

3/ix-79

3471/2-79



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

C3450 + C345e
Ш-42

9 - 12346

И. А. Шелаяев, И. П. Юдин

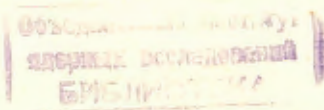
РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ
СОГЛАСОВАННОГО ПРОМЕЖУТКА СИНХРОТРОНА

1979

9 - 12346

И.А.Шелаев, И.П.Юдин

РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ
СОГЛАСОВАННОГО ПРОМЕЖУТКА СИНХРОТРОНА



Расчет допусков на параметры элементов согласованного промежутка синхротрона

Проведено численное исследование влияния разброса импульсов пучка, ошибок продольной юстировки линз и допусков на длины и градиенты квадрупольных линз согласованных промежутков синхротрона на величину максимума β -функции (β_{\max}) и частоту ν бетатронных колебаний. Изменения β_{\max} и ν связывались с величинами допусков на параметры ξ_i с помощью коэффициентов a_{ξ_i} . Последние вычислялись с помощью написанной ФОРТРАН-программы. Полученные результаты позволили оценить необходимый запас апертуры линз, который оказался равным $\sim 2,5\%$ от размеров невозмущенного пучка.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Calculation of Allowances for Element Parameters of a Matched Straight Insertion of the Synchrotron

The influence of perturbations in magnetic elements of a matched straight insertion is studied by means of numerical calculations. At given momentum spread of beam particles the influence of lenses longitudinal alignment errors and allowances for lengths and gradients of quadrupole lenses in matched insertion on maximum of β -function and betatron oscillations frequency is calculated. The changes of β_{\max} and ν are connected with quantities of allowances for parameters ξ_i by means of coefficients a_{ξ_i} . These coefficients are calculated by means of a written FORTRAN program. Obtained results allow one to estimate a necessary lenses aperture spare, which is equal to $\sim 2,5\%$ of imperturbative beam size.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. В данной работе исследуется влияние разброса импульсов частиц пучка Δp , ошибок продольной юстировки линз $\Delta l_{\text{юст.}}$ и допусков на длины $\Delta l_{\text{доп.}}$ и градиенты ΔG квадрупольных линз согласованных промежутков $^{5,6/}$ на величину максимума β -функции (β_{\max}) в согласованных промежутках (с.п.) и регулярной структуре, а также на частоту ν бетатронных колебаний.

Относительные изменения β_{\max} и ν связаны с разбросом импульсов Δp и ошибками $\Delta l_{\text{доп.}}$, $\Delta l_{\text{юст.}}$ и ΔG соотношениями

$$\frac{\Delta \bar{\beta}_{\max}}{\beta_{\max}} = \sum_i a_{\xi_i} \beta_{\xi_i} \frac{\Delta \bar{\xi}_i}{\xi_i} \quad (1)$$

и

$$\frac{\Delta \bar{\nu}}{\nu} = \sum_i a_{\xi_i}^{\nu} \frac{\Delta \bar{\xi}_i}{\xi_i}, \quad (1')$$

где безразмерный коэффициент

$$a_{\xi_i}^{\beta} = \frac{\xi_i}{\beta_{\max}} \cdot \frac{\partial \beta_{\max}}{\partial \xi_i} \quad (2)$$

(для $a_{\xi_i}^{\nu}$ - аналогично), ξ_i - величина одной из переменных: $\xi_i \equiv p$ - импульс, $\xi_i \equiv G_{F_i}$ - градиенты линзы F_i (см. рис. 1), $\xi_i \equiv l_{\text{доп.}} = l_{\text{эфф.}}$ - эффективная длина линзы F_i и $\xi_i \equiv l_{\text{юст.}}$ - юстировочная длина для центра линзы F_i . В работе принято $l_{\text{юст.}} = 150$ см; для линзы F_1 $l_{\text{доп.}} = l_{F_1} + l_{\phi}/2$. В (1) и (1') суммирование включает в себя одно слагаемое с $\xi_i \equiv p$ и три

суммы по отдельным видам ξ_i : G , $\ell_{\text{доп.}}$ и $\ell_{\text{юст.}}$. Последние суммируются по всем 12 линзам обоих с.п. Выражения (1) и (1') с учетом (2) получены из обычного разложения функций β_{max} и ν в ряд Тейлора. Сразу же отметим, что здесь не учтены по крайней мере вторые производные, т.е. корреляции между переменными ξ_i .

