

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Ц840а
А-695

3/III-75

9 - 8422

847/2-75
В.Н.Аносов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
АЛГОРИТМОВ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ФАЗЫ
В ИЗОХРОННЫХ ЦИКЛОТРОНАХ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.Н.Аносов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
АЛГОРИТМОВ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ФАЗЫ
В ИЗОХРОННЫХ ЦИКЛОТРОНАХ**

§1. Введение

Активное внедрение вычислительных машин в технику управления ускорителями заряженных частиц происходит в трех основных направлениях.

Идеология первого направления заключается в том, что компьютер берет на себя функции сбора и хранения информации, поступающей с датчиков, регистрирующих параметры ускорителя. При таком способе использования ЭВМ оператор имеет возможность в любой момент времени получать сведения о текущем значении любого из контролируемых параметров. Периодическая регистрация параметров в накопителях большой емкости /НМЛ, НМД/ позволяет восстанавливать картину их поведения на интересующем оператора отрезке времени, а также существенно облегчает поиск неисправности в случае аварийной ситуации.

Система управления ускорителем, выполненная по такому принципу, дешевле, эффективнее в работе и надежнее в эксплуатации, чем пультные системы управления с использованием мнемосхем и большого числа стрелочных приборов, кнопок, переключателей и т.д. /1/.

Второй вариант системы управления с использованием ЭВМ, выполняя описанные выше функции, позволяет, кроме того, регулировать некоторые параметры ускорителя по замкнутой схеме с обратной связью.

Интенсивная разработка и макетирование систем управления такого типа осуществляются на Эйнховенском изохронном циклотроне, где достигнуты первые обнадеживающие результаты /2/.

Наконец, третий тип системы управления подразумевает передачу компьютеру всех функций по обеспечению нормальной работы ускорителя в некотором заданном режиме. Роль оператора сводится к заданию требуемого режима и участию в устранении аварийных ситуаций.

Такой способ организации системы управления предполагает наличие самонастройки на заданный режим с оптимизацией основных параметров заданного режима.

Решение задачи оптимизации многопараметрических систем сводится, как правило, к поиску минимума функционала, называемого функцией качества управляемой системы ^{/3/}.

Минимизация функции качества многопараметрической системы может производиться различными методами, которые подразделяются на 2 класса:

а/ регулярные методы;

б/ методы, базирующиеся на случайном поиске.

Проведем сравнение этих методов в аспекте их использования для поиска минимума функции качества с помощью малых управляющих ЭВМ. Такие регулярные методы, как метод сканирования, заключающийся в разбеге области параметров на малые дискретные участки и последовательном переборе всех сочетаний многих параметров, так же, как и метод поочередного изменения параметров, при котором параметры изменяются один за другим в сторону уменьшения величины функции качества, не могут быть реализованы на малых ЭВМ из-за большой затраты времени на поиск минимума функционала. Методы градиента и скорейшего спуска, также относящиеся к регулярным методам поиска, в случае нелинейной зависимости функции качества от параметров ускорителя, могут использоваться лишь в сильно усложненных вариантах ^{/2,4/}, реализация которых на малых ЭВМ, имеющих, как правило, небольшую оперативную память и относительно невысокое быстродействие, оказывается практически нецелесообразной. Кроме того, регулярные методы, в частности метод градиента и скорейшего спуска, малопригодны для поиска глобальных минимумов функции качества.

Интенсивно развивающиеся в последнее время мето-

ды случайного поиска экстремумов многопараметрических функционалов /5-9/ позволяют решать данную задачу по достаточно простым алгоритмам, реализация которых возможна на малых ЭВМ при практически приемлемых временах поиска решения.

§2. Постановка задачи коррекции фазы пролета

В данной работе рассматривается возможность применения нескольких алгоритмов случайного поиска для решения задачи коррекции фазы пролета сгустка относительно ускоряющего напряжения в изохронных циклотронах.

