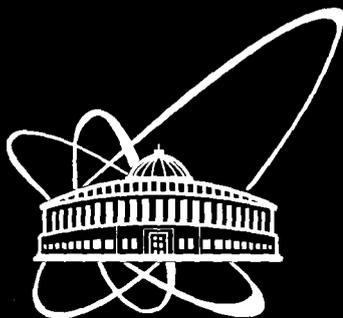




XJ0200233



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-2002-171

И. Н. Киян, С. Б. Ворожцов, Р. Тарашкевич*

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА
ЧАСТОТ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ
(BETATRON OSCILLATION RESEARCH
PROGRAM — BORP)

... 34 / 03

*Институт ядерной физики, Краков, Польша

2002

Введение

В изохронных циклотронах с вариацией магнитного поля (флаттером) – ускоряемая частица в процессе ускорения совершает свободные колебания в пространстве, называемые бетатронными колебаниями. Эти колебания можно разложить на радиальную и вертикальную составляющие и просчитать частоты радиальных и вертикальных бетатронных колебаний – $f_r(r)$ и $f_z(r)$. Частоты бетатронных колебаний необходимо знать при расчёте и оценке резонанса Уолкиншоу: $Q(r) = f_r(r) - 2 \cdot f_z(r)$, который надо учитывать, чтобы избежать перехода энергии радиальных бетатронных колебаний в энергию вертикальных бетатронных колебаний, так как такой переход приводит к расхождению пучка в вертикальном направлении и к потере ускоряемых частиц на дуантах изохронного циклотрона.

Представленная в данной работе программа для расчёта частот бетатронных колебаний – $f_r(r)$ и $f_z(r)$ (Betatron Oscillation Research Program - BОРР) представляет собой один из расчётных модулей программы помощи оператору изохронного циклотрона в выборе режимов работы изохронного циклотрона (Cyclotron Operator Help Program – СОНР). Данная программа написана на С++ с использованием Visual С++ v.6.0 для Windows 32. Целями написания BОРР были: во-первых, использование данной программы для расчётов в качестве отдельного модуля с дружественным графическим интерфейсом пользователя ввиду отсутствия других программ с аналогичным набором возможностей, во-вторых, встраивание программного кода в программу помощи оператору.

В программу помощи оператору входят ещё два расчётных модуля: программа расчёта среднего магнитного поля изохронного циклотрона с учётом флаттера (Cyclotron Analytic Model Program – САМР) и программа для расчёта фазового движения (Phase Motion Research Program – РМРР). Кроме расчётных модулей, в программу помощи оператору входят также Structured Query Language (SQL) реляционные базы данных параметров контроля и управления работой изохронного циклотрона. Описание САМР даётся в предыдущей публикации (Р9–2002–170). Описание остальных программных модулей будет представлено в последующих публикациях.

Описание алгоритма расчёта частот радиальных и вертикальных бетатронных колебаний

В основе разработанного программного алгоритма лежит методика, описанная Т. Stambach [1]. Программный алгоритм представлен в виде блок – схемы на рис. 1.

1. Считывание исходных данных из выходного *.flt САМР файла и задание числа основных гармоник $i = 1 \div 6$ для их расчёта и представления. При $n = i \cdot N$ где N – число магнитных секторов.

2. Гармонический анализ введенной карты магнитного поля для расчёта коэффициентов Фурье:

$$G_n(r) \quad H_n(r)$$

$$B_n(r) = \sqrt{G_n^2(r) + H_n^2(r)} \quad \varphi_n(r) = \frac{1}{n} \cdot \arctg\left(\frac{G_n(r)}{H_n(r)}\right)$$

3. Расчёт тангенса угла спирали:

$$\operatorname{tg}\xi(r) = \frac{r}{N \cdot B_n^2(r)} \cdot \left(H_n(r) \cdot \frac{dG_n(r)}{dr} - G_n(r) \cdot \frac{dH_n(r)}{dr} \right)$$

4. Расчёт функций флатера и редуцированного флатера:

$$F(r) = \frac{\sum_{k=0}^{N_p-1} B_k^2(r, \theta_k)}{N_p \cdot B_0^2(r)} \quad F^*(r) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{n>0} B_n^2(r)}{B_0^2(r)}$$

где N_p – число точек азимута, а $B_0(r)$ – усреднённое по азимуту магнитное поле.

