

17/21-05

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

6504/83

10-83-550

В.Н.Аносов, Ю.Н.Денисов, З.Хикманн*,
В.Ю.Линнеманн*, Г.Пич*

АЛГОРИТМ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРОННОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА

* ЦИЯИ, Россендорф, ГДР

1983

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе описывается алгоритм последовательной оптимизации процессов минимизации потерь частиц и управления током пучка при его прохождении тракта инжекции и при ускорении на электронной модели изохронного циклотрона ЛЯП ОИЯИ ^{1/2}. Процедура минимизации потерь и управления током пучка проводится путем регулирования и контрольных измерений пяти параметров циклотрона.

II. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Структурная схема системы оптимизации и управления электронного циклотрона показана на рис.1. Из схемы видно, что ЭВМ ЕС-1010 участвует в выработке управляющего сигнала W_i , который через регулятор R_i воздействует на управляющие параметры инжектора x_i .

Величины W_i, x_i связаны между собой линейной зависимостью

$$x_i = c_i W_i \quad /1/$$

и

$$W_i = W_{i0} + \sum \Delta W_{iE} = W_{i0} + W_{iE} \quad /2/$$

где c_i - коэффициент связи между W_i и x_i ; W_{i0} - заданная величина для соответствующего параметра инжектора, служащая для установки начального режима работы ускорителя; W_{iE} - суммарное управляющее воздействие от ЭВМ / $i = 1, 2, 3, 4, 5$ /.

В данной работе для оптимизации процессов минимизации и управления используется только пять параметров электронного циклотрона, перечисляемых ниже /остальные параметры остаются неизменными/:

для оптимизации

I_F - ток фокусирующей катушки / $i = 1$ /;

$U_{тр.}$ - напряжение электростатического тракта / $i = 2$ /;

$U_{пк}^-$ - отрицательное напряжение на поворотном конденсаторе / $i = 3$ /;

$U_{пк}^+$ - положительное напряжение на поворотном конденсаторе / $i = 4$ /;

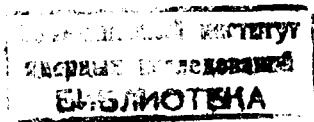


Рис. 1. Структурная схема системы оптимизации и управления током пучка электронного циклотрона.

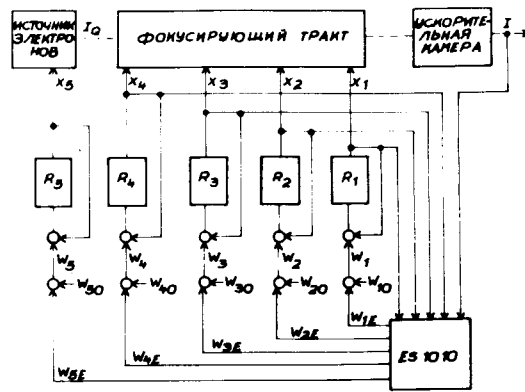
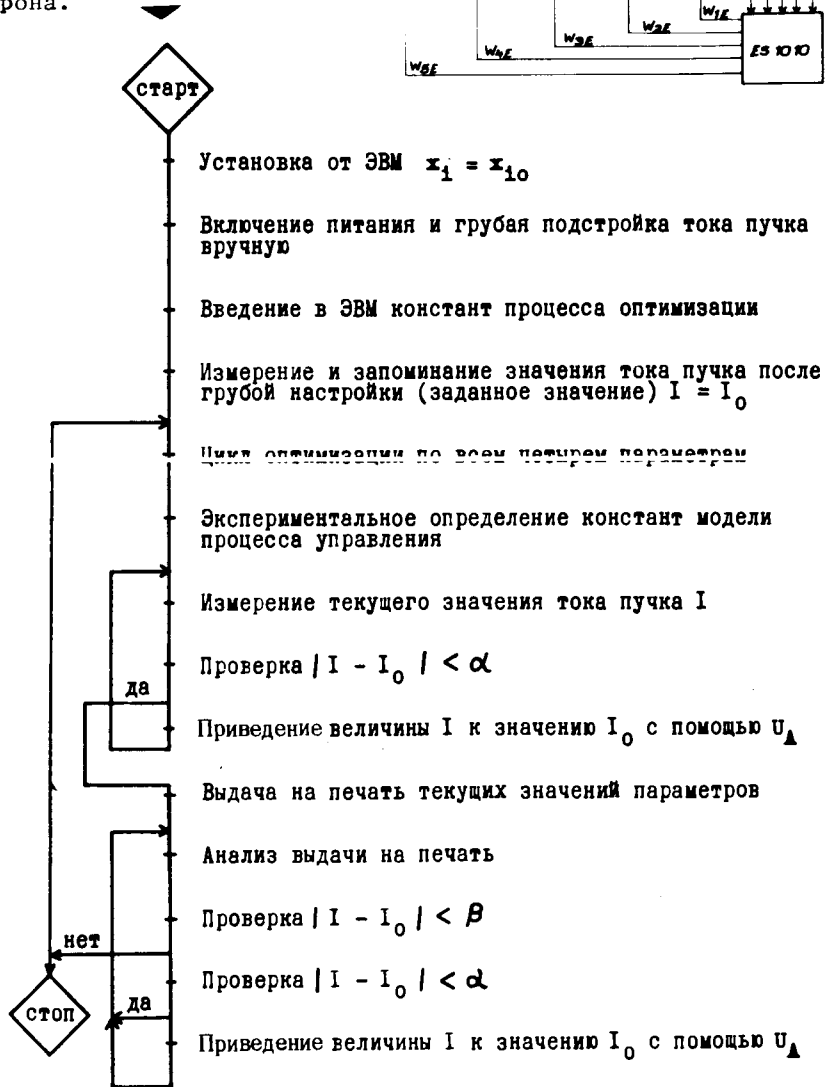