Функция качества для этой задачи может быть записана либо в виде

$$F_1 = \sum_i | \Delta \sin \phi_i^{\exists} - \Delta \sin \phi_i^T |, \quad /1/$$

либо в виде

$$F_2 = \sum_i (\Delta \sin \phi_i^{\exists} - \Delta \sin \phi_i^T)^2, \quad /2/$$

где

$$\Delta \sin \phi_i^{\exists} = \sin \phi_i^{\exists} - \sin \phi_0,$$

$$\Delta \sin \phi_i^T = \sin \phi_i^T - \sin \phi_0.$$

ϕ_0 - фаза на некотором радиусе r_0 ускорителя; ϕ_i^{\exists} - экспериментально измеренная фаза на радиусе r_i ; ϕ_i^T - фаза на радиусе r_i , вычисленная по формуле /10/

$$\sin \phi_i^T = \sin \phi_0 - A \int_{r_0}^{r_i} \sum_j G_j(r_i) \Delta I_j r \cdot dr,$$

где

$$A = \frac{2\pi q E_0}{e V_0 r_{\infty}^2};$$

ΔI_j - корректирующие добавки токов в концентрических обмотках ускорителя; $G_j(r_i)$ - коэффициенты связи магнитного поля, создаваемого j -той корректирующей катушкой, и тока, текущего в ней.

В данной работе был использован функционал F_1 . Для его минимизации применялись следующие разновидности случайного поиска:

1. "Слепой поиск".
2. Простейший "счет-пересчет".
3. "Счет-пересчет" со сменой шага.
4. "Счет-пересчет" со сменой шага и введением весовых коэффициентов.

§3. Сравнительный анализ различных алгоритмов случайного поиска

1. Алгоритм слепого поиска складывается из следующей последовательности операций. Генерируется M случайных чисел с равномерным законом распределения, которые имитируют случайный набор токов в M корректирующих катушках. По формуле /3/ рассчитывается получающееся при этих токовых добавках распределение фазы вдоль радиуса $\phi_I^T(r_i)$ и сравнивается с зависимостью $\phi^{\Theta}(r_i)$ в одних и тех же точках по радиусу. Процесс генерации случайных корректирующих токовых добавок продолжается до тех пор, пока не будет удовлетворяться неравенство

$$|\phi_i^{\Theta} - \phi_i^T| \leq \Delta\phi_i^{\text{доп.}}$$

в каждой из заданных точек вдоль радиуса, где: $\Delta\phi_i^{\text{доп.}}$ - заданная допустимая неточность коррекции фазы на соответствующих радиусах.

2. Как видно из вышеизложенного, алгоритм слепого поиска находит полные значения корректирующих добавок к исходным токам в катушках, которые приводят исходную фазовую зависимость $\phi^{\Theta}(r_i)$ к требуемой с точностью $\Delta\phi_i^{\text{доп.}}$. Очевидно, что уже при числе корректирующих катушек $MM > 10$ найти сочетание токов коррекции, решающее поставленную задачу за приемлемый отрезок времени, очень затруднительно, поскольку корреляционные связи между воздействием различных