5. Расчёт индекса поля:

$$k(r) = r \cdot \frac{\sum_{k=0}^{N_p-1} \frac{dB_k(r, \theta_k)}{dr}}{\sum_{k=0}^{N_p-1} B_k(r, \theta_k)}$$

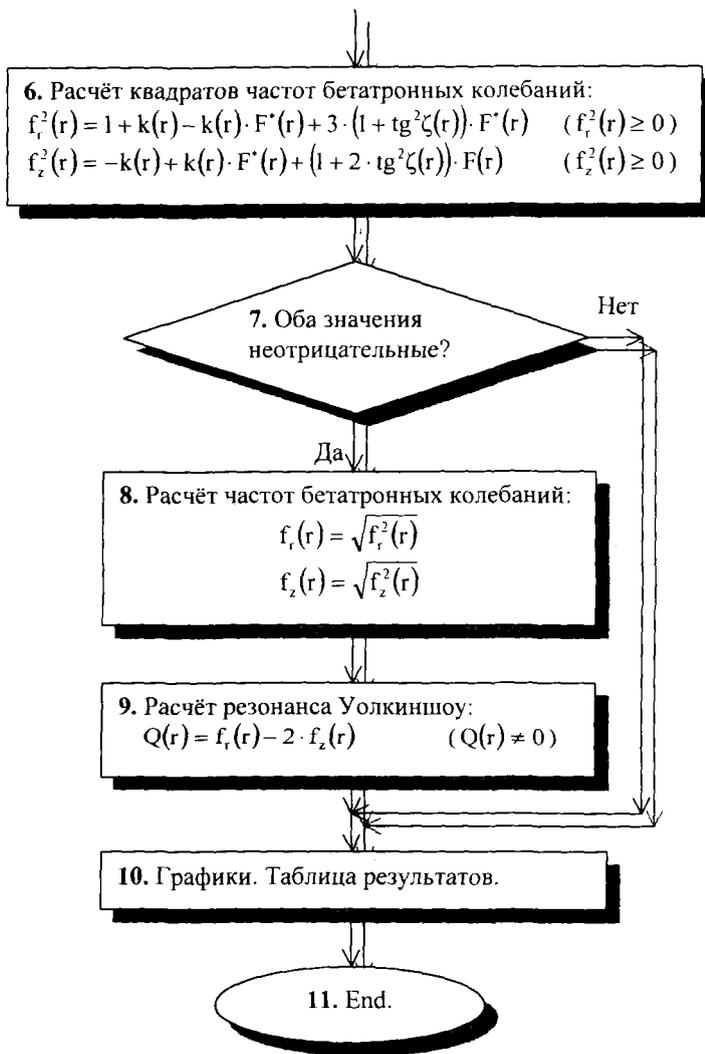


Рис. 1. Блок – схема программного алгоритма

Описание программного интерфейса

Программа расчёта частот бетатронных колебаний – $f_r(r)$ и $f_z(r)$ позволяет представить рассчитанные данные в виде графиков и в виде таблицы результатов. Данные могут быть выведены на печать, а также записаны в виде файлов в бинарном и текстовом форматах.

Далее приведён пример работы программы для AVF – Riken изохронного циклотрона для полученного пучка ионов $^{14}\text{N}^{5+}$ с конечной энергией 100 МэВ/нукл. Ввод исходных данных осуществляется через считывание выходного *.flt САМР файла и диалог ввода числа основных гармоник для их расчёта и представления, который показан на рис. 2. Задание числа основных гармоник осуществляется в пределах $i = 1 \div 6$. При $n = i \cdot N$ где N – число магнитных секторов.

