHI=15,NPHI=6
DRAW H1=280,H2=290

```

```

$$
# Вычисление магнитных моментов.
GETM TOLM=1,NIT=20
# Запись параметров магнита в файл MT3.
WRIT MT3
# Печать параметров магнита.
PRIN
# Запись геометрии магнита в файл.
GEOM WRL=YES
# Вычисление поля вдоль оси магнита
GETB Z=0,DZ=10,NZ=35
$$
# Вычисление поля в узлах сетки в декартовой системе координат.
# подготовка данных для дальнейшей обработки компоненты поля HZ
GETB Z=280,DZ=0.5,NR=11,X=0,DX=0.5,NX=19,COMP=HZ
$$
# Вычисление интеграла поля в точке X=0,Y=0.
GETB FINT=YES
$$
# Гармонический анализ интеграла поля.
HARM R=3.5,COMP=BT
$$
# Конец работы программы.
END

```

23 Точность расчетов

Команды **FORC**, **GETB**, **GETM** и **LEFF** имеют параметры, задающие точность вычисления в абсолютных единицах плотности магнитных моментов, поля или интеграла поля. Точность вычисления поля по закону Био-Савара задается параметрами **INMA**, **NMAX**, определяющие максимальное число разбиений по прямоугольнику и токовой нити. Увеличение этих параметров на единицу приводит к удвоению разбиения числен-

ного интегрирования. Остальные параметры, определяющие точность численного интегрирования токовой составляющей поля, определялись экспериментальным путем таким образом, чтобы относительная точность вычисления поля или интеграла поля была не хуже 10^{-8} . Эти параметры зафиксированы в теле программ.

Разумеется, точность вычисления поля в присутствии магнитопровода зависит от числа элементов ферромагнетика и качества разбиения. Желательно в разбиении иметь треугольники, стремящиеся к равносторонним. Более высокую точность дает разбиение геометрии, в которой вершины соседних элементов совпадают, а не лежат на гранях соседних элементов. Треугольные призмы также дают более высокую точность по сравнению с четырехугольными призмами.

Анализ влияния числа призм на точность расчета показал, что для достижения точности 10^{-4} в сверхпроводящих диполях с теплым магнитопроводом [26] достаточно разбить магнитный экран на 24 элемента в поперечном сечении первого квадранта, так как ферромагнетик находится на значительном удалении от обмотки. При приближении магнитопровода к обмотке для достижения той же точности необходимо более тщательное разбиение. Например, в сверхпроводящих диполях с холодным магнитопроводом [27] необходимая точность обеспечивалась при 80 элементах в центральном сечении.

Интегрирование вдоль линии можно выполнять командой **GETB**, точность интеграла зависит от числа точек, заданных на линии.

В команде **INTE** параметр **ERRO** задает относительную точность вычисления интегралов.

Точность вычисления нелинейностей поля или интеграла поля определяется заданной расчетной сеткой и числом сечений для численного интегрирования.

Заключение

Пакет программ MULTIC эксплуатируется в ИФВЭ длительное время, постоянно модернизируется и расширяется. С его помощью разработаны многие магнитные системы, в частности, опытно--промышленная партия сверхпроводящих диполей УНК [28]. Сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами показывает, что их расхождение не хуже 10^{-4} для резистивных и сверхпроводящих магнитных систем и 5×10^{-6} для магнитных систем на постоянных магнитах. Результаты расчетов траектории

электронного пучка магнитной системы TEL [28] полностью совпали с прямыми экспериментальными измерениями [29]. Пакет снабжен дружественным интерфейсом для пользователя, имеет достаточно обширную диагностику, средства вывода для обработки графической информации и встроенную систему **HELP**. Пакет программ мобилен и машинно-независим, что позволяет легко устанавливать его на другие типы ЭВМ и использовать различные операционные системы. С помощью пакета *MULTIC* можно разрабатывать различные магнитные системы произвольной пространственной конфигурации.

Список литературы

- [1] Балбеков В.И., Ткаченко Л.М., Федосеев А.И. Программа MULTIC для расчета трехмерных магнитных полей. – Препринт ИФВЭ 81-121, Серпухов, 1981.
- [2] Ткаченко Л.М. Пакет программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной конфигурации. Препринт ИФВЭ 98-28. Протвино 1998.
- [3] Tkachenko L.M., Codes MULTIC2 and MULTIC3. In "Computer Codes in Accelerator Domain", Internal Report, DESY M-92-07, p.40-41. Nov., 1992.
- [4] Ткаченко Л.М. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ MULTIC-2D № 2013660926 от 10.10.2014.