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оптимизации и управления током пучка электронного циклотрона.



для управления

U_A - напряжение на аноде источника / $i = 5$ /.

Переменные $I_F, U_{TP}, U_{ПК}^-, U_{ПК}^+$ не зависят друг от друга.

III. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Схема алгоритма изображена на рис.2; α и β - пороговые константы, задаваемые оператором.

Из схемы на рис.2 можно видеть течение процесса стабилизации тока пучка на величине I_0 при его колебаниях во времени. Порядок следования различных шагов процесса стабилизации тока пучка может видоизменяться при использовании алгоритма для других установок.

Поясним работу алгоритма подробнее. После пуска программы ко всем регулируемым параметрам добавляются величины, равные половине диапазона их изменения /точность установки добавки $1/256$ от величины диапазона/.

Затем включаются источники питания всех узлов ускорителя и оператор грубо настраивает ток пучка на радиусе $R = 75$ см на требуемую величину I_0 . Грубую настройку тока пучка на величину I_0 может выполнить и ЭВМ, устанавливая значения параметров по известному списку. Для оптимизации тока пучка на радиусе $R=75$ см используется метод поочередного перебора четырех параметров инжектора /метод Гаусса-Зейделя/³. Изменение тока пучка в зависимости от каждого из 4 параметров за цикл оптимизации показано на рис.3.

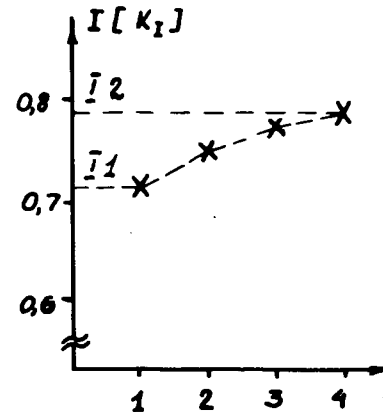


Рис.3. Изменение тока пучка в зависимости от каждого из 4 параметров за один цикл оптимизации.

Время, необходимое для оптимизации по одному из четырех параметров, зависит от постоянной времени цепи регулирования данного параметра и от точности грубой настройки тока пучка.

Цикл оптимизации по четырем параметрам должен повторяться до выполнения условия: $|I_2 - I_1| \leq \epsilon$, где I_1, I_2 обозначены на рис.3; ϵ - пороговая константа, задаваемая оператором.

Для оптимизации по одному из параметров использовались два метода:

1. Движение к оптимуму с постоянным шагом ^{/2/}. Движение к оптимуму из начальной точки происходит с постоянным шагом ΔW_{iE} /формула 7/. Направление движения к оптимуму определяется с помощью пробного шага.

После перехода максимума шаг уменьшается до величины $\frac{\Delta W_{iE}}{4}$,

и дальше шаги идут в обратном направлении, проходя диапазон $2\Delta W_{iE}$. За максимум принимается наибольшее значение тока пучка,

измеренное при прохождении указанного выше диапазона с шагом

$\frac{\Delta W_{iE}}{4}$. Сканирование промежутка $2\Delta W_{iE}$ может прекращаться, если отношение $|\Delta I_s / \frac{\Delta W_{iE}}{4}| < \delta$, где ΔI_s - приращение тока на шаге $\frac{\Delta W_{iE}}{4}$,

δ - пороговая константа процесса.