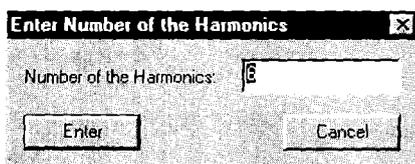


Рис. 2. Ввод числа основных гармоник для их расчёта и представления

Результаты расчётов, сделанные с помощью BORP, представляются в виде таблицы результатов. В этой таблице в зависимости от радиуса выводятся рассчитанные значения функций флаттера и редуцированного флаттера, тангенса угла спирали, индекса поля, квадратов частот радиальных и вертикальных бетатронных колебаний, частот радиальных и вертикальных бетатронных колебаний, а также рассчитанные значения функции резонанса Уолкиншоу и рассчитанные значения гармонических коэффициентов Фурье для первой гармоники и для основных гармоник.

Результаты расчётов для AVF – Riken изохронного циклотрона со спиральными секторами приведены в таблице на рис. 3.

Number	Radius (m)	F (unit)	FAs1 (unit)	TrgSA (unit)
1	+ 040000	+ 000006	+ 000000	- 029598
2	+ 060000	+ 000121	+ 000008	+ 009909
3	+ 080000	+ 000246	+ 000047	+ 021923
4	+ 100000	+ 002383	+ 000149	+ 037690
5	+ 120000	+ 005146	+ 000322	+ 059957
6	+ 140000	+ 008800	+ 000550	+ 077309
7	+ 160000	+ 013034	+ 000814	+ 093300
8	+ 180000	+ 017576	+ 001098	+ 121276
9	+ 200000	+ 022220	+ 001387	+ 143319
10	+ 220000	+ 028815	+ 001671	+ 163397
11	+ 240000	+ 031305	+ 001948	+ 183989
12	+ 260000	+ 035530	+ 002208	+ 205997
13	+ 280000	+ 039502	+ 002450	+ 228835
14	+ 300000	+ 043204	+ 002674	+ 247138
15	+ 320000	+ 046641	+ 002880	+ 268353
16	+ 340000	+ 049812	+ 003068	+ 290485
17	+ 360000	+ 052696	+ 003237	+ 309792
18	+ 380000	+ 055267	+ 003386	+ 330038
19	+ 400000	+ 057521	+ 003513	+ 352397
20	+ 420000	+ 059479	+ 003622	+ 372498
21	+ 440000	+ 061155	+ 003713	+ 395093
22	+ 460000	+ 062562	+ 003796	+ 418499
23	+ 480000	+ 063711	+ 003843	+ 442234
24	+ 500000	+ 064606	+ 003884	+ 466177
25	+ 520000	+ 065241	+ 003909	+ 483811
26	+ 540000	+ 065610	+ 003918	+ 516245
27	+ 560000	+ 065685	+ 003903	+ 542321
28	+ 580000	+ 065426	+ 003881	+ 572105

Рис. 3. Таблица результатов расчёта (AVF – Riken, пучок ионов $^{14}\text{N}^{5+}$ с конечной энергией 100 МэВ/нукл)

На рис. 4 показана функция флаттера. На рис. 5 показан график зависимости квадрата частоты радиальных бетатронных колебаний от радиуса для определения возможности расчёта действительных значений частоты $f_r(r)$ ($f_r^2(r) \geq 0$). На рис. 6 показан график зависимости квадрата частоты вертикальных бетатронных колебаний от радиуса для определения возможности расчёта действительных значений частоты $f_z(r)$ ($f_z^2(r) \geq 0$).