2. Для получения начальных данных β_{max} и ν , а также коэффициентов a_{ξ_i} была написана ФОРТРАН-программа расчета бетатронного движения в кольце сверхпроводящего синхротрона (СПС). Расчеты проводились для СПС-1 и СПС-2, заключенных в одном криостате один над другим. Прохождение пучков заряженных частиц через СПС-1 и СПС-2, их взаимное расположение и расположение линз в них показано на рис. 1. Каждый из СПС состоит из 24 ФОДО-регулярных периодов (р.п.) и

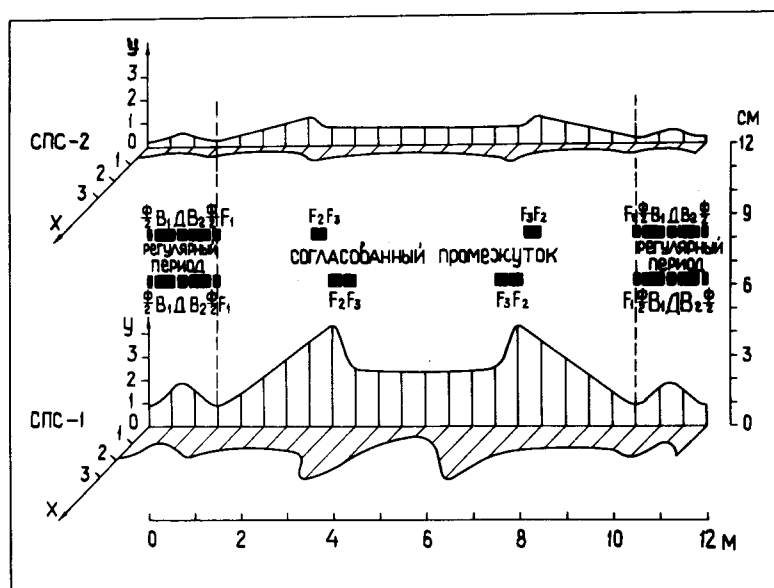


Рис.1. Структура СПС-1 и СПС-2 и размеры огибающих пучка.

двух 2π -п согласованных промежутков $\ell_{\text{в.}}$. Параметры ФОДО-структуры считались невозмущенными. Расчеты проводились для нескольких рабочих точек с равными $G_{\text{ф}}$ и $|G_{\text{д}}|$ и для двух точек с $G_{\text{ф}} \neq |G_{\text{д}}|$. Это позволило найти зависимость влияния ошибок $\Delta\xi_i$ по мере удаления от резонанса $\nu_x = 7,0$. На рис. 2 приведена диаграмма резонансов, на которой показаны выбранные рабочие точки III, IV, V с $G_{\text{ф}} = -G_{\text{д}} = 8,50; 8,65$ и $8,75$ кЭ/см, а также VIII и IX с $(G_{\text{ф}}, G_{\text{д}}) = (8,94; -8,70)$ и $(8,02; -7,88$ кЭ/см). Для сравнения одна точка ($G_{\text{ф}} = -G_{\text{д}} = 8,5$ кЭ/см) просчитывалась как с $L_{\text{с.п.}} = 9$ м, так

