

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

В751

P9-87-457

С.Б.Ворожцов, М.Б.Калинкина, В.А.Саенко

СИСТЕМА ПРОГРАММ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЦИКЛОТРОННОГО МАГНИТА ПО ЗАДАНЫМ
ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПУЧКА

Направлено в Оргкомитет Конференции по расчету
электромагнитных полей /КОМПЬЮМАГ/, Грац,
Австрия, 25-28 августа 1987 г.

1987

ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования на ЭВМ циклотронной установки в ее наиболее существенных чертах необходимы по крайней мере 3 системы программ, относящиеся к магнитной системе, ускоряющему ВЧ-полю и динамике пучка^{1/}. Схема такой модели показана на рис.1, где CYCLOTRON - управляющая программа;

- MAGNET - система для расчета магнитных полей, содержащая программы POISCR^{2/}, MAGNET - CERN^{3/}, GFUN3D^{4/}, MAGNA^{5/}, MAGSYS^{6/}, CMAP и др.
- BEAM - система для расчета динамики пучка, содержащая программы FATRON^{7/}, MAD^{8/} и др.;
- RF - система для расчета ВЧ-поля, базирующаяся на комплексе программ MAFLA^{9/}.

Модель CYCLOTRON создается со следующими целями:

1. Проверка ранее созданной концепции ускорителя на основе моделирования с максимально возможным учетом реальных условий.
2. Обнаружение новых эффектов в физике ускорителя.
3. Оптимизация параметров, формулирование новых режимов.

В настоящее время имеются все ранее перечисленные программы, и работа по созданию численной модели заключается в следующем:

1. Модификация и адаптация программ к особенностям рассматриваемой задачи.
2. Организация стандартных протоколов для обмена информацией между программами.
3. Проведение тестовых расчетов для стандартных ситуаций, где функционирование установки известно.

В работе рассматривается лишь расчет магнитной системы в рамках модели CYCLOTRON.

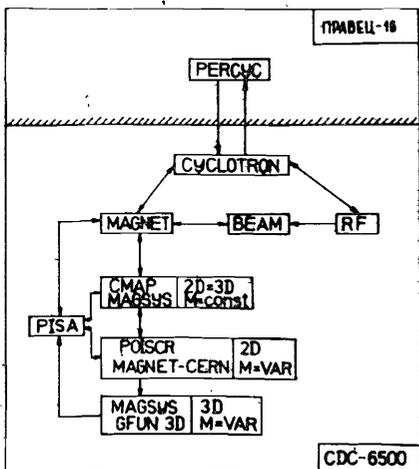
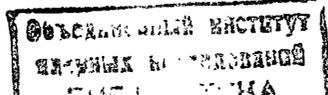


Рис.1. Схема системы программ.



МОДЕЛЬ МАГНИТА

Основой модели магнита является система MAGNET для расчета магнитного поля при заданных параметрах магнита. В программе SMAR для определения поля спирально-секторных или радиально-секторных циклотронов выполняется серия двумерных расчетов в различных сечениях магнита для последующего восстановления пространственной карты^{/10/}. Оценка поля проводится как в предположении о постоянном намагничивании магнитопровода $M=Const/$, так и с учетом изменения намагниченности от индукции $M=VAR/$. Расчет пространственной конфигурации магнита выполнялся по программам NAGSYS или GFUN3D.

Для выбора и коррекции параметров магнита применялась программа PISA^{/11/}, оказавшаяся достаточно эффективной в условиях циклотронной установки.

Проблема оптимизации параметров циклотронного магнита рассматривалась ранее в работах^{/12-14/}. Однако в^{/12/} алгоритм оптимизации был недостаточно надежен и эффективен, в^{/13/} оптимизация магнитопровода на основе GFUN3D требовала больших затрат времени ЭВМ, в^{/14/} же решалась частная задача для циклотронов со сплошным полюсом.