2. Второй метод представляет собой комбинацию градиентного метода и метода "золотого сечения" ^{/4/}. При этом движение к оптимуму идет вначале с шагом

$$\Delta W_{iE_n} = \left(\frac{A_1}{n}\right) \cdot \left(\frac{\Delta I_{n-1}}{\Delta W_{iE_{n-1}}}\right), \quad /3/$$

где $1 \leq n \leq N$; A_1 - константа процесса, подбираемая экспериментально; n - номер шага.

Направление движения к оптимуму из начальной точки определяется с помощью пробного шага /как и в первом методе оптимизации/.

После перехода максимума /что определяется по изменению знака градиента/ уточнение положения максимума ведется методом "золотого сечения", сущность которого сводится к следующему. В интервале $(\Delta W_{iE_{N-1}} + \Delta W_{iE_N})$, в котором находится оптимум, определяем, на каком краю /левом или правом/ меньше функция качества, и с этого края откладываем отрезок, равный 0,375 от величины интервала. Эта точка считается новым краем интервала, и в ней вычисляется функция качества. После чего вновь определяется, на каком краю функция качества меньше, и с этого края вновь откладывается отрезок, равный 0,375 от величины нового интервала, и т.д.

Процесс поиска оптимума заканчивается, если $|I_2 - I_1| < \epsilon$, где I_1, I_2 - величины функции качества /тока пучка/ на краях последнего интервала, ϵ - пороговая константа процесса.

Далее определяются константы для статической функции, моделирующей управление величиной тока пучка с помощью напряжения на аноде источника $U_A: I = A_0 + A_1 \cdot U_A$, где A_0, A_1 - константы, определяемые по методу наименьших квадратов. Для их нахождения брались экспериментально измеренные точки функции $I = f(U_A)$, по две точки вправо и влево относительно рабочей точки /в которой начинается управление током пучка после оптимизации/.

После отыскания констант A_0, A_1 от ЭВМ задается воздействие на U_A такой величины, чтобы разность $(I - I_0)$ стала меньше α . Следует отметить, что управление током пучка с помощью U_A используется только при отклонениях $\alpha < |I - I_0| < \beta$. Если же $|I - I_0| > \beta$, то вновь запускается алгоритм оптимизации с целью получения соотношения $|I - I_0| < \beta$. В случае невозможности выполнить такое условие ЭВМ выдает сообщение оператору о том, что необходимо проверить параметры, не участвующие в оптимизации и управлении от ЭВМ, на соответствие их значений начальным установкам.

Стабилизация тока пучка с помощью ЭВМ, работающей по замкнутому циклу регулирования, оставляет оператору в основном функции контроля и, при необходимости, вмешательства. Выдача информации о параметрах ускорителя на дисплей в процессе работы ЭВМ происходит непрерывно. Если же выдача прекращается, то это означает, что ЭВМ просит вмешательства оператора, сообщив ему последнюю информацию, во время передачи которой управление перешло к оператору. Кроме этого, на АЦПУ печатается список параметров со значениями, соответствующими последнему циклу оптимизации.

IV. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММ

Алгоритм, описанный выше, реализован на языке ассемблера ЭВМ ЕС-1010. Система программ ^{/5/} включает в себя: главную программу НРTIME, подпрограммы для нее, стандартные библиотечные программы и секции супервизора ЭВМ ЕС-1010. Объем памяти, занимаемый пакетом программ, ~ 6 Кбайт. Пакет работает под управлением монитора RTDMTE.

18 подпрограмм, управляемых программой НРTIME, можно компоновать в самостоятельные модули, с помощью которых проводятся различные вспомогательные работы по определению констант для алгоритма оптимизации процессов минимизации и управления и т.п.

V. КОНСТАНТЫ ПРОЦЕССОВ МИНИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Для успешной работы алгоритма необходимо правильно выбрать константы процесса и учесть постоянные времени отдельных регулирующих устройств. Методика выбора констант и методика учета постоянных описана ниже, в п.5.1. На рис.4 показан наиболее типичный вид функции процесса. Параметры x_i имеют на рис.4 размерность либо в физических единицах k_i , либо в элементарных шагах s_i , а интенсивность пучка - также в единицах K_1, K_i и K_1 -содержат в себе масштабные коэффициенты и имеют соответствующую физическую размерность.