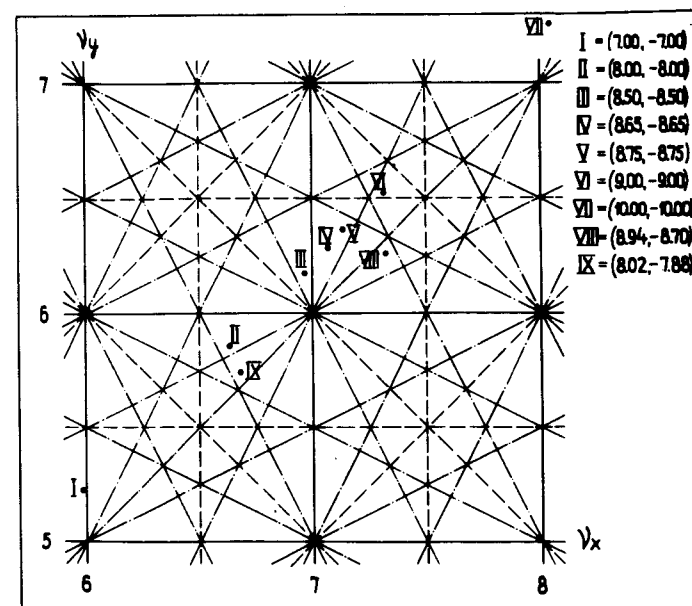


Рис.2. Диаграмма резонансов первого, второго и третьего порядка. В правом верхнем углу даны величины градиентов $(G_{\text{ф}}, G_{\text{д}})$ рабочих точек I-IX.

и с $L_{\text{с.п.}} = 7$ м. Выбор с.п. проводился методом, изложенным в предыдущей работе в. По сравнению с в.

уравнения согласования дополнялись условием $(\sum l_i)_{с.п.} = L_{с.п.}$ и условием равенства минимальных полей в линзах F_2 и F_3 : $\min \{H_{F_2} = H_{F_3}\}$. Эти условия выполнялись с точностью 10^{-10} .

3. В таблице 1 приведены параметры СПС-1 и СПС-2 для рабочей точки $(v_x, v_y) = (6,682687, 5,740981)$: $G_{\Phi} = 8,02$ кЭ/см, $G_D = -7,88$ кЭ/см, $L_{с.п.} = 9$ м.

Таблица 1

	СПС-1	СПС-2	
I. Периметр кольца (м)	54	54	
2. Магнитная жесткость пучка (Э·м)	75068.8096	75068.8096	
3. Начальный эмиттанс (мм·рад)	$0,14 \cdot \pi$	$0,14 \cdot \pi / 10,3$	
4. Структура регулярного периода	$\frac{\Phi}{2} 0 V_1 0 D 0 V_2 0 \frac{\Phi}{2}$	$\frac{\Phi}{2}$	
5. Число регулярных периодов	24	24	
6. Длина регулярного периода (м)	1.5	1.5	
7. Структура согласованного промежутка	$F_1 0_1 F_2 0_2 F_3 0_3 F_3 0_3 F_2 0_2 F_1$	F_1	
8. Число согласованных промежутков	2	2	
9. Длина согласованного промежутка (м)	9	9	
10. Эффективные длины (см):	Φ и D	15.3000	15.3000
	0	8.2700	8.2700
	V_1 и V_2	43.1600	43.1600
	F_1 и F_1'	4.1981	6.2146
	0_1 и $0_1'$	238.4283	198.2956
	F_2 и F_2'	27.2586	14.5365
	0_2 и $0_2'$	5.0004	6.0004
	F_3 и F_3'	25.1145	11.9532
	0_3 и $0_3'$	150.0001	212.9996
	II. Градиенты (кЭ/см):	Φ	8.0200
D		- 7.8800	- 7.8800
F_1 и F_1'		8.0200	8.0200
F_2 и F_2'		- 5.3303	- 11.9548
F_3 и F_3'		6.6273	15.3523
12. Поле в V_1 и V_2 (Э)		22751.3209	22751.3209