Как известно, в программе PISA решается следующее матричное уравнение:

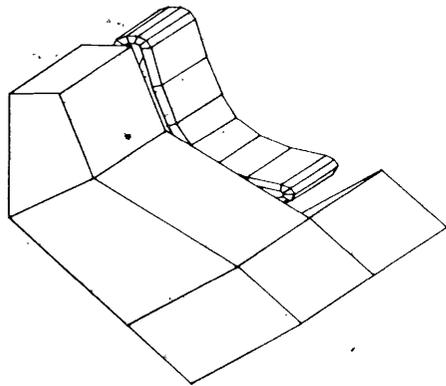
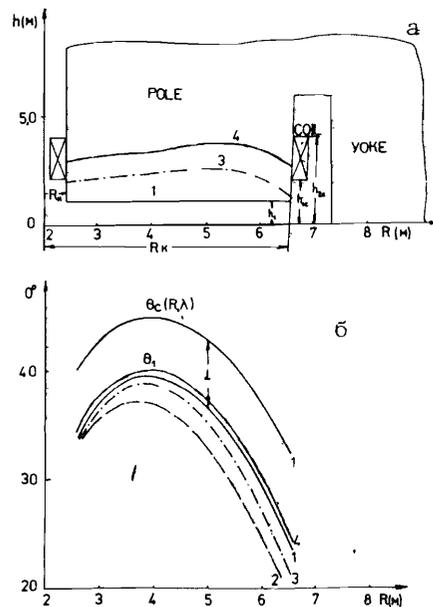


Рис.3. Геометрия магнита. Номера кривых, соответствующих вариантам, приведенным в таблице.

Рис.2. Общий вид магнита.



$$\begin{pmatrix} M^T W M & N^T \\ N & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \vec{p} \\ \vec{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M^T W \Delta \vec{s} + \vec{v} \delta \vec{p} \\ \Delta \vec{r} \end{pmatrix},$$

где $\Delta \vec{p}$ - шаг по параметрам, $\vec{\lambda}$ - вектор множителей Лагранжа, $\Delta \vec{s}$ - вектор невязки между полученными и требуемыми значениями целевых функций, $\Delta \vec{r}$ - то же, что и $\Delta \vec{s}$, но для точно фитируемых значений целевых функций, M и N - матрицы производных целевых функций по параметрам для $\Delta \vec{s}$ и $\Delta \vec{r}$ соответственно, W - диагональная матрица весовых множителей, $\delta \vec{p}$ - отклонение параметров от рекомендуемых, \vec{v} - вектор весовых множителей для $\delta \vec{p}$.

В качестве целевых функций для циклотронного магнита рассматривались следующие характеристики:

B_{max} - аксиальная компонента поля на осевой линии $\theta_c(R, \lambda)$ магнита /рис.3/,

$(B_{max})'_R$ - радиальный градиент осевого поля,

\bar{B} - азимутально-среднее поле,

F - флаттер,

f - частота обращения частиц,

Q_z - частота аксиальных свободных колебаний частиц.

При оптимизации варьировались следующие параметры:

h_1, h_2 - аксиальные размеры магнита,

R_H, R_K - радиальные размеры полюса,

2α - угловой размер полюса,

λ - параметр крутизны спирали осевой линии полюса,

JW - ампер-витки основной обмотки,

h_{1c}, h_{2c} - аксиальные размеры обмотки,

$M_{эф}$ - эффективная намагниченность полюса. Смысл этого параметра станет ясен из дальнейшего.

Набор целевых функций и параметров может быть расширен за счет небольших модификаций программы. Анализ полученных решений производится с учетом критериев завершения итерационного процесса оптимизации, заключающихся в следующем:

- Сумма квадратов невязок меньше заданной.

- Сумма квадратов невязок отличается от ее оценки в линейном приближении не более чем на 10%.

- Фактор релаксации меньше заданного.

Для подготовки исходных данных и анализа результатов разработана автоматизированная система PERCYS на базе персональной ЭВМ "Правец-16" (аналог IBM-PC/XT), подключенной через локальную сеть JINET^{/15/} к центральной ЭВМ ОИЯИ. Геометрия магнита, характеристики поля и динамики пучка в графической и цифровой форме выводятся на экран цветного дисплея и, при необходимости, фиксируются на графопостроителе и печатающем устройстве. Система допускает архивизацию результатов и манипулирование графическими объектами.