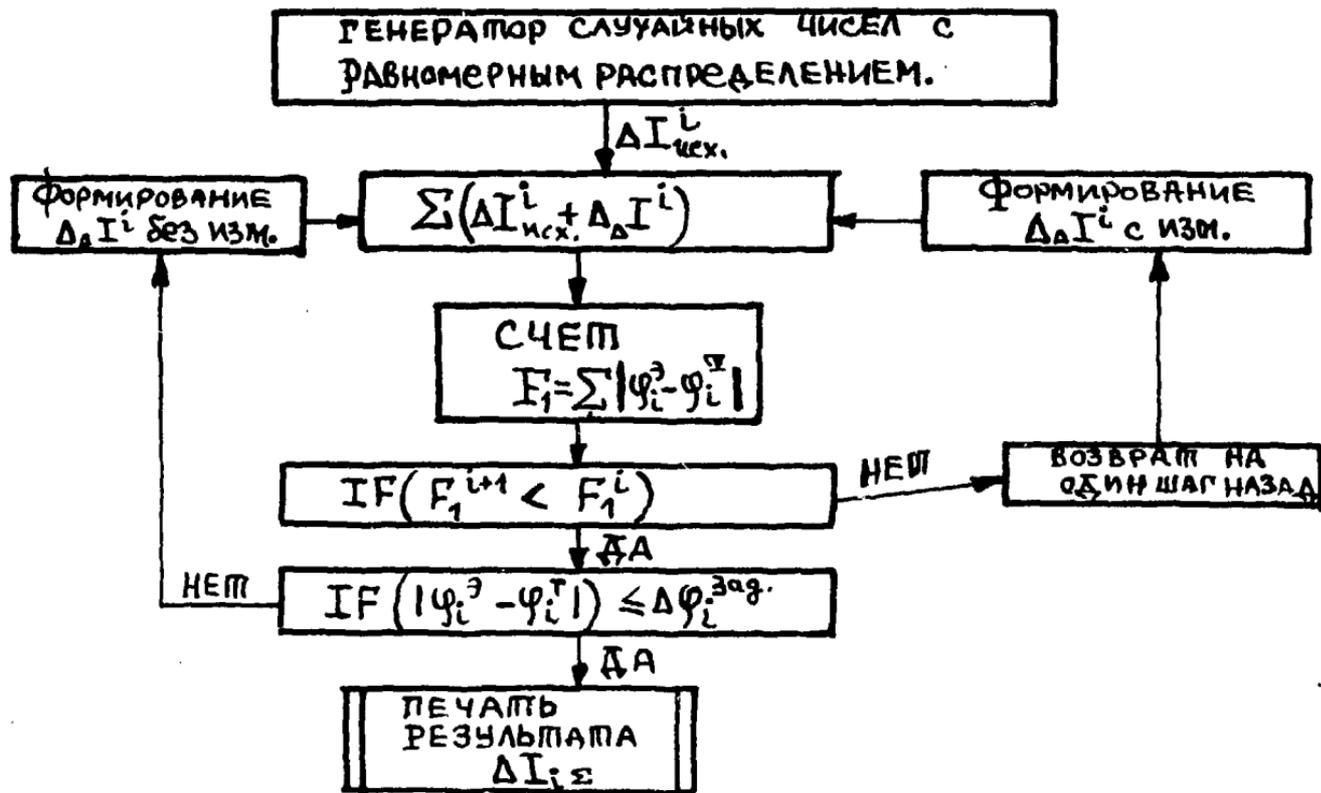


Рис. 1. Логическая схема алгоритма типа "простейший счет-пересчет".

катушек на функционал F_1 резко возрастают с увеличением их количества. Ниже будут приведены количественные характеристики метода слепого поиска, которые показывают его практическую непригодность для реализации на малых ЭВМ из-за огромного времени поиска решения.

В алгоритме простейшего счета-пересчета токи коррекции ищутся методом последовательного приближения. Первоначально задается некоторый набор случайных значений M корректирующих токов с равновероятным законом распределения. По формуле /1/ вычисляется величина функционала F_1 . Затем проверяется выполнение неравенства: $|\phi_i^{\text{Э}} - \phi_i^{\text{T}}| \leq \Delta \phi_i^{\text{доп}}$. В случае его невыполнения набирается новая совокупность M случайных чисел с равновероятным законом распределения, имитирующая добавки к исходным случайным значениям токов коррекции, складывается с этими исходными токами, и опять считается функционал F_1 для суммарных величин токов коррекции. Если полученная величина F_1 на втором шаге приближения окажется меньше, чем величина F_1 на первом шаге, то полученное на втором шаге значение суммарного тока закрепляется как исходное для дальнейшего процесса поиска. Если же величина F_1 на втором шаге окажется больше, чем F_1 на первом шаге, то добавка второго шага бракуется и вычитается из суммарного тока, возвращая его к значению первого шага, и от этого исходного значения производится следующая проба и т.д. до тех пор, пока не будет получен удачный шаг в направлении уменьшения F_1 . Удачное значение шага добавляется к накопленному в предыдущих итерациях значению тока коррекции и т.д., пока не будет выполнено неравенство $|\phi_i^{\text{Э}} - \phi_i^{\text{T}}| \leq \Delta \phi_i^{\text{доп}}$, означающее, что решение найдено. Логическая схема алгоритма приведена на рис. 1.