13. Радиус кривизны в V_1 и V_2 (см)	329.9536	329.9536	
14. Угол поворота в V_1 и V_2	7.5°	7.5°	
15. Угол входа в V_1 Угол выхода из V_1 Угол входа в V_2 Угол выхода из V_2	2.82082 $^\circ$	2.82082 $^\circ$	
	4.67918 $^\circ$	4.67918 $^\circ$	
	4.67918 $^\circ$	4.67918 $^\circ$	
	2.82082 $^\circ$	2.82082 $^\circ$	
16. Максимальная β - функция (см):			
	β_x, \max в р.п.	243.4240	243.4240
	β_y, \max в р.п.	240.7455	240.7455
	β_x, \max в с.п.	772.7268	521.3633
	β_y, \max в с.п.	1194.5281	1023.7279
17. Минимальная β - функция (см):			
	β_y, \min в середине линзы Φ	68.4587	68.4587
	β_x, \min в середине линзы D	69.5018	69.5018
18. Частота бетатронных колебаний в кольце:	v_x	6.682687	6.682687
	v_y	5.740981	5.740981
19. Набег фаз в с.п.:	μ_x	2π	2π
	μ_y	π	π

Для этого варианта СПС-1 и СПС-2 в таблицах приведены вычисленные по формуле (2) значения коэффициентов a_{ξ_i} . Для каждой линзы с.п. вычислялись a_{ξ_i} слева (" $-$ ") и a_{ξ_i} справа (" $+$ "). В таблицах 2-1 и 2-2 эти коэффициенты приведены для первых трех линз одного с.п. Для линз F_i' коэффициенты a_{ξ_i} те же, что для F_i , за исключением юстировочных a_{ξ_i} , которые из-за симметрии с.п. меняют знак на противоположный, сохраняя величину. Отметим, что a_{ξ_i} для линзы F_1 значительно меньше, чем для F_2 и F_3 . Это является отражением того факта, что именно линзы F_2 и F_3 нарушают регулярность в расстановке магнитных элементов кольца.

Для нахождения результирующих величин Δv_{\max} и Δv , считая, что возмущения независимы, т.е. ξ_i образуют ортогональный базис, из (1) находим

Таблица 2-1

Величины коэффициентов $a_{\xi_i}^{\beta}$ и $a_{\xi_i}^{\nu}$ для СПС-1

Вид	ξ_i	Знак $\Delta \xi_i$	$d_{x,р.п.}^{\beta}$	$d_{x,с.п.}^{\beta}$	$d_{y,р.п.}^{\beta}$	$d_{y,с.п.}^{\beta}$	d_x^{ν}	d_y^{ν}
Δp	-	-	9.24	-9.04	-6.65	0.61	-1.307	-1.516
	линза	+	8.54	-8.41	5.68	0.81	-1.299	-1.512
ΔG	F_1	+	1.66	1.23	0.43	0.35	0.036	-0.012
	F_2	+	-3.39	-3.38	-10.52	-8.91	-0.074	0.292
	F_3	-	3.41	1.82	10.43	10.54	-0.074	0.292
$\Delta l_{доп.}$	F_1	-	-1.62	-1.50	-0.45	-0.41	0.035	-0.013
	F_2	-	-3.76	-3.75	-9.66	-8.17	-0.082	0.268
	F_3	+	3.78	1.99	9.57	9.67	-0.082	0.268
$\Delta l_{юст.}$	F_1	-	-2.20	-2.00	-1.96	-1.80	0.019	0.008
	F_2	+	14.23	4.54	18.73	14.31	-0.302	-0.515
	F_3	+	12.47	12.08	19.34	19.83	0.261	0.542

$$\Delta \beta_{\max} = \beta_{\max} \cdot \left(\sum_i \left(a_{\xi_i}^{\beta} \cdot \frac{\Delta \xi_i}{\xi_i} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

(для $\Delta \nu$ - аналогично). В таблице 3 приведены значения величин $\Delta \beta_{\max}$ и $\Delta \nu$ при выбранных значениях относительных ошибок $\frac{\Delta \xi_i}{\xi_i}$ для отдельного вида переменной ξ_i : р, G, $l_{доп.}$ и $l_{юст.}$. В выражении (3) из двух коэффициентов $a_{\xi_i}^{\beta}$ слева и $a_{\xi_i}^{\nu}$ справа брался максимальный по абсолютной величине.

