



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

4596/2-81

2/9-81

P9-81-354

+

М.А.Воеводин, Е.П.Жидков, Л.П.Зиновьев,
В.Кирчева, А.Д.Коваленко, Р.В.Полякова

РАСЧЕТ КОРРЕКЦИИ
ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СИНХРОФАЗОТРОНА

1981

Градиент магнитного поля в слабофокусирующих кольцевых ускорителях, определяющий величину показателя неоднородности магнитного поля /МП/ "п", формируется в большинстве случаев наклоном полюсов. Так, для синхрофазотрона наклон поверхности полюса, определяемый выражением:

$$2\alpha = \text{arctg} (2hn/R_0)$$

/2h - высота зазора на равновесной орбите R_0 /, составляет $9,3 \cdot 10^{-3}$ рад /1/.

Наличие ряда факторов, таких, как динамика роста тока возбуждения в обмотках магнита, наличие градиента остаточного магнитного поля в зазоре магнита, механические неточности при изготовлении полюсов, приводит к отклонению градиента от расчетной величины. Для коррекции "п", как правило, используют проводники с током, расположенные вблизи поверхности полюсов магнита.

В данной работе изложена методика расчета и определены величины оптимальных токов коррекции применительно к синхрофазотрону ЛВЗ ОИЯИ.

На рис.1 показано поперечное сечение камеры синхрофазотрона с расположенными внутри нее корректирующими проводниками.

Проводники условно разделены на три группы: центральную /I/, с помощью которой эффективно корректируется величина квадратурной составляющей МП, и две крайние /II/, регулирующие секступольную составляющую МП.

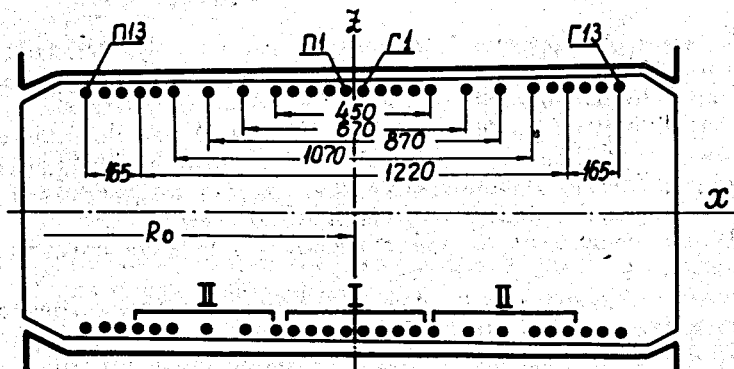
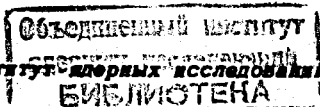


Рис.1. Расположение корректирующих проводников внутри вакуумной камеры синхрофазотрона.



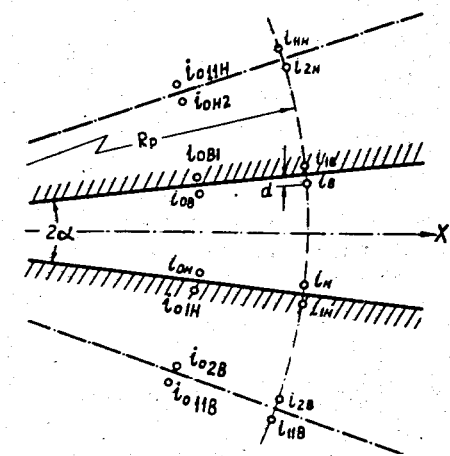


Рис.2. Геометрия полюсов и токов при расчете градиента магнитного поля методом зеркальных отражений.

В решении задачи можно выделить следующие этапы:

1. Расчет величины градиента поля от одного проводника и от группы проводников во всей рабочей области камеры ускорителя с учетом реальных координат проводников, составляющих рабочую обмотку.

2. Определение величины тока для центральной группы провод-

ников при их последовательном подключении к одному источнику питания.

3. Определение оптимальной величины токов в отдельных проводниках, регулирующих секступольную неоднородность МП.

Для расчета градиента МП был использован аналогично [2] метод зеркальных отражений. Поле, создаваемое проводниками /как прямыми, так и обратными/, в рабочей области ускорителя представлялось в виде суммы полей, создаваемых этими токами и совокупностью их многократных зеркальных отражений в полюсах магнита. Расчеты проводились в предположении бесконечно тонких проводников.

На рис.2 приведена картина отражений для двух симметричных относительно медианной поверхности токов i_B и i_H в плоскости, перпендикулярной орбите частиц в ускорителе.