3. Пробные расчеты по алгоритму простейшего счета-пересчета показали, что по мере приближения токов коррекции к истинным значениям для увеличения скорости сходимости оказалось целесообразным уменьшать величину шаговых добавок токов, тогда как на начальном этапе поиска иногда полезно увеличить шаговую добав-

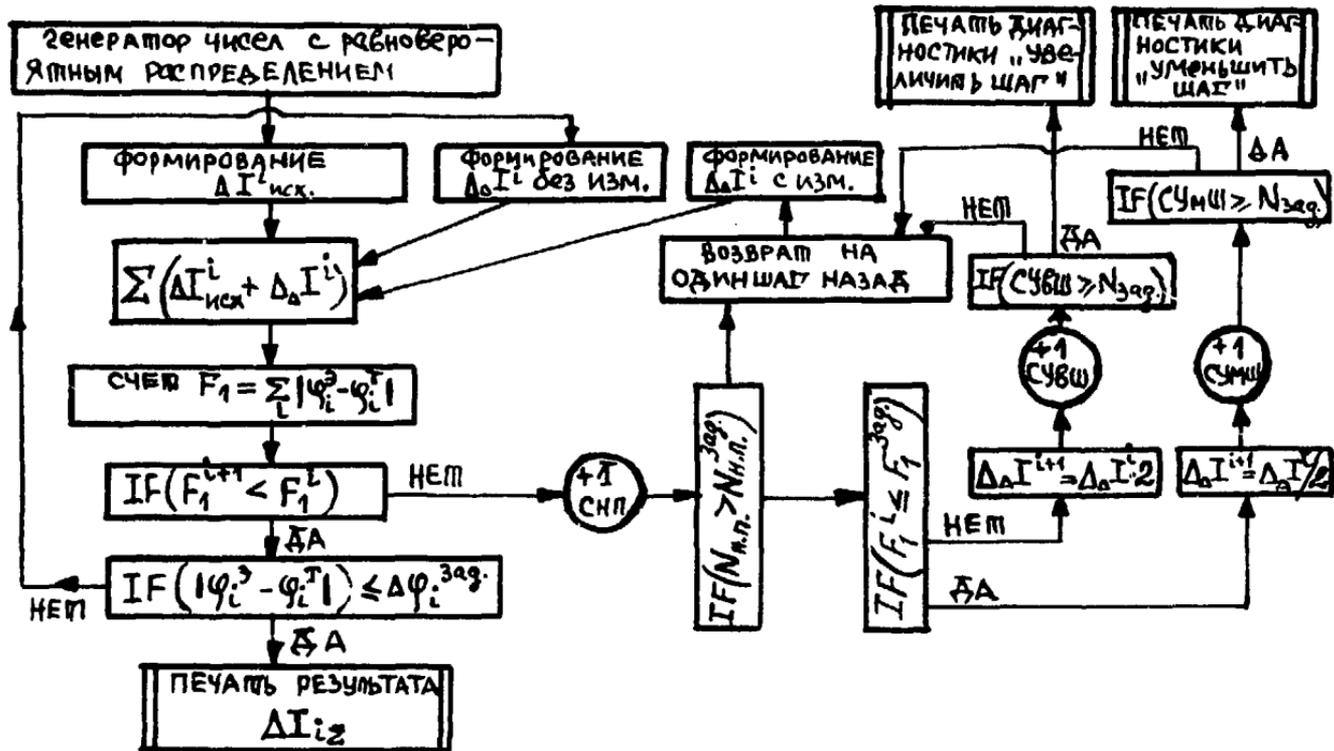


Рис. 2. Схема алгоритма типа "счет-пересчет со сменой шага".