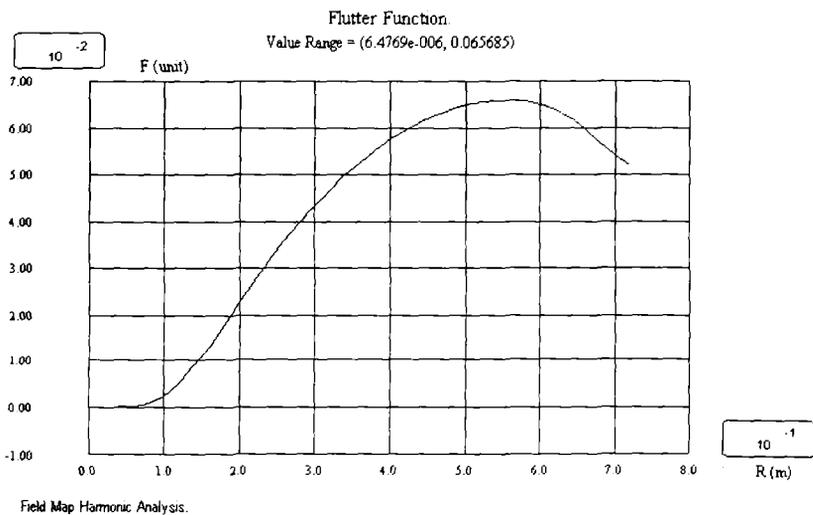


Рис. 4. Функция флаттера

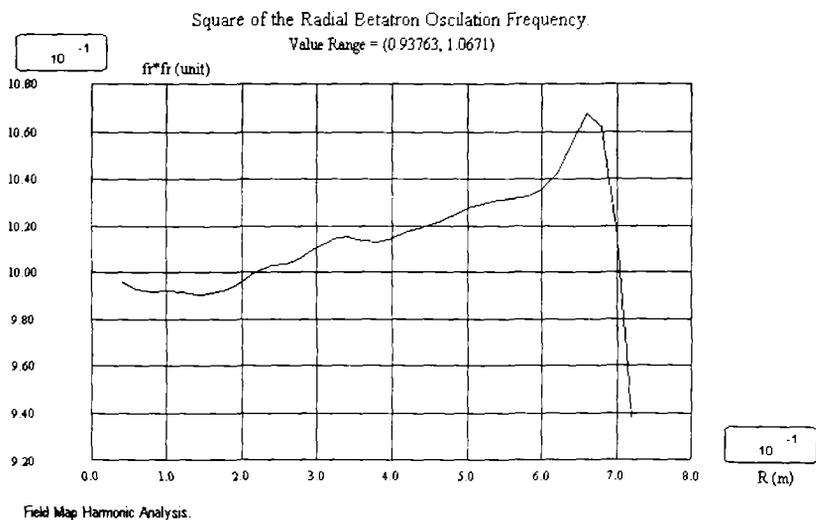


Рис. 5. Квадрат частоты радиальных бетатронных колебаний $f_r^2(r)$

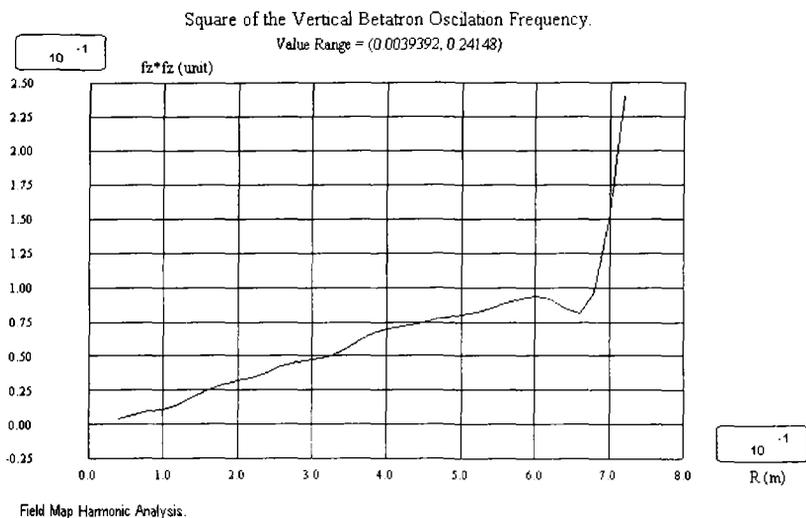


Рис. 6. Квадрат частоты вертикальных бетатронных колебаний $f_z^2(r)$

На рис. 7 показан график зависимости частоты радиальных бетатронных колебаний от радиуса – $f_r(r)$. На рис. 8 показан график зависимости частоты вертикальных бетатронных колебаний от радиуса – $f_z(r)$. На рис. 9 показана рабочая диаграмма частот свободных колебаний. На рис. 10 представлен график функции резонанса Уолкиншоу, где $Q(r) = f_r(r) - 2 \cdot f_z(r)$. Если $Q(r) \neq 0$, то резонанс Уолкиншоу отсутствует.

