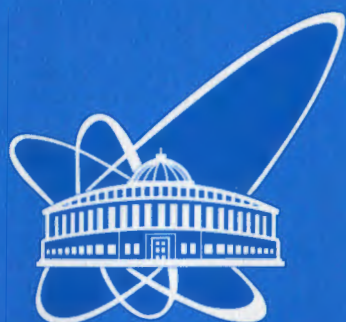


02-171



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

52 026

P9-2002-171

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

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

*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:

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

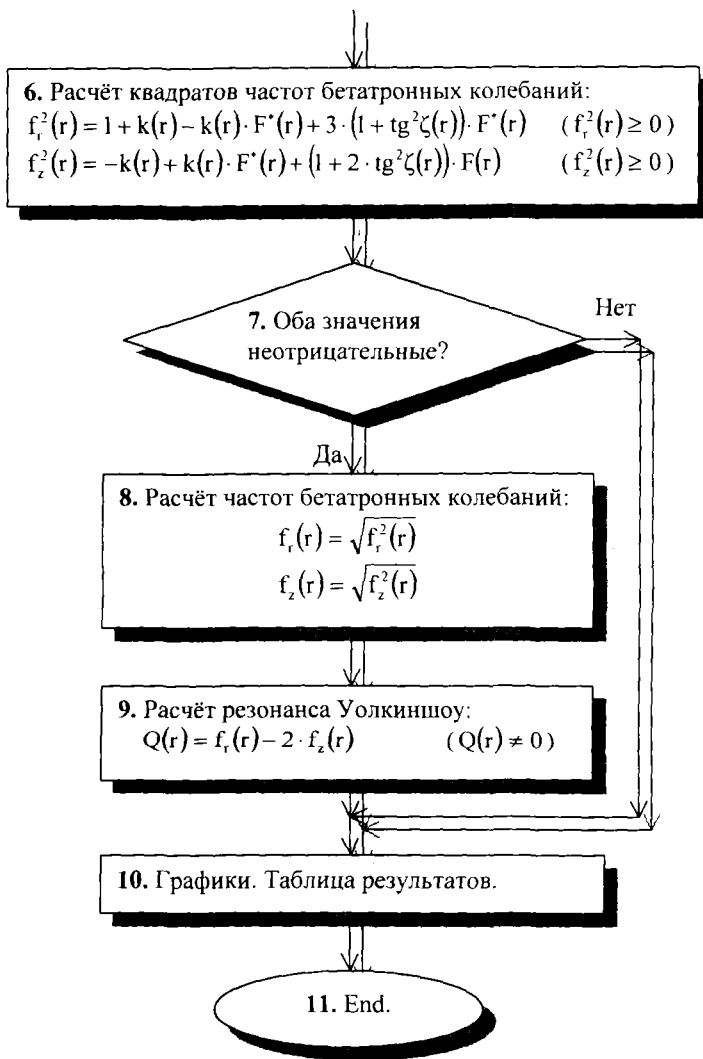


Рис. 1. Блок – схема программного алгоритма

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.

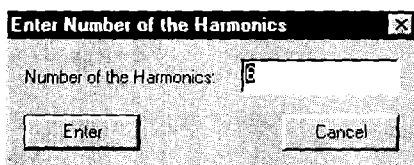


Рис. 2. Ввод числа основных гармоник для их расчёта и представления

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 | + 000746 | + 000047 | + 021923 |
| 4 | + 100000 | + 002383 | + 000149 | + 037690 |
| 5 | + 120000 | + 005146 | + 000322 | + 055957 |
| 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 | + 205937 |
| 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 $f_z(r)$ ($f_z^2(r) \geq 0$).