ку, поскольку трудно правильно задать исходное значение тока коррекции на первом шаге. Введение логики смены шага с учетом текущего поведения функционала F_1 приводит к новому алгоритму, который выше назван, как счет-пересчет со сменой шага. Этот алгоритм уже обладает возможностью самообучения в процессе поиска /адаптацией/. Логическая схема алгоритма приведена на рис. 2.

Незначительно увеличивая сложность программы, алгоритм счет-пересчет со сменой шага позволяет существенно снизить затраты времени на получение результата при том же качестве коррекции, что и в случае алгоритма простейшего счета-пересчета.

4. Следующим шагом по пути уменьшения времени поиска решения является введение весовых коэффициентов в отклонения $|\phi_i^3 - \phi_i^T|$ при счете функционала F_1 . Весовые коэффициенты зависят от величины этой разницы на том или ином радиусе ускорения.

Введение весовых коэффициентов начинается с некоторой достаточно малой достигнутой величины F_1 , т.к. эффективное уменьшение отклонений $|\phi_i^3 - \phi_i^T|$ за счет введения весовых коэффициентов происходит лишь в случае, когда неравенство $|\phi_i^3 - \phi_i^T| \leq \Delta \phi_i^{\text{доп}}$ нарушается в небольшом числе точек по радиусу. Упрощенная схема алгоритма счет-пересчет с весовыми коэффициентами изображена на рис. 3.

§4. Результаты математического моделирования задачи коррекции фазы на ЭВМ

По описанным выше алгоритмам на ЭВМ БЭСМ-6 проводилось математическое моделирование решения задачи коррекции фазы пролета для электронной модели кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой L^1 . Были скорректированы 7 экспериментальных зависимостей $\phi_i^3(r_i)$ /рис. 4,5/, снятых на электронной модели, четырьмя вышеописанными методами случайного поиска, а также методом наименьших квадратов. Скорректиро-