Для такой пары витков с прямыми i_B и i_H и обратными i_{OB} и i_{OH} проводниками токи и их отражения в рассматриваемой плоскости располагаются симметрично по окружности с центром в вершине угла 2α . Общее число отражений для полюсов синхротрона составляет $2N = \pi/\alpha = 682$. Однако, как показали численные расчеты, максимальная погрешность не превышает 10^{-4} , если ограничиться числом отражений $2N = 100$.

Величина градиента МП рассчитывалась для двух наборов исходных данных.

В первом случае: $a = 0$, $d = 2,75$ см - расстояние проводника до полюса; $z_{II} = \pm 17,25$ см, $x_{II} = 0$ - координаты проводников с током; $z_{OP} = \pm 17,25$ см, $x_{OP} = 100$ см - координаты обратных проводников.

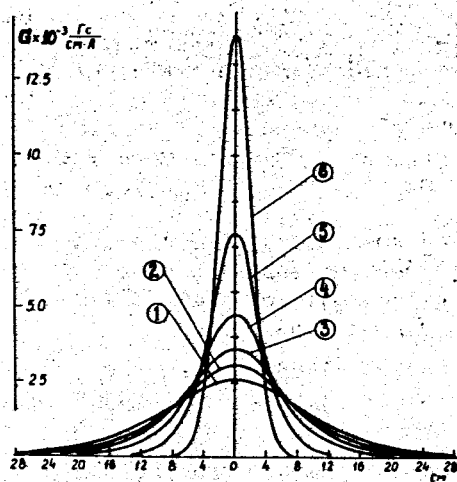
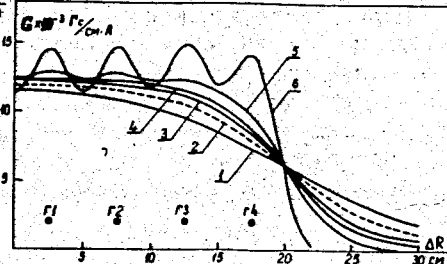


Рис.4. Зависимость $G(x)$, вычисленная для различных z при последовательном включении проводников Г1...Г4. /1 - $z = 0,75$ см; 2 - $z = 6,75$ см; 3 - $z = 8,75$ см; 4 - $z = 9,75$ см; 5 - $z = 11$ см; 6 - $z = 13$ см/.

Рис.3. Семейство кривых $G(x)$, вычисленных для различных z /1 - $z = 0,75$ см; 2 - $z = 4,75$ см; 3 - $z = 6,75$ см; 4 - $z = 8,75$ см; 5 - $z = 11$ см; 6 - $z = 13$ см/.



При этом выражение для градиента МП одной пары проводников можно представить в следующем виде:

$$G(x, z) = \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0,2i \left[\sum_{n=1}^{50} \frac{x^2 - [2(n-1)(z_{II} + d) + (z_{II} - z)]^2}{[x^2 + (2(n-1)(z_{II} + d) + (z_{II} - z))^2]^2} + \sum_{n=1}^{50} \frac{x^2 - [2(n-1)(z_{II} + d) + (z_{II} + z)]^2}{[x^2 + (2(n-1)(z_{II} + d) + (z_{II} + z))^2]^2} + \sum_{n=1}^{50} \frac{x^2 - [z_{II} + z + 2nd + 2z_{II}(n-1)]^2}{[x^2 + (z_{II} + z + 2nd + 2z_{II}(n-1))^2]^2} + \sum_{n=1}^{50} \frac{x^2 - (z_{II} - z + 2nd + 2z_{II}(n-1))^2}{[x^2 + (z_{II} - z + 2nd + 2z_{II}(n-1))^2]^2} \right] \quad /1/$$

На рис.3 показано семейство зависимостей $G=f(x, z)$, вычисленных по /1/ для шести значений z .

На рис.4 представлена зависимость $G=f(x, z)$, рассчитанная для случая, когда обмотка, изменяющая величину градиента МП, состоит из четырех проводников /Г1...Г4/ с током 1А. Видно,

что производные "n" в области $x \leq 15$ см и $z = +10$ см малы, а действие проводников эквивалентно действию поверхностных токов с постоянной плотностью.

При $|z| > 10$ см в распределении "n" начинает проявляться влияние каждого проводника в отдельности, обусловленное уменьшением области действия по x и большой величиной производной dH_z/dz /рис. 3/.

Для регулирования секступольной компоненты МП с помощью 2-й группы проводников необходимо было по заданной линейной зависимости ($G=ax$) определить величины токов в обмотке II.