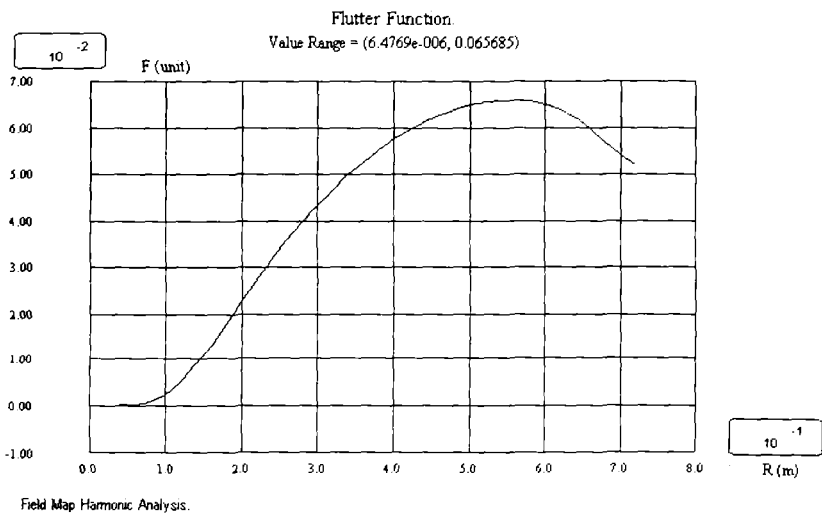


Рис. 4. Функция флаттера

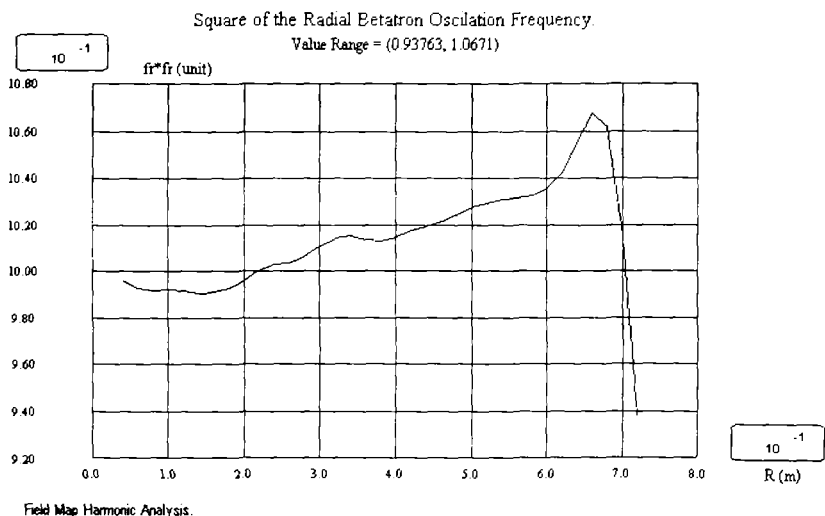


Рис. 5. Квадрат частоты радиальных бетатронных колебаний $f_r^2(r)$

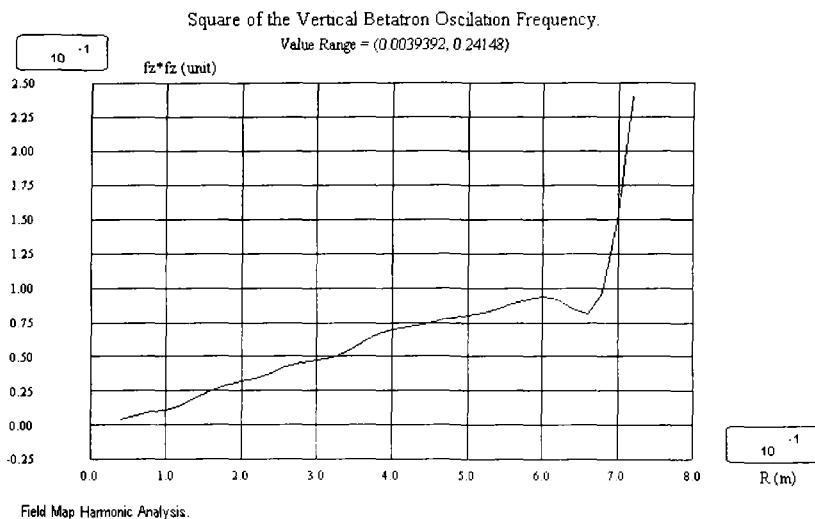


Рис. 6. Квадрат частоты вертикальных бетатронных колебаний $f_z^2(r)$

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.