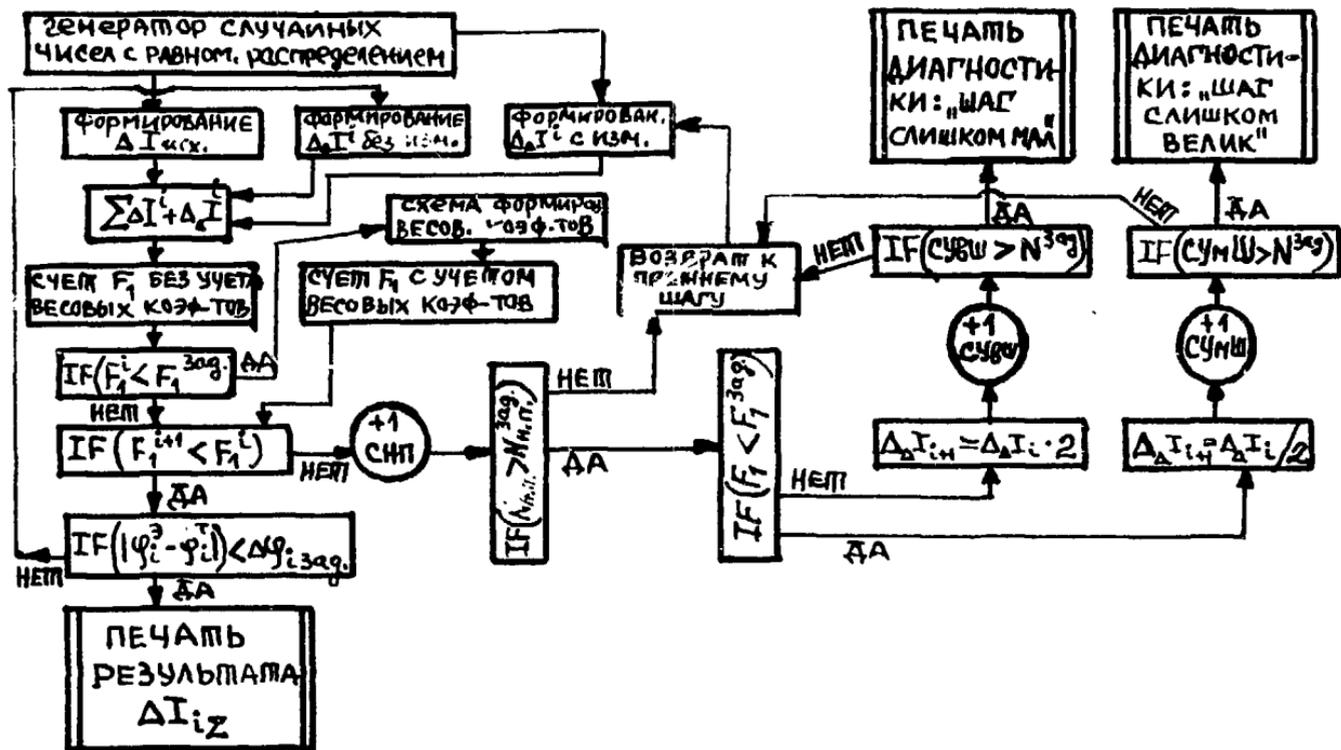


Рис. 3. Упрощенная схема алгоритма типа "счет-пересчет со сменой шага и с весовыми коэффициентами".

ванная зависимость $\phi_c(r_i)$ должна была удовлетворять условию: $|\phi_i^3 - \phi_i^T| \leq \Delta\phi_i^{\text{доп}}$, где $\Delta\phi_i^{\text{доп}} = \pm 6^\circ; \pm 10^\circ; \pm 15^\circ$. Число точек по радиусу, в которых задавалась $\phi_i^3(r_i)$, $N = 14$, тогда как число корректирующих катушек M было выбрано равным 8.

Выводы, которые можно сделать из проведенных расчетов, сводятся к следующему:

1. Время счета токов коррекции а/ методом слепого поиска колеблется в пределах от нескольких минут до десятков минут; б/ метод "счет-пересчет" простейший дает незначительное улучшение времени счета по сравнению со "слепым поиском"; в/ "счет-пересчет" со сменой шага улучшает время поиска решения примерно на порядок по сравнению с предыдущими методами, т.е. доводит его до десятков секунд; г/ "счет-пересчет" со сменой шага и с весовыми коэффициентами дает еще примерно тройное сокращение времени счета по сравнению с в/, т.е. поиск токов коррекции занимает время порядка единиц секунд, что уже сравнимо с временем решения одной итерации методом наименьших квадратов.

2. Время поиска токов коррекции одним и тем же методом существенно зависит от сложности корректируемой зависимости $\phi_i^3(r_i)$, а также от максимальной разницы между фазами во всем диапазоне радиусов ускорения.

Выше указывалось, что при поиске токов коррекции путем минимизации нелинейной функции качества системы с помощью метода наименьших квадратов необходимо выполнить несколько итераций, т.е. время на нахождение решения в этом случае значительно возрастает.

Предполагается, что алгоритм случайного поиска типа "счет-пересчет" со сменой шага и весовыми коэффициентами, будучи программно значительно проще нелинейного варианта программы м.н.к., по времени поиска решения сможет даже быть быстрее, чем м.н.к., особенно в случае коррекции небольших отклонений фазы пролета от некоторого уровня. Задача коррекции малых отклонений фазы встречается в системах автоматической стабилизации фазы пролета на некотором заданном уровне, в связи с чем алгоритмы случайного поиска могли бы найти там свое применение.