ОПТИМИЗАЦИЯ

Процесс формирования требуемых характеристик магнита выполняется в следующей последовательности:

1. Подготовка исходных данных с помощью PERCYS и передача их в центральную ЭВМ.
2. Расчет целевых функций для заданных параметров в интерактивном режиме на CDC-6500 в предположении $M = \text{const}$.
3. Анализ на ЭВМ "Правец-16" полученного решения и подготовка новых исходных данных. Повторение этапов 1÷3 до получения приемлемого исходного решения для оптимизации на следующем этапе.
4. Расчет по программе PISA оптимальных параметров в предположении $M = \text{const}$ и переход к следующему этапу.
5. Расчет по PISA параметров на базе двумерных программ и в предположении $M = \text{VAR}$.
6. Вычисление невязок по трехмерным программам и с учетом $M = \text{VAR}$. Переход к п.5, если решение недостаточно точное.

Анализ динамических характеристик для расчетных полей проводится либо по аналитическим формулам /на ранних этапах оптимизации/, либо при помощи программ трассировки частиц из комплекса BEAM.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для демонстрации возможностей программы и приемов формирования целевых функций в качестве исходной использовалась конфигурация спирально-секторного циклотронного магнита /рис.2/ с параметрами, близкими к приведенным в работе /16/. При этом считалось, что состояние магнитопровода близко к насыщению $/M_0 = 2,1 \text{ Тл}/$. Это предположение является достаточно оправданным для сверхпроводящих магнитных систем, где при полях $6 \div 10 \text{ Тл}$ намагниченность магнитопровода практически постоянна и вклад поля от обмотки возбуждения может достигать $\approx 50\%$. Первоначальный выбор параметров также может быть выполнен в рамках этого предположения. В качестве целевых функций задавались частота обращения частиц $f = 6,175 \text{ МГц}$ и частота аксиальных колебаний $Q_z = 1,35$ в диапазоне радиусов $R = 2,6 \div 6,2 \text{ м}$.

Для одновременного формирования названных выше целевых функций использовались параметр углового размера полюсного наконечника $\alpha = A + B \cdot R + C \cdot R^2$, профиль воздушного зазора $h_1(R)$ при 7 степенях свободы /7 прямоугольных шимм на полюсе, высота которых меняется независимо друг от друга/, крутизна спи-

рали $\lambda = \phi(L_1, L_2)$ с двумя степенями свободы L_1 и L_2 и эффективная намагниченность $M_{\text{эф}} = M + M_{\text{JW}}$, где M_{JW} определялась на основании эквивалентной замены поля токовых обмоток с уровнем возбуждения JW полем соответствующего намагниченного объема.

Наличие в задаче двух целевых функций f и Q разной размерности привело к необходимости использования весовых множителей \tilde{W}_f и \tilde{W}_Q . Примерно одинаковая относительная точность формирования была достигнута при $\tilde{W}_f = 1$ и $\tilde{W}_Q = 4$, используемых во всех дальнейших расчетах.

Заданием различных значений вектора регуляризации \vec{v} определялись "мягкие" ограничения на изменения значений параметров. Кроме того, вектор \vec{v} использовался для выделения одного или нескольких параметров при достижении компромисса между точностью формирования и практической реализуемостью получаемых значений параметров. В рамках алгоритма оптимизации применялась также возможность "жесткого" ограничения параметров заданными пределами. При достижении этих пределов значение параметра фиксировалось и он исключался из процесса оптимизации.

Оценка значений целевых функций для исходной конфигурации магнита /рис.3/ показала, что отклонения этих значений от требуемых достигают $\approx 25\%$ для f и $\approx 64\%$ для Q_z /рис.4, 5/. При помощи параметров α и $M_{\text{эф}}$ /см. таблицу, вариант 2/ был получен оптимальный с точки зрения минимума изменения параметров вариант конфигурации.