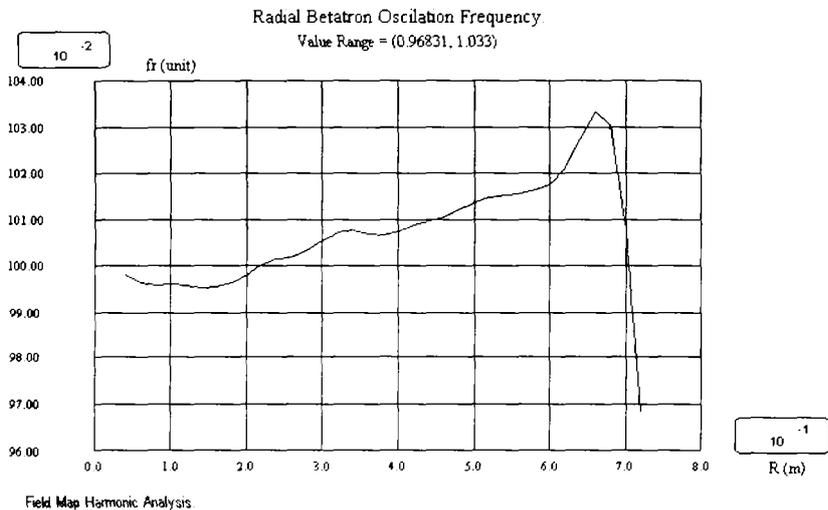


Рис. 7. Частота радиальных бетатронных колебаний $f_r(r)$

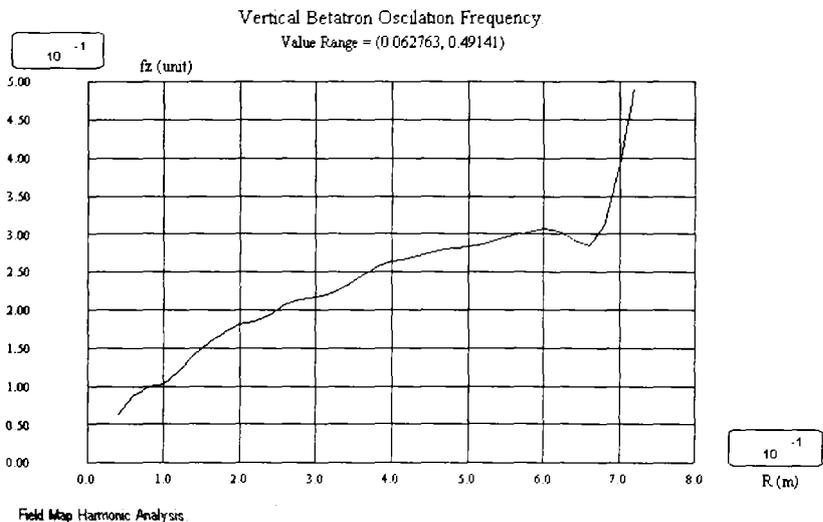


Рис. 8. Частота вертикальных бетатронных колебаний $f_z(r)$

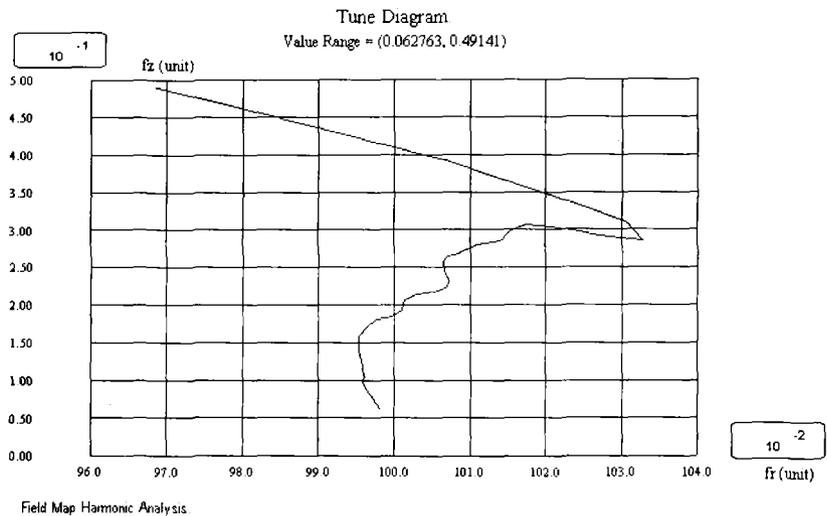


Рис. 9. Рабочая диаграмма частот свободных колебаний

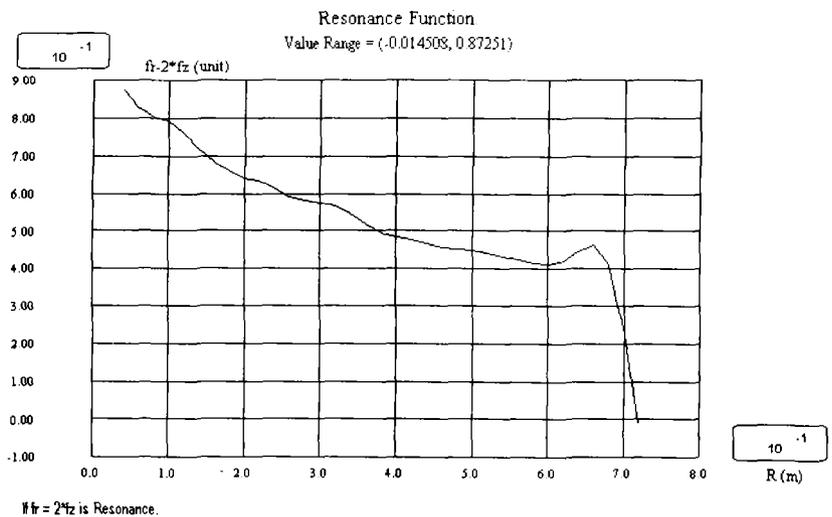


Рис. 10. График функции резонанса Уолкиншоу

Применение программы для различных циклотронных установок

В процессе настройки программы были выполнены расчёты для различных циклотронных установок: циклотрон со спиральными секторами AVF – Riken для полученного пучка ионов $^{14}\text{N}^{5+}$ с конечной энергией 100 МэВ/нукл, циклотрон с прямыми секторами SSC2 – Saen для полученного пучка ионов $^{36}\text{Ar}^{18+}$ с конечной энергией 95.5 МэВ/нукл, циклотрон со спиральными секторами AIC144 – Krakow для полученного пучка протонов с конечной энергией 60 МэВ/нукл. Результаты расчётов показаны на рис. 3, 11 и 12 соответственно.

Результаты расчётов для SSC2 – Saen изохронного циклотрона с прямыми секторами приведены в таблице на рис. 11.