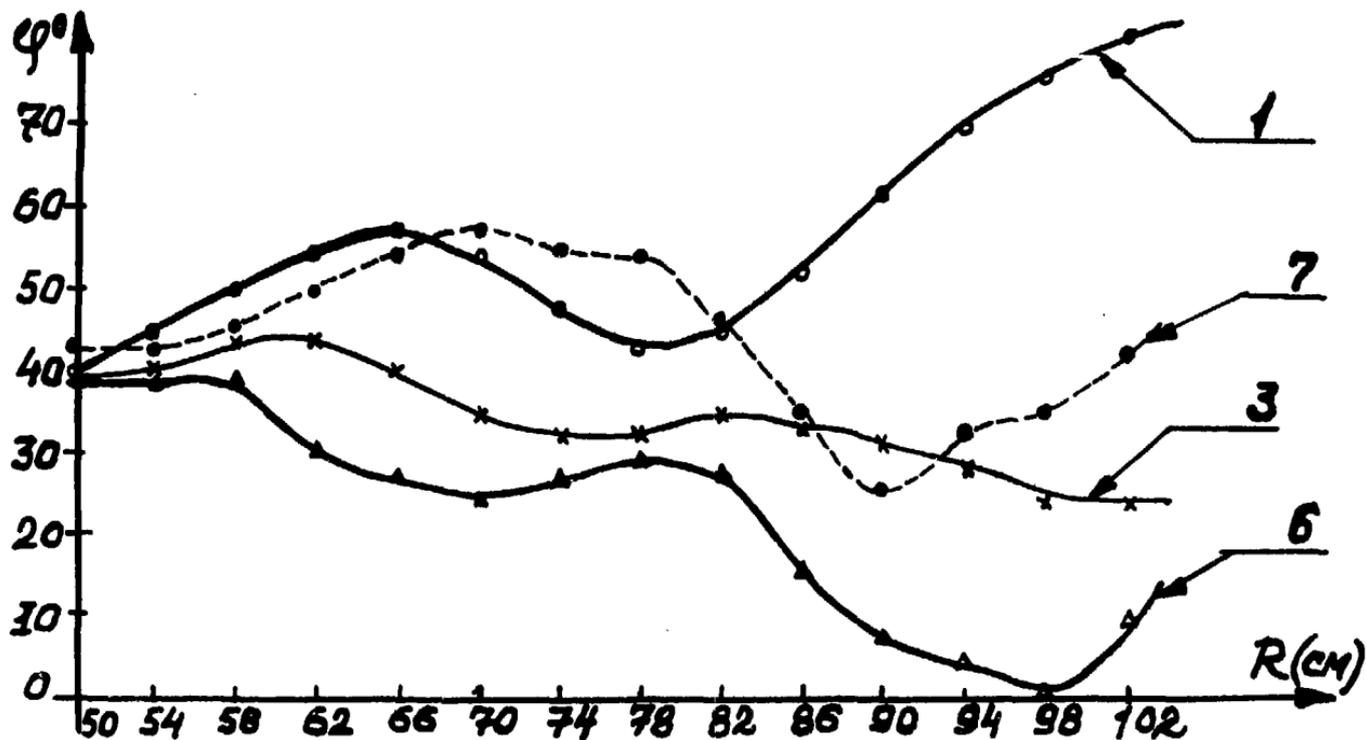


Рис. 4. Экспериментально измеренные на электронной модели кольцевого циклотрона зависимости фазы пролета от радиуса.