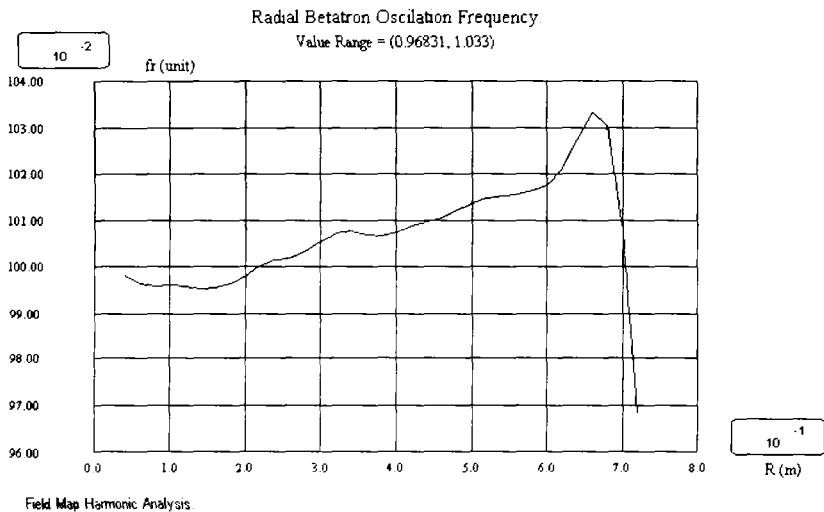


Рис. 7. Частота радиальных бетатронных колебаний $f_r(r)$

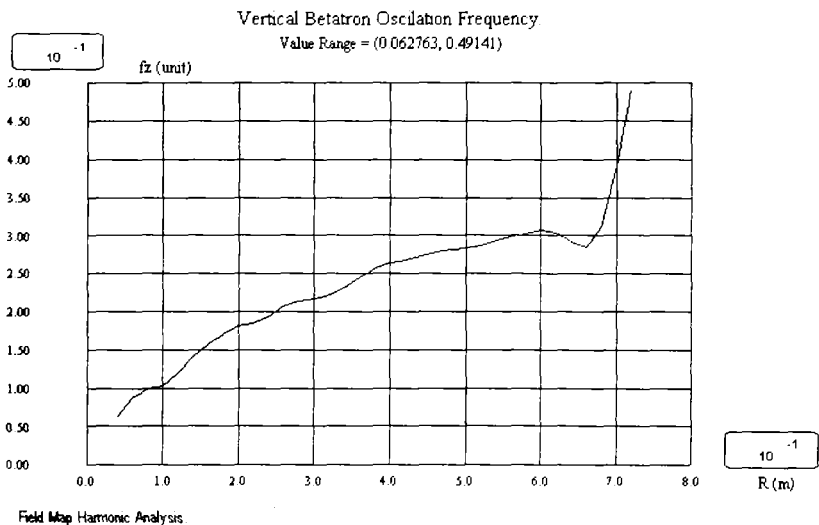


Рис. 8. Частота вертикальных бетатронных колебаний $f_z(r)$

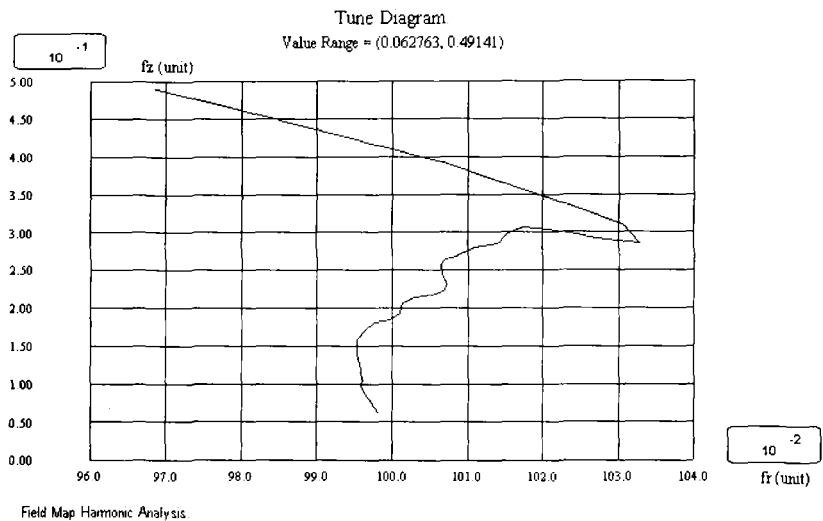


Рис. 9. Рабочая диаграмма частот свободных колебаний

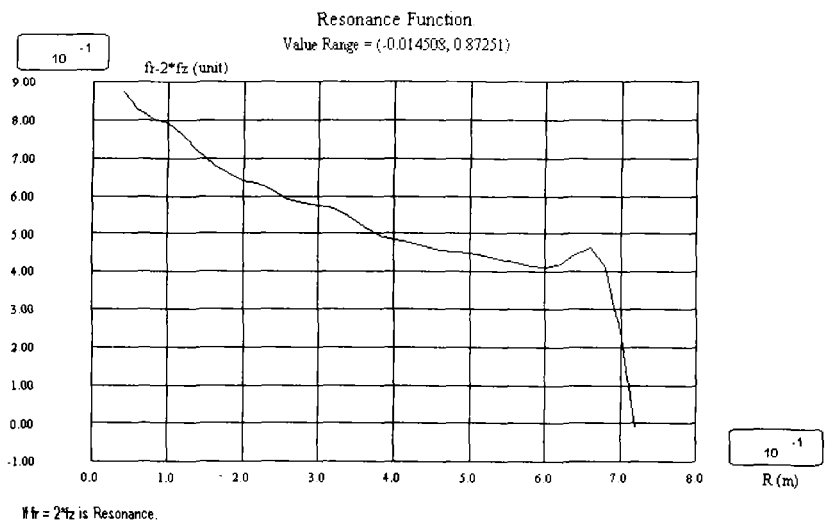


Рис. 10. График функции резонанса Уолкиншоу

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) | FAst (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 АИС144 – Краков 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 | + 000001 | + 203461 |
| 3 | + 060000 | + 000164 | + 000010 | + 242183 |
| 4 | + 080000 | + 000646 | + 000040 | + 314480 |
| 5 | + 100000 | + 001544 | + 000096 | + 402996 |
| 6 | + 120000 | + 002776 | + 000173 | + 497098 |
| 7 | + 140000 | + 004164 | + 000260 | + 594728 |
| 8 | + 160000 | + 005526 | + 000345 | + 697954 |
| 9 | + 180000 | + 006755 | + 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 (АИС144 – Краков, пучок протонов с конечной энергией 60 МэВ/нукл)

Заключение

Результаты расчётов, выполненных с помощью BОРР, 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 BОРР и с помощью численных методов, было в пределах от нуля до нескольких процентов, что доказало правильность расчётов, сделанных с помощью BОРР 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.