Number	Radius (m)	F (unit)	FAsI (unit)	TrigSA (unit)
1	+1.000000	+705754	+036528	+0000000000000000
2	+1.020000	+705752	+036527	-0000000000000000
3	+1.040000	+705750	+036527	+0000000000000000
4	+1.060000	+705747	+036526	+0000000000000000
5	+1.080000	+705745	+036525	+0000000000000000
6	+1.100000	+705743	+036524	+0000000000000000
7	+1.120000	+705740	+036523	-0000000000000000
8	+1.140000	+705738	+036522	-0000000000000000
9	+1.160000	+705736	+036521	+0000000000000000
10	+1.180000	+705733	+036520	-0000000000000000
11	+1.200000	+705730	+036519	+0000000000000000
12	+1.220000	+705728	+036518	-0000000000000000
13	+1.240000	+705725	+036517	+0000000000000000
14	+1.260000	+705723	+036516	-0000000000000000
15	+1.280000	+705720	+036515	-0000000000000000
16	+1.300000	+705717	+036514	+0000000000000000
17	+1.320000	+705714	+036512	-0000000000000000
18	+1.340000	+705711	+036511	+0000000000000000
19	+1.360000	+705708	+036510	+0000000000000000
20	+1.380000	+705705	+036509	-0000000000000000
21	+1.400000	+705702	+036508	+0000000000000000
22	+1.420000	+705699	+036506	+0000000000000000
23	+1.440000	+705696	+036505	-0000000000000000
24	+1.460000	+705693	+036504	+0000000000000000
25	+1.480000	+705690	+036503	+0000000000000000
26	+1.500000	+705686	+036501	-0000000000000000
27	+1.520000	+705683	+036500	+0000000000000000
28	+1.540000	+705680	+036499	-0000000000000000

Рис. 11. Таблица результатов расчёта (SSC2 – Saen, пучок ионов $^{36}\text{Ar}^{18+}$ с конечной энергией 95.5 МэВ/нукл)

Результаты расчётов для АIC144 – Кракow изохронного циклотрона со спиральными секторами приведены в таблице на рис. 12.

Number	Radius (m)	F (unit)	FAs (unit)	TngSA (unit)
1	+ 020000	+ 000000	+ 00000000	-855410
2	+ 040000	+ 000016	+ 0000001	+ 203461
3	+ 060000	+ 000164	+ 0000010	+ 242183
4	+ 080000	+ 000646	+ 0000040	+ 314480
5	+ 100000	+ 001544	+ 0000096	+ 402996
6	+ 120000	+ 002776	+ 000173	+ 497098
7	+ 140000	+ 004164	+ 000260	+ 594728
8	+ 160000	+ 005526	+ 000345	+ 697954
9	+ 180000	+ 006765	+ 000422	+ 807733
10	+ 200000	+ 007835	+ 000489	+ 919167
11	+ 220000	+ 008806	+ 000549	+ 1.024656
12	+ 240000	+ 009711	+ 000606	+ 1.124726
13	+ 260000	+ 010559	+ 000659	+ 1.222447
14	+ 280000	+ 011339	+ 000707	+ 1.318083
15	+ 300000	+ 012047	+ 000751	+ 1.413851
16	+ 320000	+ 012679	+ 000791	+ 1.510443
17	+ 340000	+ 013242	+ 000826	+ 1.604804
18	+ 360000	+ 013741	+ 000857	+ 1.691809
19	+ 380000	+ 014145	+ 000882	+ 1.772613
20	+ 400000	+ 014389	+ 000897	+ 1.850971
21	+ 420000	+ 014386	+ 000896	+ 1.938847
22	+ 440000	+ 014107	+ 000879	+ 2.053502
23	+ 460000	+ 013653	+ 000851	+ 2.188502
24	+ 480000	+ 013236	+ 000825	+ 2.307049
25	+ 500000	+ 013022	+ 000812	+ 2.368203
26	+ 520000	+ 012971	+ 000803	+ 2.363696
27	+ 540000	+ 012839	+ 000799	+ 2.315725
28	+ 560000	+ 012253	+ 000760	+ 2.268390

Рис. 12. Таблица результатов расчёта (АIC144 – Кракow, пучок протонов с конечной энергией 60 МэВ/нукл)

Заключение

Результаты расчётов, выполненных с помощью BОРP, были проверены и подтверждены с использованием численных методов расчёта частот бетатронных колебаний – $f_1(r)$ и $f_2(r)$. Расхождение результатов расчётов, выполненных с помощью BОРP и с помощью численных методов, было в пределах от нуля до нескольких процентов, что доказало правильность расчётов, сделанных с помощью BОРP для различных циклотронов с вариацией магнитного поля.