Таблица 2-2

Величина коэффициентов $a_{\xi_i}^{\beta}$ и $a_{\xi_i}^{\nu}$ для СПС-2

Вид	$\Delta \xi_i$	Знак $\Delta \xi_i$	$d_{x,р.п.}^{\beta}$	$d_{x,с.п.}^{\beta}$	$d_{y,р.п.}^{\beta}$	$d_{y,с.п.}^{\beta}$	d_x^{ν}	d_y^{ν}
Δp	-	-	2.01	-4.05	-3.25	-0.80	-1.177	-1.478
	линза	+	2.07	-3.91	2.97	0.87	-1.173	-1.475
ΔG	F_1	+	1.94	1.91	0.50	0.49	0.042	-0.014
	F_2	+	-2.97	-2.98	-11.13	-9.59	-0.065	0.309
	F_3	-	3.00	1.57	10.67	11.15	-0.065	0.309
$\Delta l_{доп.}$	F_1	-	-1.87	-1.09	-0.53	-0.52	0.041	-0.015
	F_2	+	1.87	1.84	0.51	0.50	0.041	-0.015
	F_3	+	-3.17	-3.18	-10.53	-9.07	-0.070	0.292
$\Delta l_{юст.}$	F_1	-	-2.39	-2.25	-2.30	-2.25	0.009	0.004
	F_2	+	2.39	1.67	2.31	2.20	0.009	0.004
	F_3	+	16.65	7.43	24.67	22.71	-0.351	-0.678

Таблица 3

Величины $\Delta \beta_{\max}$ и $\Delta \nu$ от отдельных возмущений и от их одновременного воздействия ($\langle \Sigma \rangle^{1/2}$)

	$\frac{\Delta p}{p} \pm 10^{-3}$	$\frac{\Delta G}{G} = \pm 10^{-3}$	$\frac{\Delta l_{доп.}}{l_{доп.}} \pm 10^{-3}$	$\frac{\Delta l_{юст.}}{l_{юст.}} \pm 10^{-3}$	$\langle \Sigma \rangle^{1/2}$
$\Delta \beta_{x,р.п.}$	СПС-1	2.25	4.64	4.36	9.28
	СПС-2	0.50	3.64	3.55	11.65
$\Delta \beta_{x,с.п.}$	СПС-1	6.99	14.68	13.79	29.01
	СПС-2	2.11	7.79	7.58	24.80
$\Delta \beta_{y,р.п.}$	СПС-1	1.60	5.69	5.46	13.19
	СПС-2	0.78	6.15	5.98	17.25
$\Delta \beta_{y,с.п.}$	СПС-1	0.97	28.24	27.11	65.13
	СПС-2	0.89	26.17	25.46	72.92
$\Delta \nu_x$	СПС-1	± 0.0087	± 0.0028	± 0.0026	± 0.0053
	СПС-2	± 0.0079	± 0.0022	± 0.0021	± 0.0067
$\Delta \nu_y$	СПС-1	± 0.0087	± 0.0038	± 0.0036	± 0.0086
	СПС-2	± 0.0085	± 0.0041	± 0.0040	± 0.0113

Для выявления сравнительной силы каждого вида переменной ξ_i в таблице 3 все ошибки $\frac{\Delta\xi_i}{\xi_i}$ выбраны одинаковыми и равными $\pm 10^{-3}$. Из таблицы 3 видно, что разброс $\Delta\rho$ увеличит апертуру линз в меньшей степени по сравнению с $\xi_i \equiv G, l_{\text{доп.}}$ или $l_{\text{юст.}}$, в то же время влияние разброса $\Delta\rho$ на частоту ν будет определяющим и с ним может "соперничать" лишь продольная юстировка линз. В таблице 3 приведен суммарный результат ошибок всех $\Delta\xi_i$. Этот же результат демонстрируется в таблице 4. Здесь показаны невоз-

Таблица 4

Значение β_{max} и рабочих частот ν без возмущения и при наличии суммарного ($\langle \Sigma \rangle^{1/2}$) возмущения

	$\beta_{x, \text{р.п.}}$ см	$\beta_{y, \text{с.п.}}$ см	$\beta_{y, \text{р.п.}}$ см	$\beta_{x, \text{с.п.}}$ см	ν_x	ν_y
СПС-1	без возмущения	243.42	772.73	240.75	II94.53	6.68269 5.74098
	с возмущением	254.90	808.73	256.20	II270.53	6.67179+ 5.72768+ 6.69359 5.75428
СПС-2	без возмущения	243.42	521.36	240.75	IO23.73	6.68269 5.74098
	с возмущением	256.14	548.52	260.03	II05.28	6.67189+ 5.72568+ 6.69349 5.75628

мушенные и после возмущения значения β_{max} и ν , т.е. их значения при $\Delta\xi_i = 0$ и $\frac{\Delta\xi_i}{\xi_i} = \pm 10^{-3}$. Эти результаты позволяют для заданного эмиттанса рассчитать апертуру линз. В таблице 5 приведены максимальные невозмущенные размеры пучка в р.п. и с.п. и с возмущением.

4. Как уже было отмечено выше, расчеты проводились для нескольких рабочих точек. В таблице 6 приведено сравнение этих вариантов; даются максимальные размеры пучка в регулярной структуре и в согласованных промежутках при отсутствии ошибок $\Delta\xi_i$, суммарное отклонение

Таблица 5

Максимальные размеры пучка без возмущения и при наличии возмущения

	$X_{\text{max, р.п.}}$ см	$Y_{\text{max, р.п.}}$ см	$X_{\text{max, с.п.}}$ см	$Y_{\text{max, с.п.}}$ см	
СПС-1	без возмущения	1.846	1.836	3.289	4.089
	с возмущением	1.889	1.883	3.365	4.218
СПС-2	без возмущения	0.575	0.572	0.842	1.180
	с возмущением	0.590	0.595	0.863	1.226

ΔX_{max} и ΔY_{max} в абсолютных единицах и процентах. Приводятся также ν_x и ν_y при $\Delta\xi_i = 0$, суммарная ошибка $\Delta\nu$ в абсолютных единицах и процентах. Отчетливо видно уменьшение относительной величины ΔX_{max} и $\frac{\Delta X_{\text{max}}}{\Delta Y_{\text{max}}}$ по мере удаления от резонанса $\nu_x = 7,0$. Если для наиболее близкой к нему точки III ($G_{\text{ф}} = -G_{\text{д}} = 8,50 \text{ кЭ/см}$) ΔX_{max} составляет $\sim 10\% X_{\text{max}}$, а $\frac{\Delta X_{\text{max}}}{\Delta Y_{\text{max}}} \sim 2,7$; то для наиболее удаленных от $\nu_x = 7,0$ точек VIII и IX эти величины составляют $\sim 2,4\%$ и $\sim 0,7$. Изменение $\Delta\nu$ для всех рабочих точек примерно одинаково и составляет для ν_x около $0,16\%$ и $0,23\%$ для ν_y .

При сравнении СПС с разными $L_{\text{с.п.}}$ (9 и 7 м) мы не находим между ними существенного различия для относительных изменений $\Delta X_{\text{max}}, \Delta Y_{\text{max}}, \Delta\nu_{x,y}$.

5. Отметим, что величина ошибок $\frac{\Delta\xi_i}{\xi_i} = \pm 10^{-3}$ выбрана заведомо большой, чтобы иметь оценки сверху. Мы предполагаем, что имеется возможность уменьшить $\Delta G, \Delta l_{\text{доп.}}$ и $\Delta l_{\text{юст.}}$ примерно в два раза.

Сравнение размеров пучка и их изменение при суммарном возмущении для ряда рабочих точек, показанных на рис. 2