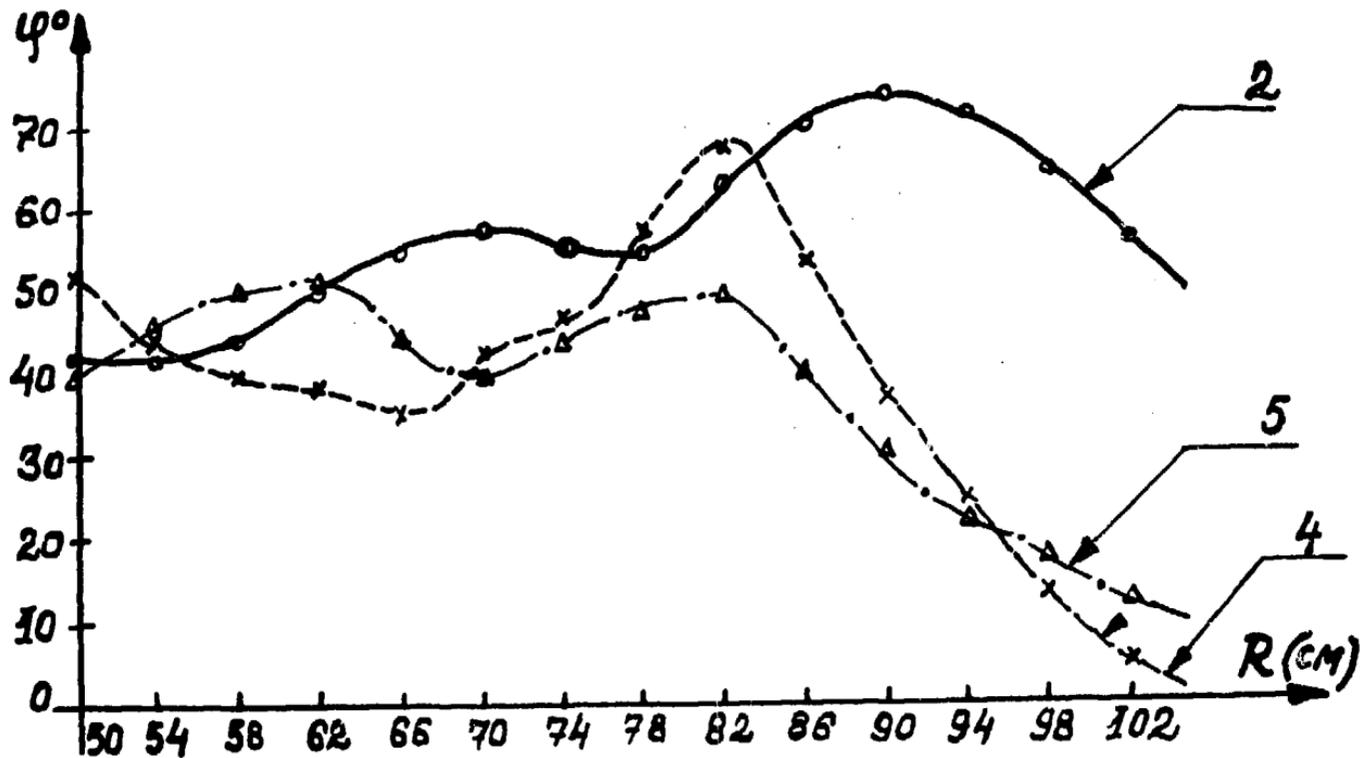


Рис. 5. То же, что на рис. 4.

Литература

1. R.A. de Forest. *Fifth Intern. Cyclotron Conf.*, Oxford, 1969, 141.
2. F.Schutte et al. *Sixth Intern. Cyclotron Conf.*, Vancouver, 515, 1972.
3. Л.А.Расстригин. Теория и применение случайного поиска. Рига, "Зинатне", 1969.
4. Р.В.Хеминг. Численные методы. "Наука", 1972.
5. Труды III Всесоюзного симпозиума по экстремальным задачам. Томск, Изд. ТГУ, 1969.
6. Л.А.Расстригин, Л.В.Сытенко. Многоканальные статистические оптимизаторы, "Энергия", 1973.
7. Л.А.Расстригин. Методы случайного поиска. Рига, "Зинатне", 1965.
8. Л.А.Расстригин. Теория и применение случайного поиска. Рига, "Зинатне", 1969.
9. Л.А.Расстригин. Случайный поиск в процессе адаптации. Рига, "Зинатне", 1969.
10. A.A.Garpen. NS-18,19, 309, 1962.
11. В.Н.Аносов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3787, Дубна, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 декабря 1974 года.