С помощью BORP была достигнута необходимая для оценки резонанса Уолкиншоу точность расчёта частот бетатронных колебаний – $f_r(r)$, $f_z(r)$.

Данная программа написана для Windows 32 на языке C++, который является в настоящее время самым быстродействующим языком программирования в мире. BORP написана в стандарте Single Document Interface (SDI) с использованием Visual C++ v.6.0, что позволило организовать удобный графический интерфейс взаимодействия с пользователем, включающий в себя стандартную Help систему.

Данная программа может быть использована как для расчётов циклотронов с прямыми секторами, так и для расчётов циклотронов со спиральными секторами.

Авторы выражают глубокую признательность нач. Циклотронного Отдела Института Ядерной Физики в Кракове др-у Эдмунду Бакевичу за постоянное внимание к работе по созданию программного обеспечения для выбора эксплуатационных режимов работы изохронного циклотрона.

Мы также хотели бы поблагодарить проф. А.Гото за любезное разрешение использовать данные по магнитному полю AVF – Riken циклотрона, а также проф. И.Барона за любезное предоставление в наше распоряжение карты магнитного поля SSC2 – Saen циклотрона.

Литература

I. T. Stambach. Cyclotrons . Joint Universities Accelerator School, France, 1997 .

Получено 15 июля 2002 г.

Киян И. Н., Ворожцов С. Б., Тарашкевич Р.
Описание программы расчета частот бетатронных колебаний
(Betatron Oscillation Research Program — BORP)

P9-2002-171

В данной работе описывается Betatron Oscillation Research Program (BORP) — программа, написанная на C++ с использованием Visual C++. Данная программа предназначена для расчета частот бетатронных колебаний $f_r(r)$ и $f_z(r)$, значения которых используются при расчете и оценке наличия резонанса Уолкиншоу. Программный алгоритм разработан на основе лекционных заметок: Stambach T. Cyclotrons (Joint Universities Accelerator School, France, 1997). Результаты расчетов, выполненных с помощью BORP, были проверены и подтверждены с использованием численных методов расчета частот бетатронных колебаний $f_r(r)$ и $f_z(r)$. Расхождение результатов расчетов, выполненных с помощью BORP и с помощью численных методов, было в пределах от нуля до нескольких процентов, что доказало правильность расчетов, сделанных с помощью BORP для различных изохронных циклотронов с вариацией магнитного поля.

Из результатов расчетов видно, что данная программа может быть использована для расчетов как изохронных циклотронов с прямыми секторами, так и изохронных циклотронов со спиральными секторами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ и в Институте ядерной физики, Краков, Польша.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Kian I. N., Vorojtsov S. B., Tarashkevich R.
Betatron Oscillation Frequencies Calculation Program Description
(Betatron Oscillation Research Program — BORP)

P9-2002-171

The Betatron Oscillation Research Program (BORP) written in C++ with the use of Visual C++ is described. The program is intended for the calculation of betatron oscillation frequencies $f_r(r)$ and $f_z(r)$, whose values are used for the calculation of Walkinshaw resonance and evaluation of its presence. The program algorithm was developed on the basis of the lecture notes «Cyclotrons», composed by T. Stambach (Joint Universities Accelerator School, France, 1997). The results of calculation made by the BORP were checked and confirmed by using the numerical methods of calculation of betatron oscillation frequencies $f_r(r)$ and $f_z(r)$. The discrepancies between the BORP results and the numerical methods results are from zero to a few percent. It defines the accuracy of calculations made by BORP for the considered isochronous cyclotrons with the azimuthally varying fields.

As is evident from the results of calculations, the program can be used for calculations for both straight-sector and spiral-sector isochronous cyclotrons.

The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, and at the Institute of Nuclear Physics, Krakow, Poland.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 09.08.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,84. Тираж 280 экз. Заказ № 53467.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.