Однако точность формирования f и, особенно, Q_z могла бы быть лучше. Использование параметра λ не дало в этом смысле значительного эффекта ввиду малого числа степеней свободы. Включе-

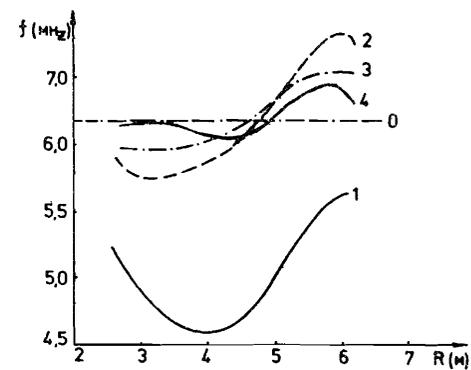


Рис.4. Частота обращения. 0 — требуемая зависимость.

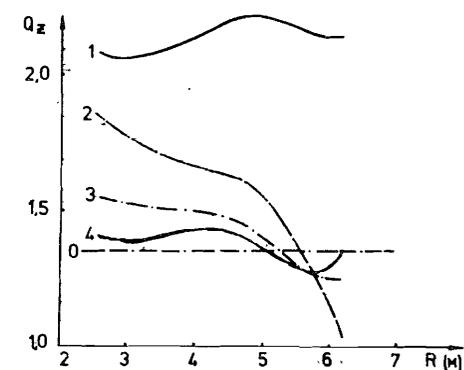


Рис.5. Частота свободных аксиальных колебаний. 0 — требуемая зависимость.

Таблица

Номер варианта	1	2	3	4	5
Параметры	исходн.	M α	M α h_1	M α h_1	M h_1
\vec{v}	-	0,18	0,6 0,15 0,6	0,1	0,1
$M_{эф}/M_0$	1,0	0,91	1,27	1,84	1,61
$\sum_i W_i (\Delta s_i)^2$	16,08	2,00	0,52	0,13	0,23

нием в число оптимизируемых параметров h_1 и выделением α при помощи вектора \vec{v} /вариант 3/ удалось значительно повысить точность формирования. Однако "затраты" по параметрам при этом существенно возросли. Так, увеличение $M_{эф}$ до значения 1,27 M_0 при $M_0 = 2,1$ Тл означает существенный рост необходимых JW. Дальнейшее продвижение по точности формирования требует еще больших "затрат" по параметрам /вариант 4/. Оценивая полученное решение для этого варианта, нужно отметить, что точность формирования Q_z соответствует требуемой $/1 < Q_z < 1,5/$, а точность формирования f согласована с погрешностью расчета при $M = \text{const}$. Доводка точности формирования f до требуемой с точки зрения динамики пучка обычно выполняется при этом уровне элементами тонкой коррекции /токовые обмотки на полюсе магнита/ с учетом $M = \text{VAR}$.

Помимо вышеуказанной возможны и другие последовательности формирования целевых функций с другими комбинациями параметров и значений \vec{W} и \vec{V} . Выбор одного из вариантов должен производиться с учетом всех требований к установке, в том числе и не связанных с процессом формирования /например, реализуемость параметров/. Такой выбор может быть сделан, например, на базе экспертной системы^{/17/}. Однако решение этой проблемы выходит за рамки данной работы.

Построенная методика определения параметров циклотронного магнита позволяет получать единственное и оптимальное на данном множестве параметров и заданных \vec{W} и \vec{V} решение. Единственность решения проверялась расчетами для двух различных началь-

ных значений $h_1 = 0,1$ м и $h_2 = 0,05$ м. Полученные решения совпадали с точностью, определяемой критерием выхода из итерационного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программная система позволяет при заданном наборе параметров, значениях весовых множителей и вектора регуляризации получать единственное оптимальное решение для формирования требуемых характеристик циклотронного магнита.

