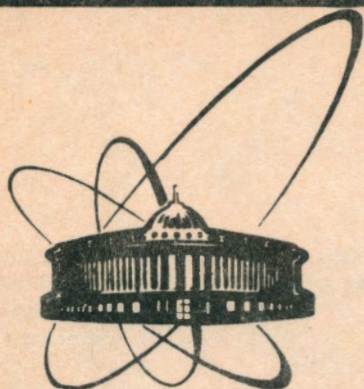


92-488



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P11-92-488

Е.П.Жидков, Р.С.Егикян, Л.А.Меркулов, Э.Г.Никонов,  
А.Д.Соловьев, И.П.Юдин

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ  
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
СПЕКТРОМЕТРА СТОРС

1992

## ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является описание усовершенствованного варианта алгоритма программы для расчета поля сверхпроводящего тороидального магнита, служащего основой спектрометра СТОРС, конструкция которого описана в [1].

Сверхпроводящий магнит состоит из трех модулей. Мы в дальнейшем ограничимся рассмотрением только модуля одного типа, поскольку расчеты магнитного поля для других двух модулей проводятся аналогично.

Каждый модуль состоит из восьми одинаковых обмоток прямоугольного сечения (рис.1).

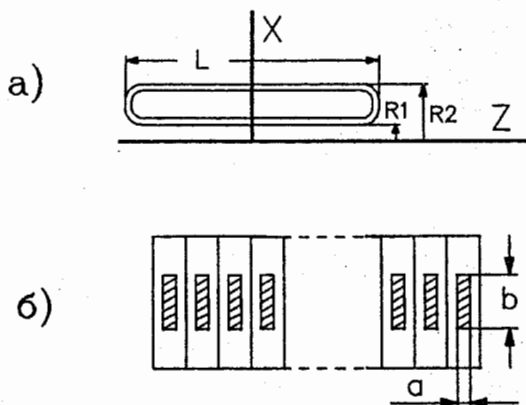
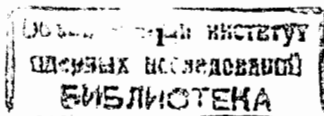


Рис.1 Обмотка магнитной системы спектрометра СТОРС

Поперечное сечение обмотки, изображенной на рис.1а, имеет вид, указанный на рис.1б, и состоит из 70 слоев с сечениями 30мм × 4.4мм. В каждом слое расположен сверхпроводник сечением  $a \times b$ . Радиус кривизны криволинейных участков обмотки равен  $R=50$ см. Остальные параметры, указанные на рис.1, имеют следующие значения:

$L=1200$ см,  $R_1=54$ см,  $R_2=250$ см,  $a=0.17$ см,  $b=1.233$ см.



A, B — параметры сечения сверхпроводника (рис. 16);  
 R0 — радиус кривизны первого слоя обмотки;  
 DR — приращение радиуса R0 при переходе к следующему слою обмотки;  
 CENTER — расстояние центра обмотки от оси Z (рис. 1а);  
 T — ток, текущий по сверхпроводнику;  
 XN, WN — узлы и веса квадратурной формулы Гаусса — Лежандра;  
 N — количество узлов квадратурной формулы Гаусса — Лежандра.  
 Здесь XN и WN — массивы порядка N.

### ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Проводились тестовые расчеты для экспериментального определения вычислительной точности предложенного авторами алгоритма для точек, близких к границе проводника. Из анализа выражения (2) ясно, что на границе проводника интеграл (2) имеет интегрируемую особенность. Для практического определения погрешности алгоритма были проведены расчеты по квадратурным формулам с различным количеством узлов N. Результаты расчетов для ненулевых компонент магнитной индукции  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  для точки  $x = 89.66$  см,  $y = 7.84$  см,  $z = 540$  см, расположенной достаточно близко от границы проводника, приведены в таблице 1.

Таблица 1

N	$B_x$	$B_y$	$B_z$
5	-0.5884619	1.418970	0.2263851
7	-0.5933637	1.428075	0.2573699
9	-0.5343843	1.398995	0.2274543
11	-0.5470114	1.403386	0.2290988
13	-0.5545913	1.406606	0.2338535
15	-0.5508143	1.405361	0.2325893
20	-0.5507266	1.405271	0.2322633
25	-0.5508986	1.405320	0.2323333
30	-0.5509060	1.405322	0.2323401

Из сравнения значений трех компонент  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  для различных значений N можно сделать вывод о том, что при некотором N алгоритм, описанный выше, обеспечивает вычисление по крайней мере четырех верных знаков с заданной точностью. Таким образом, алгоритм позволяет вычислить значения магнитной индукции  $\vec{B}$  с необходимой точностью для магнитной системы, конфигурация которой описана во введении.