В этом случае использовались следующие данные:

$$\begin{aligned} 2a &= 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ рад}; d = 0; 2N = 100; \mu = 1000; \\ x_{п1} &= 22,5 \text{ см}; x_{п2} = 33,5 \text{ см}; x_{п3} = 43,5 \text{ см}; x_{п4} = 53,5 \text{ см}; \\ x_{п5} &= 61 \text{ см}. \end{aligned}$$

Определение величины и направления тока в витках по заданному градиенту МП является обратной задачей магнитостатики. Так как количество проводников /обозначим его M /, которыми корректируется градиент, не превышает десяти, то в этом случае обратную задачу можно решать методом наименьших квадратов /МНК/ без регуляризации.

Минимизирующий функционал в нашем случае будет иметь вид

$$P = \sum_{j=1}^k [x_j - G(x_j, z_j = \text{const})]^2, \quad /2/$$

где $G(x_j, z_j = \text{const})$ - градиент от суммы проводников в текущей точке, x_j на линии $z_j = \text{const}$, а именно:

$$G(x_j, z_j = \text{const}) = \sum_{m=1}^M i_m G_m(x_j, z_j, x_m, z_m), \quad /3/$$

G_m - градиент МП от m -го проводника, k - количество точек, в которых вычисляется G , i_m - ток в m -ом проводнике.

Подбор токов проводился по программе, написанной на фортране, с использованием программы /3/.

Величина токов = отражений определялась по рекуррентному соотношению

$$i_{n+1} = i_n \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \quad /4/$$

/при этом знаки токов чередуются/.

Величина градиента $G(x, z)$ от M проводников с учетом угла α определяется по формуле

$$G(x, z) = 0,4 \sum_{m=1}^M i_m \sum_{n=1}^N \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^{n-1} \cos(2n-1)\alpha \left\{ \frac{1}{\ell_{вп}^2} + \frac{1}{\ell_{нп}^2} \right\} +$$

$$+ 2(x - x_{jn}) [(R_p + x) - (R_p + x_m) \cos(2n-1)\alpha] \left(\frac{1}{\ell_{вп}^4} + \frac{1}{\ell_{нп}^4} \right) \quad /5/$$

Здесь

$$\ell_{вп}^2 = [(R_p + x) - (R_p + x_m) \cos(2n-1)\alpha]^2 + [z - (R_p + x_m) \sin(2n-1)\alpha]^2,$$

$$\ell_{нп}^2 = [(R_p + x) - (R_p + x_m) \cos(2n-1)\alpha]^2 + [z + (R_p + x_m) \sin(2n-1)\alpha]^2,$$

$$R_p = h/a,$$

x_m - координата m -го проводника.

Полученные в результате расчета оптимальные величины токов приведены в таблице.

Для этих значений токов зависимость $G=f(x, z)$ оказалась близкой к линейной в области $z \leq +4$ см /рис. 5, кривая 1/. Изменяя величины токов в проводниках при сохранении найденных соотношений между ними, можно в широких пределах регулировать величину секступольной компоненты МП ускорителя. На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости $G=f(x, z)$. Проводники с координатами $x_{п1} = -1,5$ см и $z_{п1} = +17,5$ см запитывались импульсным током 30 А. Небольшие изменения в ходе кривых объясняются различными координатами обратных проводников. Измерения проводились в плоскости $z = 0,75$ см индукционным магнитометром /4/ с использованием датчика, чувствительного к квадрупольной компоненте МП /6/. На рис. 7 представлены экспериментальные зависимости $G=f(x)$, измеренные в различных по высоте плоскостях для проводников, имеющих координаты $x_{п1} = -1,5$ см, $x_{оп1} = -100$ см. Для сравнения на этом же рисунке пунктирными линиями

Таблица

Номер проводника	Координата x /см/	Величина тока /А/
Г5	22,5	0,767
Г6	33,5	0,492
Г7	43,5	0,902
Г8	53,5	1,19
Г10	61,0	3,56

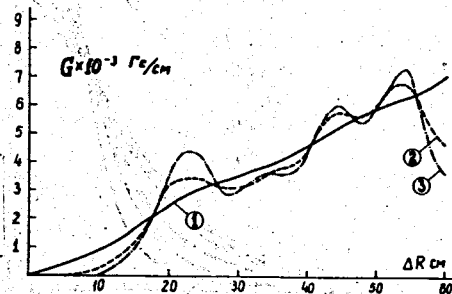


Рис. 5. Зависимость $G(x)$, вычисленная для трех значений z /1 - $z = 0,75$ см; 2 - $z = 8,75$ см; 3 - $z = 9,75$ см/ при введении секступольной компоненты МП с помощью проводников II группы.