Соответствие точности формирования и практической реализуемости получаемых параметров обеспечивается при помощи весовых множителей и вектора регуляризации при достаточно широком наборе оптимизируемых параметров.

Система программ может быть использована как для начального выбора параметров циклотронного магнита, так и для их коррекции на исследуемой установке.

Авторы благодарны П.Г.Акишину, А.В.Федорову и В.Д.Кравцову, принимавшим участие в работе на начальном ее этапе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Keil E. CERN/LEP-TH/86-26, Geneva, 1986.
2. Iselin F.C. T-604. CERN Computer Center Program Library, 1984.
3. Iselin F.C. T-600, *ibid*.
4. Armstrong A.G. et al. RL-76-029/A, 1976.
5. Ворожцов С.Б. ОИЯИ, P9-83-90, Дубна, 1983.
6. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, Б1-9-85-232, Дубна, 1985.
7. Ворожцов С.Б. ОИЯИ, 9-86-19, Дубна, 1986.
8. Iselin F.C. CERN-LEP/TH/83-30, Geneva, 1983.
9. Barts T.C. et al. Proc. of the 1986 Lin. Acc. Conf., SLAC, 1986.
10. Ворожцов С.Б. ОИЯИ, P9-9216, Дубна, 1975.
11. Halbach K.A. Proc. Int. Conf. on Magn. Tech., Oxford, 1967, p.47.
12. Банчев В.Ц., Ворожцов С.Б., Жидков Е.П. ОИЯИ, P11-8982, Дубна, 1975.
13. Schott W., Zech E., Rösch N. Lecture Notes in Physics, 215, 1983.
14. Laisne A., Potaux D. Proc. of X Int. Conf. on Cycl. and App. East Lansing, 1984, p.89.

15. Говорун Н.Н. и др. ОИЯИ, Д11-86-702, Дубна, 1986.
16. Банчев В.Ц. и др. ОИЯИ, Р9-9848, Дубна, 1976.
17. Bush E. LA-10429-PR, 1985.

Ворожцов С.Б., Калинин М.Б., Саенко В.А.
Система программ для определения параметров циклотронного магнита по заданным динамическим характеристикам пучка

Р9-87-457

Рассмотрена задача определения параметров циклотронного магнита по заданным динамическим характеристикам пучка. Вычисление магнитного поля спирально-секторных и радиально-секторных циклотронов основано на серии двумерных расчетов в различных сечениях магнита с последующим восстановлением пространственной карты. Предложено применить метод для решения обратной задачи определения геометрии магнита по заданным целевым функциям. Для этого используется алгоритм, реализованный в программе PISA. Программа проверялась на примере спирально-секторного циклотронного магнита. При этом считалось, что намагниченность почти постоянна вследствие насыщения магнитопровода. Разработанная система программ позволяет при заданных наборе параметров, значениях весовых множителей и вектора регуляризации получать единственное оптимальное решение для формирования требуемых характеристик циклотронного магнита. Она может быть использована для начального выбора параметров и последующей их коррекции на исследуемой установке.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод авторов

Vorozhtsov S.B., Kalinkina M.B., Saenko V.A.
System of Programmes for Determination of Cyclotron Magnet Parameters by the Given Dynamic Characteristics of the Beam

Р9-87-457

A problem of determination of cyclotron magnet parameters by the given dynamic characteristics is considered. The calculation of the magnetic field of spiral-sector and radial-sector cyclotrons is based on a series of two-dimensional calculations at various cross sections of the magnet to be followed by reconstructions of the spatial map. The method is proposed to solve the inverse problem of determination of the magnet geometry for the given purpose functions. This can be achieved by the algorithm used in the programme PISA. The program was checked by calculation of a spiral-sector cyclotron magnet. The state of the magnet core was held to be close to saturation. The developed programme system allows a unique optimum solution for formation of required characteristics of the cyclotron magnet at the given set of parameters and values of weight factors and the regularisation vector. The programme system can be used both for initial choice of cyclotron magnet parameters and for their correction at the facility under investigation.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июня 1987 года.