Вычисление составляющих магнитного поля во всех точках пространства модуля должно осуществляться с относительной точностью не хуже  $3 \cdot 10^{-4}$ . В целом поведение каждой составляющей в зависимости от местоположения точки ведет себя неоднозначно, так что требование относительной точности выполнимо для всех составляющих одновременно только при увеличении числа разбиений криволинейных участков как в случае [1], так и при увеличении числа N в предлагаемом методе. В нашем случае N является количеством узлов квадратурной формулы Гаусса — Лежандра. В обоих случаях это приводит к увеличению времени счета в каждой точке. В предлагаемом методе оптимальные условия выполнимы для  $N = 20 \div 25$ , что позволяет получить выигрыш во времени счета по сравнению с [1] в  $8 \div 9$  раз при аналогичных значениях числа разбиения криволинейных участков.

### АЛГОРИТМ

Для нахождения индукции  $\vec{B}$  магнитной системы, описанной во введении, использовался закон Био-Савара-Лапласа:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{j} \times \vec{R}}{R^3} dV. \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Генри/метр — магнитная постоянная,  $\vec{j} = \frac{J}{S}$  — плотность тока в проводнике,  $\vec{J}$  — полный ток, S — поперечное сечение проводника, dV — элемент объема. Если J выражено в амперах, все остальные величины — в метрах, то индукция  $\vec{B}$  будет выражена в теслах. Все расчеты проводились в предположении, что плотность тока одинакова в каждой точке поперечного сечения проводника. Поэтому формулу (1) можно преобразовать к виду:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 J}{4\pi S} \int_V \frac{\vec{k} \times \vec{R}}{R^3} dV. \quad (2)$$

где  $\vec{k}$  — единичный вектор, имеющий направление тока в проводнике. Для того, чтобы вычислить значение интеграла по объему проводника, разобьем проводник на восемь частей: четыре прямолинейных и четыре криволинейных. Согласно [2] интеграл вида (2) может быть взят точно по прямолинейному участку прямоугольного сечения и по двум переменным для криволинейного. Таким образом, точность алгоритма будет зависеть только от того, насколько точно будут вычислены интегралы на криволинейных участках проводника. Если рассмотреть какой-либо из криволинейных участков в локальной цилиндрической системе координат  $(\rho, \phi, z)$ , то после взятия интегралов по  $\rho$  и  $z$  получим интегралы по  $\phi$ , которые вычисляются нами приближенно. Для вычисления интегралов по  $\phi$  использовались квадратурные формулы Гаусса — Лежандра. После вычисления составляющих магнитной индукции  $\vec{B}$  в некоторой точке для каждого из восьми участков проводилось суммирование по всем участкам. Такая процедура осуществлялась для каждого из 70-ти слоев обмотки. Затем значения магнитной индукции суммировались по слоям. После этого строилась конструкция всей магнитной системы [1] и результирующее значение магнитной индукции получалось суммированием значений магнитной индукции для каждой из восьми обмоток после соответствующего преобразования координат.

### ПРОГРАММА

Алгоритм, описанный в предыдущем параграфе, реализован в виде программы на ФОРТРАНе. Имя программы — ORANGE. Вызов программы осуществляется следующим образом:

CALL ORANGE (NSL, X, Y, Z, BX, BY, BZ, A, B, CZ, CY, R0, DR, CENTER, T, XN, WN, N),

где

NSL — количество слоев в обмотке;

X, Y, Z — координаты расчетной точки в глобальной системе координат (рис. 1а);

BX, BY, BZ — компоненты магнитной индукции  $\vec{B}$  в расчетной точке (X, Y, Z);

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С.В. и др. "Сверхпроводящая магнитная система тороидального спектрометра СТОРС. Результаты расчетов". Сообщение ОИЯИ P1-92-379, Дубна, 1992, 46с.
2. Feng Z.X., IEEE Transaction on Magnetics, MAG-21, 6(1985), p.2207.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 декабря 1992 года.

Жидков Е.П. и др.

P11-92-488

Алгоритм и программа моделирования поля магнитной системы спектрометра СТОРС

Приведено описание алгоритма и программы ORANGE расчета магнитного поля безжелезного сверхпроводящего тороидального спектрометра СТОРС (ЛСВЭ ОИЯИ). Особое внимание обращено на вычисление поля от криволинейных (дугообразных) участков обмотки с прямоугольным поперечным сечением. Эффективный выбор численного метода (метод Гаусса — Лежандра) взятия соответствующих криволинейных интегралов и оптимальная программная реализация этого метода позволили в 8—9 раз уменьшить время вычисления поля в произвольной точке рабочей области магнита. Вычисления магнитного поля спектрометра СТОРС проводились с относительной точностью порядка  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации и в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1992

Перевод авторов

Zhidkov E.P. et al.

P11-92-488

Algorithm and Program ORANGE for Magnetic Field Calculation of Superconducting Air-Core Toroidal Spectrometer STORS

It has been indicated the description of algorithm and program ORANGE for magnetic field calculation of superconducting air-core toroidal spectrometer STORS (PPL of JINR). Special attention has been looked to field calculation from bends with rectangular cross sections. Gauss—Legendre method is very effective choice for calculation of corresponding integrals. Design time of magnetic field has been reduced in 8—9 time. Magnetic field calculation has been made with relative accuracy about  $3 \cdot 10^{-4}$ .

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation and at the Particle Physics Laboratory, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1992