Рис. 6. Экспериментальные зависимости $G(x)|_z = 0,75$ см при различных координатах обратного проводника с током / 1 - $x_{оп} = +100$ см; 2 - $x_{оп} = -100$ см; 3 - $x_{оп} = -73$ см; 4 - $x_{оп} = +73$ см/.

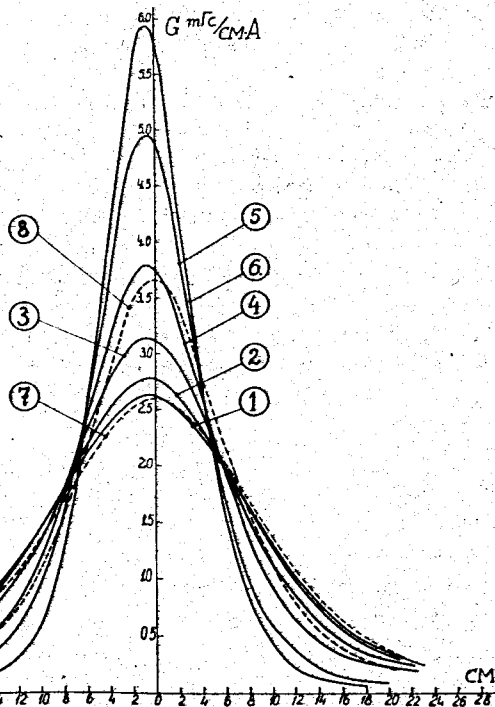
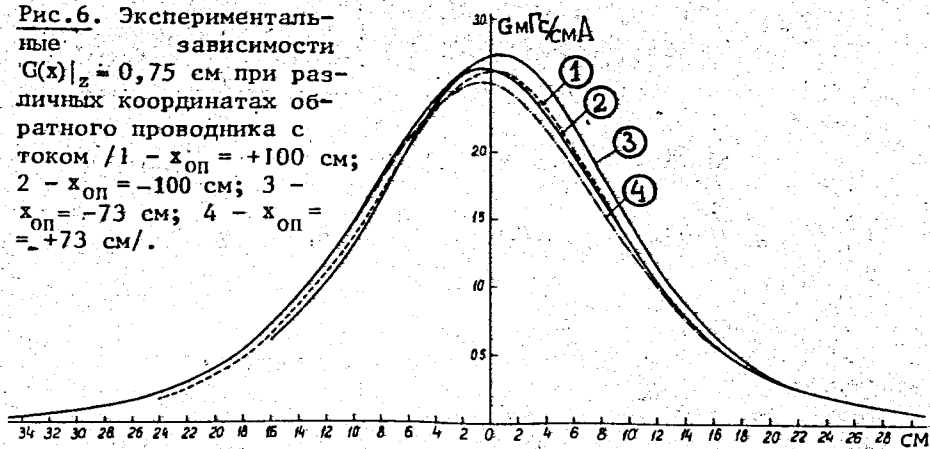


Рис. 7. Семейства экспериментальных кривых $G(x)$, измеренных на различных z / 1 - $z = 0,75$ см; 2 - $z = 2,75$ см; 3 - $z = 4,75$ см; 4 - $z = 6,75$ см; 5 - $z = 8,75$ см; 6 - $z = 9,75$ см/ при $x_{оп} = -100$ см, и расчетные кривые, соответствующие $z = 0,75$ см /7/ и $z = 6,75$ см /кривая 8/.

изображены расчетные кривые, соответствующие $z = 0,75$ см /кривая 7/ и $z = 6,75$ см /кривая 8/.

Из рисунка видно достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Следует также отметить, что изложенная методика может быть использована не только при решении задачи коррекции градиента МП ускорителя с целью расширения рабочей зоны камеры ускорителя на малых уровнях магнитной индукции, но и при выборе оптимальных условий резонансного вывода пучка из камеры синхротрона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев А.А. и др. Ускорители элементарных частиц. Атомиздат, М., 1957, с.15.
2. Артемьева З.Л. и др. Краткие сообщения по физике, 1971, №9, с.25.
3. Силин И.Н. ОИЯИ, 11-3362, Дубна, 1967.
4. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, 13-11855, Дубна, 1978.
5. Воеводин М.А. Авт. свид. СССР №631848 от 17.06.76, Бюлл. ОИПОТЗ, 1978, №41, с.170.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 мая 1981 года.