- [5] Ткаченко Л.М. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ MULTIC-3D № 2018618732 от 19.07.2018
- [6] Armstrong A.G., Collie C.J., Diserens N.J., Newman M.J., Simkin J. and Trowbridge C.W. GFUN3D User Guide. RL-76-029/A, 1976.
- [7] <https://www.web3d.org/documents/specifications/14772/V2.0/part1/concepts.html>
- [8] Ткаченко Л.М. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ ELBEAM № 2023660297 от 17.05.2023
- [9] vrm1-viewer.winsite.com/freeware/
- [10] PAW Physics Analysis Workstation. CERN Program Library Long Writeup Q121. CERN Geneva, Switzerland.
- [11] <https://www.originlab.com/origin>
- [12] Rosten H.I. A Method for the Calculation of the Magnetostatic Field from a Wide Class of Current Geometries. RL-74-077, 1974.

- [13] Newman M.J. A Message Decoding System for Use with the InteractiveGraphics Package LDMX. RHEL/M/A19, 1974.
- [14] Kaugerts J, Moritz G, Wilson M, Ghosh A, den Ouden A, Bogdanov I, Kozub S, Shcherbakov P, Shirshov L, Tkachenko L, Richter D, Verweij A, Willering G, Fabbricatore P, Volpini G, 2007 Cable Design for FAIR SIS 300 BNL-79518-2007-JA. Accepted for Publication in IEEE Transaction on Applied Superconductivity (2007)
- [15] Rosten H.I. A Method for the Calculation of the Magnetostatic Field from PAa Wide Class of Current Geometries. RL-74-077, 1974.
- [16] Rosten H.I. The Constant Perimeter End. RL-73-096, 1973.
- [17] Colyer B. The Geometry of Constant Perimeter Dipole Windings. RL-73-143, 1973.
- [18] Балбеков В.И., Ткаченко Л.М. Оптимизация формы лобовых частей сверхпроводящих диполей УНК. – Препринт ИФВЭ 82-167, Серпухов, 1982.
- [19] Рубинраут А.М., Ткаченко Л.М. и др. Магнитное поле резистивного томографа с постоянными магнитами. – Электротехника, 8, 1995, стр.47-51.
- [20] Bogdanov I, Kozub S, Shcherbakov P, Tkachenko L, Zubko V., Muehle C., Moritz G., and Tommasini L. 2006 Optimization of a Dipole with Partially Keystoned Cable for the SIS 300 IEEE trans Appl Sup Vol No 395-398.
- [21] Брехна Г. “Сверхпроводящие магнитные системы”. “Мир”, Москва, 1076, стр. 291, 298.
- [22] Ткаченко Л.М., Козуб С.С. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ MULTIC-2D № 2024668367 от .06.08.2024
- [23] Brandt E.H., Indenbom M. Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field. Phys Rev B Condens Matter. 1993 Nov 1; 48(17):12893-12906. doi: 10.1103/physrevb.48.12893. PMID: 10007663.
- [24] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. стр. 10. Теплопередача. «Энергия». Москва. 1975.
- [25] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. стр. 31. Теплопередача. «Энергия». Москва. 1975.
- [26] Балбеков В.И., Португалов Ю.И., Ткаченко Л.М., Анализ факторов, влияющих на однородность поля сверхпроводящего диполя. Препринт ИФВЭ 82-109, Серпухов, 1982.

- [27] Ageev A.I., et al. Superconducting Cold Iron Dipole Magnet for UNK. Proc. of the ICFA Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics. BNL, 1986.
- [28] Балбеков В.И. и др. Качество магнитного поля в опытно-промышленной партии СП-диполей УНК. - IPAC-92, Гамбург, ФРГ, 1992, Препринт ИФВЭ 92-69, Протвино, 1992.
- [29] Kashtanov E., Kozub S., Kuznetsov G., Pleskach V., Sery A., Shiltsev V., Sytnik V., L. Tkachenko, Zintchenko S., Zubko V. Tevatron Electron Lens Magnetic System. Proc. of 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, Illinois, USA, June 18-22, 2001, pp.3630-3633,
- [30] Bishofberger K., Shiltsev V., Andriischin A., Baluyev A., Kozub S., Krotov N., Sytnik V., Tikhov A., Tkachenko L. Characterization of the Tevatron Electron Lens Magnetic System. Proc. of 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, Illinois, USA, June 18-22, 2001, pp.3406-3408

Рукопись поступила 28 октября 2024 г.

Л.М. Ткаченко

Пакет компьютерных программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной геометрической конфигурации.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Подписано к печати	01.11.2024	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 4,3.	Уч.– изд.л. 6,3.	Тираж 60.	Заказ 12.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru/; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