V.I. Определения

W_i - ширина функции процесса оптимизации по i -му параметру на уровне 10% отклонения от ее максимума /рис.4/,

$$B_i = x_{i2} - x_{i1}, \quad /4/$$

V_i - ширина области изменения i -го параметра относительно начальной точки /в которой оставил систему оператор после грубой настройки/. Величина V_i должна быть расположена симметрично относительно начальной точки и равна $\sim 2B_i$, т.е.

$$V_i = (x_{iE_{MAX}} - x_{i0}) + (x_{i0} - x_{iE_{MIN}}) \approx 2B_i, \quad /5/$$

величина V_i задается от ЭВМ с помощью ЦАП, имеющих $256 /2^8/$ элементарных шагов на весь диапазон V_i , что удобно в плане работы с кодами такой длины. Из /5/ можно получить:

$$s_i = \frac{V_i}{256} = \frac{(x_{iE_{MAX}} - x_{iE_{MIN}})}{256} \quad /6/$$

шаг, выбираемый ЭВМ:

$$\Delta W_{iE} = m_i s_i, \quad /7/$$

где m_i - число элементарных шагов. Поскольку, как правило, $V_i \neq B_i$ и V_i сдвинута относительно B_i /рис.4/, для экспериментального нахождения ΔW_{iE} можно использовать выражение

$$\gamma = \frac{\Delta W_{iE}}{B_i} \quad /8/$$

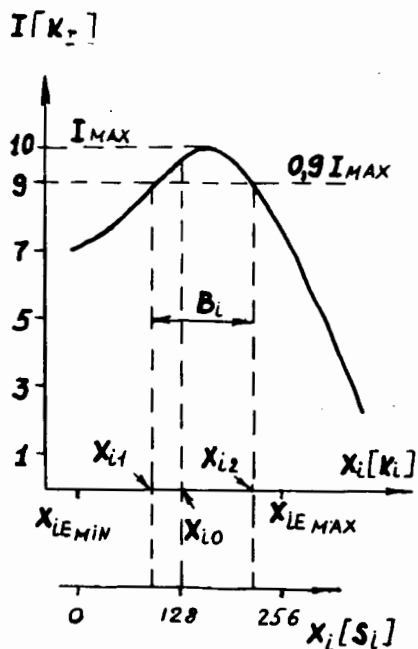
Величина γ оценивается для каждого параметра по виду функций процесса и также в зависимости от того, какая операция выполняется в данный момент /тестовый шаг либо оптимизация/.

Из /6/, /7/, /8/ можно найти число элементарных шагов в шаге ЭВМ ΔW_{iE} :

$$m_i = \frac{\Delta W_{iE}}{s_i} = \frac{\gamma B_i}{V_i / 256} \quad /9/$$

Найденную величину " m_i " округляем до целого числа.

Рис.4. Общий вид зависимости оптимизируемой величины от одного из регулируемых параметров.



Величина " A_i " для градиентного метода оптимизации может быть найдена из выражений /3/ и /8/:

$$A_i = \frac{\gamma \cdot B_i}{\Delta I_0 / \Delta W_{iE0}}, \quad /10/$$

где ΔI_0 и ΔW_{iE0} - соответственно отклонение тока пучка от заданного значения I_0 и шаг ЭВМ для первого шага оптимизации / $n = 1$ /.

Учет временных констант цепей регулирования τ_i отдельных параметров ускорителя производится введением задержки Δt_i между моментом установки нового шага и моментом измерения полученного значения параметра, причем $\Delta t_i \geq 3\tau_i$. Если $\Delta t_i < 3\tau_i$, то процесс настройки на оптимум становится неустойчивым, при $\Delta t_i \gg 3\tau_i$ происходит неоправданное увеличение времени для отыскания оптимума.

В.2. ПРИМЕР

В таблице приведены величины, часть которых измерена и часть вычислена по формулам, номера которых проставлены в первой колонке. Величины x_{i1} , x_{i2} , $x_{iE_{MAX}}$, $x_{iE_{MIN}}$, $\Delta I_0 / \Delta W_{iE0}$ берутся из графика функции процесса; τ_i определяется стандартным способом /измерение реакции на ступенчатую входную функцию/.

Для пробного шага в обоих методах оптимизации брались $\gamma = 0,15$. Опытным путем установлен наиболее эффективный диапазон, в котором должна находиться величина γ : $0,1 \leq \gamma \leq 1,0$. Для пробного шага в обоих случаях оптимизации использовалось значение $\gamma = 0,15$, для первого метода оптимизации брали $\gamma = 0,3$, для второго /градиентного/ метода оптимизации - $\gamma = 1,0$. Большая величина γ во втором методе объясняется наличием в формуле /3/ члена (A_i/n) , который резко убывает с ростом числа шагов.