	III (7%)			IV			V			VI		
	СИП-1	СИП-2	СИП-1	СИП-2	СИП-1	СИП-2	СИП-1	СИП-2	СИП-1	СИП-2	СИП-1	СИП-2
$Y_{max}, p.l. (cm)$	1.849	0.976	1.889	0.976	1.848	0.976	1.838	0.972	1.836	0.972	1.846	0.975
$\Delta X p.l. (cm)$	0.197	0.061	0.100	0.033	0.055	0.19	0.044	0.015	0.043	0.015	0.043	0.015
$\Delta Y p.l. (\%)$	10.7	10.6	5.4	5.7	3.0	3.1	2.4	2.6	2.3	2.6	2.3	2.6
$Y_{max}, p.l. (cm)$	1.824	0.968	1.825	0.969	1.826	0.969	1.838	0.973	1.836	0.973	1.836	0.972
$\Delta X p.l. (cm)$	0.082	0.068	0.026	0.023	0.078	0.029	0.064	0.023	0.047	0.023	0.047	0.023
$\Delta Y p.l. (\%)$	4.5	3.7	4.6	3.5	4.0	5.1	3.5	4.0	2.6	4.0	2.6	4.0
$Y_{max}, c.p.l. (cm)$	2.501	3.293	0.841	3.295	0.842	3.297	0.842	3.316	0.845	3.289	0.842	3.289
$\Delta X c.p.l. (cm)$	0.269	0.323	0.088	0.173	0.046	0.098	0.079	0.022	0.075	0.021	0.075	0.021
$\Delta Y c.p.l. (\%)$	10.8	9.8	10.5	5.3	5.5	3.0	3.1	2.4	2.5	2.3	2.5	2.5
$Y_{max}, c.p.l. (cm)$	3.484	4.248	1.206	4.290	1.214	4.319	1.220	4.298	1.215	4.089	1.180	4.089
$\Delta X c.p.l. (cm)$	0.155	0.157	0.054	0.150	0.051	0.184	0.062	0.148	0.050	0.129	0.046	0.129
$\Delta Y c.p.l. (\%)$	4.4	3.7	4.5	3.5	4.2	4.3	5.1	3.4	4.1	3.2	3.9	3.9
V_z	6.9652	6.9652	6.9652	7.0678	7.0678	7.1367	7.1367	7.3235	7.3235	6.6827	6.6827	6.6827
ΔV_z	± 0.0112	± 0.0115	± 0.0112	± 0.0115	± 0.0114	± 0.0116	± 0.0114	± 0.0118	± 0.0115	± 0.0109	± 0.0108	± 0.0108
ΔV_x	± 0.16	± 0.17	± 0.16	± 0.16	± 0.16	± 0.16	± 0.16	± 0.16	± 0.16	± 0.16	± 0.16	± 0.16
V_y	6.1832	6.1832	6.1832	6.2639	6.2639	6.3517	6.3517	6.2629	6.2629	6.7410	6.7410	6.7410
ΔV_y	± 0.0187	± 0.0144	± 0.0180	± 0.0147	± 0.0162	± 0.0148	± 0.0165	± 0.0148	± 0.0164	± 0.0133	± 0.0153	± 0.0153
ΔV_z	± 0.25	± 0.23	± 0.26	± 0.23	± 0.26	± 0.23	± 0.24	± 0.24	± 0.26	± 0.23	± 0.23	± 0.27

Проведенное численное исследование показывает, что наряду с известными методами фурье-гармоник ^{1,2,3/}, статистическим ^{2,3/} и методом Монте-Карло ^{7/} анализ ошибок можно проводить и более простым путем. Полученная информация о коэффициентах α_{ξ_i} позволяет очень просто исследовать влияние относительных ошибок $\frac{\Delta \xi_i}{\xi_i}$, что важно при выборе максимального допуска на параметры ξ_i . И, что также важно, эта информация позволяет сделать оценку вклада отдельного вида ошибок $\Delta \xi_i$.

В заключение авторы выражают благодарность В.С.Алфееву, С.Н.Андрианову, А.Д.Дымникову, В.И.Лобанову и Е.М.Матюшевскому за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Courant E., Snyder H. Ann.Phys., 1958, 3, p. 1.
2. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. Атомиздат, М., 1970.
3. Bovet C. et al. CERN/MPS-SI/Int. DL/70/4, 1970.
4. Wilson E.J. CERN, 77-07.
5. Meads P.F. Nucl.Instr. and Meth., 1971, 96, p.351
Meads P.F., Jr. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1973, 20, p.875.
6. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-11745, Дубна, 1978.
7. Koil E. CERN AR/Int. SG/65-3.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 марта 1979 года.