Следует отметить, что найденные значения γ уточняются в процессе длительной работы системы оптимизации.

Таблица

		x_i	1	2	3	4	5
	x_{i2}	[K _i]	3684	5351	7137	5388	
	x_{i1}	[K _i]	3430	5156	6888	5004	
(4)	B_i	[K _i]	234	195	248	395	
	Δt_i	[Sec]	1,20	1,35	50,00	5,50	0,33
	$x_{iE_{MAX}}$	[K _i]	4007	5590	7880	6043	
	$x_{iE_{MIN}}$	[K _i]	3117	5032	5888	4563	
(5)	V_i	[K _i]	890	562	1992	1480	
(6)	s_i	[K _i]	3,477	2,185	7,781	5,781	
(8)	γ	[]	0,3	0,3	0,8	0,8	
(9)	m_i	[]	20	24	12	20	
(8)	γ	[]	1,0	1,0	1,0	1,0	
	$\Delta I_0 / \Delta W_{iE0}$	[K _i /K _i]	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$2,80 \cdot 10^{-3}$	
(10)	A_i	[K _i /K _i]	$1,85 \cdot 10^3$	$3,31 \cdot 10^3$	$1,50 \cdot 10^3$	$4,96 \cdot 10^3$	

Пороговые константы α , β , ϵ , δ выбирались с учетом величины быстрых колебаний тока пучка во времени, причем константа α была равна половине величины такого коридора около среднего значения тока пучка, за который выходило лишь 5% всех измеренных значений интенсивности. Величина β , как указывалось выше, берется несколько большей α , а величина ϵ - равной β .

VI. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА

- В процессе работы с системой оптимальной настройки пучка было установлено, что оптимум отыскивается за число циклов оптимизации /1 цикл - перебор 4 параметров/ не более трех.

- Величина оптимума, находимая с помощью ЭВМ, была на 5-15% выше величины оптимума, находимой оператором при ручной настройке.

- Модульная структура программы позволяет использовать ее в различных вариантах для решения отдельных задач.

- Оба выбранных метода оптимизации достаточно надежно работали, причем время поиска оптимума при использовании первого метода было несколько меньше, чем при использовании второго метода.

В заключение авторы благодарят проф. В.П.Дмитриевского за поддержку работы, М.Ф.Шабашова, В.А.Саенко за помощь при работе на циклотроне, А.А.Глазова и Д.Л.Новикова за полезные обсуждения в процессе выполнения данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аносов В.Н. и др. ОИЯИ, Р9-3787, Дубна, 1968.
2. Аносов В.Н. и др. ОИЯИ, Р9-80-624, Дубна, 1980.
3. Расстригин Л.А. Статистические методы поиска, изд. "Наука", М., 1968, с. 42.
4. Hartmann K. et al. Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der stoffwirtschaft, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1974, s. 317.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 августа 1983 года.

Аносов В.Н. и др.

10-83-550

Алгоритм для оптимизации режимов работы электронного изохронного циклотрона

Описывается алгоритм оптимизации процессов минимизации потерь частиц и управления током пучка в момент прохождения тракта инжекции и при ускорении на электронной модели изохронного циклотрона. Процедура минимизации потерь и управления током пучка осуществлялась путем регулирования и контрольных измерений пяти параметров инжектора циклотрона. Величина оптимума, находимая с помощью ЭВМ, была на 5-15% выше величины оптимума, находимой оператором при ручной настройке. В процессе работы с системой было установлено, что оптимум отыскивается за число циклов оптимизации не более трех /один цикл - перебор четырех параметров/. Модульная структура программы позволяет использовать ее в различных вариантах для решения отдельных задач оптимизации.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Anosov V.N. et al.

10-83-550

The Algorithm of Optimization of Electron Isochronous Cyclotron Operation Regimes

The algorithm of optimization and its application to minimization of the beam losses and control of the beam current in the injection line and during the acceleration process on the electron model of the isochronous cyclotron are described. The minimization and control by the beam current is realized by means of setting and measuring of five parameters of the cyclotron injector. The minimum computerized value of the beam losses turned out to be by 5-15% lower than with manual tuning. During the operation with the optimization system it was established that the value of the beam losses is determined at the minimum of optimisation cycles not more than three (one cycle is reassembly of four parameters). The module structure of the optimization program permits its application with other variants for solving specific problems of optimization.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой